

ВЕСТНИК



Сибирского государственного
аэрокосмического университета
имени академика М. Ф. Решетнева

Том 17, № 1

Красноярск 2016

ВЕСТНИК

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

Том 17, № 1

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)
Краточилова И., доктор, доцент (Прага, Чехия)
Краус И., профессор (Прага, Чехия)
Лопатин А. В., доктор технических наук, профессор (Красноярск)
Лю Т., профессор (Пекин, Китай)
Минкер В., доктор, профессор (Ульм, Германия)
Миронов В. Л., член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор (Красноярск)
Младенов Г., член-корреспондент Болгарской академии наук, доктор физических наук, профессор (София, Болгария)
Павера Р., доцент (Братислава, Словакия)
Семенкин Е. С., доктор технических наук, профессор (Красноярск)
Тестоедов Н. А., член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор (Железногорск)
Ужуле К., доктор (Рига, Латвия)
Фошнер М., доктор, доцент (Марибор, Словения)
Чжанг Ш., доктор (Тяньцзинь, Китай)
Шабанов В. Ф., академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор (Красноярск)
Шайдуров В. В., член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор (Красноярск)
Швиденко А., доктор инженерных наук, профессор (Лаксембург, Австрия)
Эйя Х., доктор инженерных наук, профессор (Тронхейм, Норвегия)

VESTNIK

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

Vestnik SibSAU. Aerospace technologies and control systems

Vol. 17, No 1

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 COUNCIL

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

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

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

Kalvoda L., Cand.Sc.-Ing., Associate Professor

(Prague, Czech Republic)

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

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

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

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

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

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

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

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

Pawera R., Associate Professor (Bratislava, Slovakia)

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

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

Užule K., Ph.D. (Riga, Latvia)

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

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

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

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

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

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

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ

Журнал «Вестник СибГАУ» является научным, производственно-практическим рецензируемым изданием. Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ-ФС77-22189 от 27.10.2005 г. ISSN 1816-9724. Подписной индекс в каталоге «Пресса России» – 39263.

Входит в перечень журналов ВАК.

Зарегистрирован в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ).

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

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

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

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

Каждый выпуск включает четыре раздела:

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

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

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

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

Учредитель и издатель

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

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

Редактор: О. А. ПЛЕХОВА

Редактор английского текста С. Г. ЭФА

Оригинал-макет и верстка О. В. БУЛАТНИКОВОЙ

Подписано в печать 25.03.2016. Формат 70×108/16.

Бумага офсетная. Печать плоская. Усл. печ. л. 30,7.

Уч.-изд. л. 39,0. Тираж 1000 экз. Заказ 87/237. С 103/16.

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: 19.04.2016. Свободная цена

INFORMATION FOR AUTHORS AND SUBSCRIBERS

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

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

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

The Journal is included in the following subscription catalogue: 39263 – Pressa Rossii.

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

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

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

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

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

Each issue consists of four parts:

- Part 1. Mathematics, Mechanics, Computer Science.
- Part 2. Aviation and Spacecraft Engineering.
- Part 3. Technological Processes and Material Science.
- Part 4. Economics Aerospace Industry.

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

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

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

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

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

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

Editor O. A. PLEKHOVA

Editor (English Language) S. G. EFA

Layout original O. V. BULATNIKOVA

Signed (for printing): 25.03.2016. Format 70×108/16.

Offset Paper. Print flat. 34,0. Published sheets 39,0.

1000 copies. Order 87/240. C 103/16.

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: 19.04.2016. Free price

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. МАТЕМАТИКА, МЕХАНИКА, ИНФОРМАТИКА

Бельская Е. Н., Медведев А. В., Михов Е. Д., Тасейко О. В. Применение методов непараметрического моделирования в решении задач экологического мониторинга	10
Браништи В. В. Введение пространства $L_{2,w}$ при построении проекционной оценки плотности вероятности	19
Брестер К. Ю., Семенкина О. Э., Сидоров М. Ю. Генетические алгоритмы многокритериальной оптимизации как эффективный инструмент отбора признаков в задаче распознавания эмоций по речи	27
Зеньков И. В. Дистанционное зондирование в решении экологических проблем лесной рекультивации на угольных карьерах Сибири	36
Иванов И. А. Многокритериальный метод отбора признаков и построения коллектива нейронных сетей для решения задачи распознавания эмоций	45
Картамышев А. С., Мурыгин А. В. Подход к созданию интегрированной информационной системы управления на предприятиях ракетно-космической отрасли	50
Колосницын А. В. Поиск транспортного стохастического равновесия с приложениями в газотранспортной модели России	56
Кузьмина И. А. Система автоматизации проектирования городской распределительной сети электроснабжения	62
Лосева Е. Д., Липинский Л. В. Ансамбли нейросетевых моделей с применением многокритериального самоконфигурируемого генетического программирования	67
Немировский Ю. В., Федорова Н. А. Предельные деформации термоупругих плоских конструкций с криволинейным армированием	73
Сафонов К. В. О математической модели формирования цены на нефть	79
Спирина А. В., Сидоров М. Ю., Сергиенко Р. Б., Семенкин Е. С., Минкер В. Корпус задачеориентированных диалогов типа «человек–человек» для моделирования качества взаимодействия	84
Хамисов О. В., Минарченко И. М. Локальный поиск в билинейной игре двух лиц	91
Шкраба А., Становов В. В., Жнидарнич А., Розман Ч., Кофьяч Д. Рассмотрение стратегии оптимального управления строго иерархической системы управления человеческими ресурсами	97
Юлдашев Т. К. Нелинейная задача оптимального управления для одной системы с параболическим уравнением при наличии нескольких подвижных источников	103
Яковлев Е. И. О восстановлении аналитической функции в спиральной звезде Миттаг-Леффлера по значениям на множестве единственности	110

РАЗДЕЛ 2. АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Зимин И. И., Валов М. В., Яковлев А. В. Перспективные унифицированные платформы малого класса	118
Кацура А. В., Акзигитов А. Р., Андронов А. С., Строков Д. Е., Акзигитов Р. А. Разработка бортового устройства спутникового мониторинга воздушных судов	125
Ковалев И. В., Баданина Ю. О. Платформа автоматизации системы компенсации весовой составляющей для крупногабаритных рефлекторов космических аппаратов	131
Коновалов Д. А., Кожухов Н. Н., Дроздов И. Г. Моделирование процессов тепломассопереноса в микроканальных теплообменниках систем управления космической техники	137
Лапухин Е. Г., Владимиров В. М., Границкий Л. В. Объектив камеры сопровождения для спутникового лазерного дальномера оптического диапазона	147
Мошков П. А., Самохин В. Ф. Оценка влияния диаметра воздушного винта на акустические характеристики силовой установки легкого самолета	154
Финогенов С. Л., Коломенцев А. И. Выбор теплоаккумулирующего материала для солнечного теплового ракетного двигателя	161
Юсов А. В., Козлов С. А., Архипов М. Ю., Костров Е. А. Компоненты высокоточного электромеханического привода для сверхнизких температур (4,2 К) системы адаптации трансформируемой космической конструкции	170

РАЗДЕЛ 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

Артемьев Е. М., Якимов Л. Е. Магнитные свойства и фазовый состав тонких пленок системы СО–ПД	178
Ашейчик А. А., Полонский В. Л. Исследование износостойкости и нагрузочной способности резин для шкивов грузоподъемного оборудования	186
Крушенко Г. Г. Получение деталей транспортного средства жидкой штамповкой из сплава АК7	194
Тестоедов Н. А., Наговицин В. Н., Пермяков М. Ю. Применение трехслойных сотовых конструкций в космических аппаратах	200
Шестаков И. Я., Семенова Л. А. Скрайбирование полупроводниковых пластин проволочным электродом-инструментом	212

РАЗДЕЛ 4. ЭКОНОМИКА

Беляков Г. П., Анищенко Ю. А., Сафонов М. В. Космическая деятельность: состояние, особенности и тенденции развития	218
Бревнов В. Г. Конкурентоспособность инновационных проектов предприятий оборонно-промышленного комплекса: сущность и содержание понятия	223
Вашкевич В. П. Формирование стратегии предприятия космической отрасли в сфере охраны результатов интеллектуальной деятельности	231
Лукьяннова А. А., Кононова Е. С. Применение международного опыта при реализации программно-целевого подхода в региональном социально-экономическом развитии (на примере Красноярского края)	241
Товстоношенко В. Н., Медведев А. В. Методы оценки и прогнозирования рисков инновационной деятельности предприятий ракетно-космической промышленности	247
Химин Е. Б., Беляков Г. П. Концепция управления развитием региональной системы подготовки кадров для оборонно-промышленного комплекса России	252
Сведения об авторах	260

CONTENTS

PART 1. MATHEMATICS, MECHANICS, COMPUTER SCIENCE

Bel'skaya E. N., Medvedev A. V., Mikhov E. D., Taseiko O. V. Application of non-parametric modeling in solving problems of environmental monitoring	10
Branishti V. V. Introducing the $L_{2,w}$ space for building the projective estimation of probability density function	19
Brester Ch. Yu., Semenkina O. E., Sidorov M. Yu. Multi-objective genetic algorithms as an effective tool for feature selection in the speech-based emotion recognition problem	27
Zenkov I. V. Remote sensing in the decision of environmental problems of forest remediation at coal strip mines in Siberia	36
Ivanov I. A. Multi-objective based feature selection and neural networks ensemble method for solving emotion recognition problem	45
Kartamyshev A. S., Murygin A. V. Approach for development of integrated information control system on aerospace enterprises	50
Kolosnitsyn A. V. Stochastic network equilibrium search with applications in the gas transportation model of Russia	56
Kuzmina I. A. Cad system for perspective power supply network development task solution	62
Loseva E. D., Lipinsky L. V. Ensembles of neural networks with application of multi-objective self-configurable genetic programming	67
Nemirovsky Y. V., Feodorova N. A. Breaking strains of planar thermoelastic constructions reinforced by curvilinear structures	73
Safonov K. V. A mathematical model of oil price assessment	79
Spirina A. V., Sidorov M. Yu., Sergienko R. B., Semenkin E. S., Minker W. Human-human task-oriented conversations corpus for interaction quality modeling	84
Khamisov O. V., Minarchenko I. M. Local search in bilinear two-person game	91
Škraba A., Stanovov V., Žnidaršič A., Rozman Č., Kofjač D. Consideration of optimal control of strictly hierarchical manpower system	97
Yuldashev T. K. A nonlinear problem of optimal control for a system with parabolic equation if there are several dot mobile sources	103
Yakovlev E. I. About restory of analytic functions in the Mittag-Leffler's spiral star by the values on a set of uniqueness	110

PART 2. AVIATION AND SPACECRAFT ENGINEERING

Zimin I. I., Valov M. V., Yakovlev A. V. Advanced unified micro series platforms	118
Katsura A. V., Akzigitov A. R., Andronov A. S., Strokov D. E., Akzigitov R. A. Development of onboard device for satellite monitoring of aircraft	125
Kovalev I. V., Badanina J. O. Platform of automation of component weight compensation system for large spacecraft reflector	131
Konovalov D. A., Kozhukhov N. N., Drozdov I. G. Modeling of processes of heat and mass transfer in microchannel heat exchangers of space-system engineering control systems	137
Lapukhin E. G., Vladimirov V. M., Granitskiy L. V. Camera lens for a satellite laser ranging for visual targeting optical range	147
Moshkov P. A., Samokhin V. F. Evaluation of the influence of diameter propeller on the acoustics characteristic of the power plant by the light aircraft	154
Finogenov S. L., Kolomentsev A. I. The choice of heat-accumulating materials for solar thermal propulsion	161
Jusov A. V., Kozlov S. A., Arhipov M. Ju., Kostrov E. A. Components of high-precision electromechanical actuator for system of adaptation transformable space telescope for ultra-low temperatures (4.2 K)	170

PART 3. TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIAL SCIENCE

Artem'ev E. M., Yakimov L. E. Magnetic properties and phase composition of the thin layers of Co-Pd system	178
---	-----

Asheichik A. A., Polonsky V. L. Research of wear resistance and loading ability of rubbers for sheaves with the rubber covering	186
Krushenko G. G. The manufacture of parts of the vehicle by liquid forging out of alloy AK7	194
Testoedov N. A., Nagovitsin V. N., Permyakov M. Yu. Spacecraft application of three layer honeycomb structures	200
Shestakov I. Ya., Semenova L. A. Scribing of semiconductor wafers by wire electrode-tool	212

PART 4. ECONOMICS AEROSPACE INDUSTRY

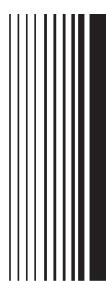
Belyakov G. P., Anischenko Y. A., Safronov M. V. Space activity: condition, features and trends	218
Brevnov V. G. Competitiveness of innovative projects of the defense industry enterprises: essence and content of concept	223
Vashkevich V. P. Formation of strategy of the space industry in the field of protection of intellectual activity results	231
Lukyanova A. A., Kononova E. S. Application of international experience in the implementation of program-target approach in regional socio-economic development (on the example of Krasnoyarsk region)	241
Tovstonoshenko V. N., Medvedev A. V. Methods of assessment and forecasting the risks of innovative activity of the enterprises of rocket and space industry	247
Himin E. B., Belyakov G. P. The concept of management development of regional system of personnel training for the military-industrial complex of Russia	252
Information about the authors	263

Раздел
PART
1



МАТЕМАТИКА,
МЕХАНИКА,
ИНФОРМАТИКА

MATHEMATICS,
MECHANICS,
COMPUTER SCIENCE



ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Е. Н. Бельская¹, А. В. Медведев¹, Е. Д. Михов^{2*}, О. В. Тасейко¹

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

²Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
*E-mail: edmihov@mail.ru

Рассмотрены основные задачи экологического мониторинга, в том числе решаемые с использованием спутниковых данных дистанционного зондирования. Проведен анализ экологической ситуации в России, существующих методов размещения пунктов наблюдения в системах контроля атмосферного воздуха и программ наблюдений. Охарактеризована система экологического мониторинга в Красноярске и необходимость применения методов моделирования при оценке экологической обстановки с целью комплексного учета многих факторов (параметры источников выбросов, текущее метеорологическое состояние атмосферы, условия рассеивания для данной местности, свойства моделируемых веществ и др.).

Исследована проблема создания модели экологической обстановки в г. Красноярске в контексте Н-моделей. Показана необходимость использования соответствующих непараметрических индикаторов при построении обучающихся параметрических моделей «трубчатых» процессов.

Проанализирован вопрос идентификации в узком и широком смысле. Рассмотрен стандартный способ моделирования экологической обстановки, описаны сложности, возникающие при моделировании процессов, имеющих «трубчатую» структуру, параметрическими методами.

Представлена модель прогноза экологической ситуации в г. Красноярске, разработанная методами непараметрического моделирования с использованием ядерных оценок на основе данных наблюдений государственной сети мониторинга, приведены результаты моделирования пространственного распределения окиси углерода.

Обоснована необходимость применения данного подхода в принятии управлений решений, регулирующих экологическую обстановку в режиме реального времени. В связи с необходимостью развития региональных сетей мониторинга, задачи выбора пунктов наблюдения и оптимизации программы мониторинга качества атмосферного воздуха являются наиболее актуальными, в их решении необходимо комплексное рассмотрение всей совокупности факторов и угроз, а также использование новейших технологий (в том числе применение аэрокосмических (дистанционных) методов экологического мониторинга). Предложенный подход позволит оптимизировать процедуру принятия решений в области управления качеством окружающей среды. В дальнейшем возможно расширение модели, что позволит рассчитывать распространение загрязнения не только в пространстве, но и во времени и увеличить точность прогнозов.

Ключевые слова: моделирование экологической обстановки, непараметрическое моделирование, Н-процессы, загрязнение атмосферного воздуха города, спутниковые снимки.

Vestnik SibGAU
Vol. 17, No. 1, P. 10–18

APPLICATION OF NON-PARAMETRIC MODELING IN SOLVING PROBLEMS OF ENVIRONMENTAL MONITORING

E. N. Bel'skaya¹, A. V. Medvedev¹, E. D. Mikhov^{2*}, O. V. Taseiko¹

¹Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

²Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
*E-mail: edmihov@mail.ru

The analysis of the air quality in Russia showed the invalidity of existing methods of the air control and observation systems. The analysis of the main objectives of environmental monitoring can be solved by using satellite remote sensing data. The system of environmental monitoring in Krasnoyarsk city is developing. But nowadays it is important

to apply modeling techniques in the evaluation of the environmental situation to integrate a number of factors (parameters of the emissions sources, current meteorological situation, the air dispersion conditions, the pollutant properties and others.).

This paper shows the availability of H-models using for creating a model of ecological situation in Krasnoyarsk city. The using of appropriate non-parametric indicators is necessary to construct the parametric models with using “tubular” processes.

This research analyses the issue of identification in the “narrow” and “broad” sense. Also, this paper discusses the standard way of modeling the environmental situation and describes the complexities in the modeling process with “tubular” structure by using of parametric methods.

The model of the environmental situation forecast in Krasnoyarsk city was developed with using the methods of non-parametric modeling by the help of nuclear grade. The results of modeling characterize the spatial distribution of carbon monoxide.

The using of this approach is efficient for the environment management in real time. The necessity of development of regional monitoring networks demands to solve the problem of choosing observation points and optimization program of air quality monitoring. For this purpose it is necessary to consider all influencing factors in totality, and also to use new technologies (including the remote environmental monitoring methods).

The proposed approach will optimize the decision-making procedure in the field of environmental management. The improvement of the model can be connected with calculating of the time and space distribution of pollutants, and increasing of the accuracy of environmental quality forecasts.

Keywords: environmental situation modeling, nonparametric modeling, H-processes, urban air pollution, satellite view.

Введение. В наши дни одной из главных забот человечества стала экология. Многие меры по борьбе с экологическими проблемами уже приняты мировым сообществом, подключаются и современные высокотехнологичные разработки, одной из которых является космический мониторинг.

Мониторинг процессов, происходящих на Земле, осуществляемый из космоса, помогает быстро реагировать на происходящие изменения. Аэрокосмические (дистанционные) методы экологического мониторинга, включающие систему наблюдения при помощи самолетных, аэростатных средств, спутников и спутниковых систем, а также систему обработки данных дистанционного зондирования, позволяют оперативно выявлять очаги и характер изменений окружающей среды, прослеживать интенсивность процессов и амплитуды экологических сдвигов, изучать взаимодействие техногенных систем [1].

Данные дистанционного зондирования позволяют решать множество задач контроля состояния окружающей среды [1]:

- определение метеорологических характеристик: вертикальные профили температуры, интегральные характеристики влажности, характер облачности и т. д.;
- контроль динамики атмосферных фронтов, ураганов, получение карт крупных стихийных бедствий;
- определение температуры подстилающей поверхности, оперативный контроль и классификация загрязнений почвы и водной поверхности;
- обнаружение крупных или постоянных выбросов промышленных предприятий;
- контроль динамики снежных покровов и загрязнений снежного покрова в зонах влияния промышленных предприятий.

Экологическая ситуация в Российской Федерации ухудшается с каждым годом: по официальным данным 15 % территории (это Европейская часть РФ, Поволжье, Урал), где проживает 60 % населения,

не отвечают требованиям экологической безопасности [2].

На сегодняшний день сохраняется неприемлемо высокий риск для населения и экосистем. Экологический мониторинг, объектами которого в первую очередь являются атмосфера, поверхностные воды суши, океанов и морей, подземные воды, криосфера, является необходимым звеном обеспечения экологического баланса на Земле.

В структуру экологического мониторинга включены не только наблюдения и оценка фактического состояния анализируемой среды, но и прогноз состояния, оценка прогнозируемого состояния и регулирование качества среды.

Наблюдение за состоянием природной среды и происходящими в ней процессами под влиянием факторов антропогенного воздействия требует использования разносторонней и детальной информации о её состоянии.

Репрезентативность наблюдений за состоянием загрязнения атмосферы в городе зависит от правильности расположения пунктов отбора проб на обследуемой территории [3; 4].

Анализ описанных в литературе методов размещения пунктов наблюдения в системах контроля атмосферного воздуха позволяет сделать вывод, что, во-первых, во всех рассмотренных работах отсутствует единый подход, во-вторых, создание универсальной методики пространственного размещения станции является сложной задачей в силу характера расположения городов, своеобразия источников выбросов, особенностей застройки и т. д. Решение ее существенно зависит от функций, которые должна выполнять система мониторинга [5; 6]. Программы наблюдений формируются по принципу выбора приоритетных (подлежащих первоочередному определению) загрязняющих веществ и интегральных (отражающих группу явлений, процессов, веществ) характеристик.

Большинство методик носит скорее рекомендательный и общеописательный характер, чем аналитический, дает общие рекомендации при выборе пунктов наблюдения с учетом планировки и застройки районов города, местоположения источников загрязнения и рельефа местности, чтобы отбираемые пробы воздуха характеризовали не локальное, а общее загрязнение воздушного бассейна города. Некоторые методики используют статистический анализ результатов наблюдений, на основании которого определяется рациональное расстояние между станциями, количество станций на единицу площади и т. д.

На сегодняшний день в Красноярске существуют 8 стационарных пунктов мониторинга федеральной наблюдательной сети – два в Ленинском районе и по одному во всех остальных. Несмотря на то, что в последние годы стали появляться дополнительные посты наблюдения (теперь их уже 5) [7], места для их размещения выбирают в соответствии с теми же нормативными документами, что и для федеральной сети. Основные требования к размещению постов наблюдения разработаны в 60-х гг. прошлого века, и новых до сих пор не существует.

Сложный рельеф местности, количество и размещение основных промышленных и транспортных источников, а также метеорологические условия могут значительно повлиять на распределение концентраций поллютантов в пределах рассматриваемой зоны и сделать его существенно неравномерным. Для решения этих задач проводят математическое моделирование распространения примесей, которое позволяет оценить степень загрязнения атмосферы в заданной точке местности, не проводя в ней натурных измерений.

Моделирование требует комплексного учета многих факторов, таких как параметры источников выбросов и текущего метеорологического состояния атмосферы, условия рассеивания для данной местности, свойства моделируемых веществ и др. [8]. В последнее время нарастает тенденция использования методов непараметрического моделирования для решения подобного рода задач. В статье представлена модель, построенная при помощи метода ядерного сглаживания, – одного из непараметрических методов моделирования.

Идентификация в узком и широком смысле. При моделировании разнообразных дискретно-непрерывных процессов в настоящее время доминирует теория идентификации в узком смысле. Основная ее идея состоит в том, что на первом этапе с использованием имеющейся априорной информации определяется параметрический класс оператора объекта A^α , например:

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

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

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

Традиционно при оценивании экологической обстановки используют определение идентификации в узком смысле [9].

Идентификация в широком смысле предполагает отсутствие этапа выбора параметрического класса оператора. Часто оказывается значительно проще определить класс операторов на основе сведений качественного характера, например, линейности процесса или типа нелинейности, однозначности либо неоднозначности и др. В этом случае задача идентификации состоит в оценке данного оператора на основе выборки $\{x_i, u_i, i = \overline{1, s}\}$ [10; 11].

При идентификации в широком смысле хорошее качество выборки имеет особую значимость. Под качеством здесь подразумевается и точность измеряемых данных, и равномерность распределения во времени (по вектору $u(t)$). Качество данных имеет наибольшую значимость, так как без параметрического класса оператора оценка будет осуществляться только по данным, соответственно модель будет представлена следующим образом (2):

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

где $\vec{x}_s = (x_1, x_2, \dots, x_s)$, $\vec{u}_s = (u_1, u_2, \dots, u_s)$ – векторы, зависящие от временной переменной. Оценка оператора A_s может быть выполнена средствами непараметрической статистики без выбора параметрической структуры [12; 13]. Это позволяет утверждать, что идентификация такого рода (вариант идентификации в широком смысле) является более адекватной реальным задачам практики.

Основные сведения о «трубчатых» процессах (H -процессы). При моделировании разного рода процессов часто возникает ситуация, когда входные воздействия стохастически зависимы, причем характер этой зависимости чаще всего неизвестен. Подобная ситуация типична для дискретно-непрерывных процессов, доминирующих в металлургии, угольной промышленности, строиндустрии и многих других. Моделирование дискретно-непрерывных процессов при неполной информации продолжает оставаться одной из актуальнейших проблем теории идентификации. Случай, когда входные переменные оказываются стохастически зависимыми, представляет специальный интерес и может быть отнесен к категории новых задач идентификации. Последнее приводит к тому, что исследуемый процесс в пространстве входных-выходных переменных протекает не только в многомерном кубе, но в некоторой его подобласти, имеющей «трубчатую» структуру. Подобные процессы были названы H -процессами [14; 15].

Непараметрическая теория в отличие от параметрической предполагает, что известны только качественные характеристики процесса. Использование непараметрической теории позволяет полностью уйти от вопроса определения параметрической структуры объекта.

1. Рассмотрим задачу идентификации, представленную на рис. 1, где принятые обозначения: $u(t)$ – это вектор входных управляемых переменных в момент времени t ; $\mu(t)$ – вектор входных неуправляемых

переменных в момент времени t ; $x(t + \tau)$ – вектор выходных переменных в момент времени $(t + \tau)$; τ – запаздывание; $\xi(t)$ – помехи, действующие на объект; $h^u(t)$, $h^x(t)$, $h^u(t)$ – помехи в каналах связи; $u = (u_1, u_2, \dots, u_k) \in \Omega(u) \subset R^k$, $\forall u_i \in [a_i, b_i]$, а $x \in [c, d]$. При исследовании реальных процессов значения коэффициентов $\{a_i, b_i, c, d\}$, $i = (1, \dots, k)$ всегда известны.

Традиционной для описания подобных процессов является следующая модель:

$$\tilde{x}_s(t) = A_s(u(t), \mu(t), \alpha). \quad (3)$$

При стохастически зависимых входных воздействиях на объект процесс имеет «трубчатую» структуру (H -процесс).

Точка А на рис. 2 при входных значениях $u = (u_1, u_2, \dots, u_k) \in \Omega(u)$ соответствует величине выходной переменной из области $\Omega^H(u_1, u_2, x)$. Таким образом, при $u = (u_1, u_2, \dots, u_k) \in \Omega^H(u)$ объект имеет значения выхода из области $\Omega^H(u_1, u_2, x)$. Точка В – точка, которая при входных значениях $u = (u_1, u_2, \dots, u_k) \in \Omega(u)$, но не принадлежит $\Omega^H(u_1, u_2, x)$, хотя находится в пределах $\Omega(u_1, u_2, x)$. Это происходит потому, что $u = (u_1, u_2, \dots, u_k) \notin \Omega^H(u)$. Но при описанных случаях

процесс не выходит за рамки $\Omega(u_1, u_2, x)$. При анализе точки С очевидно, что $u = (u_1, u_2, \dots, u_k) \in \Omega(u)$, но $x \notin \Omega(u_1, u_2, x)$.

Особенность при работе с H -процессами заключается в следующем: при попытке построения параметрической модели для этих процессов, без учета того, что они являются «трубчатыми», будут использоваться только те точки, которые принадлежат $\Omega^H(u, x)$. В частном случае, если представить себе прямую в пространстве, то моделей такого процесса в виде плоскости может быть сколь угодно много, поскольку через прямую в пространстве можно провести бесконечное число плоскостей (рис. 3). В случае, если зависимость носит нелинейный характер, по различным исходным данным восстанавливаемых поверхностей может быть также сколь угодно много.

На рис. 4 представлены основные сложности, которые могут возникнуть при попытке прогнозирования H -процесса. Рассмотрим точку А, в которой u_1 и $u_2 \in \Omega(u)$, но u_1 и $u_2 \notin \Omega^H(u)$. С использованием H -модели прогнозы могут быть физически нереальными [16].

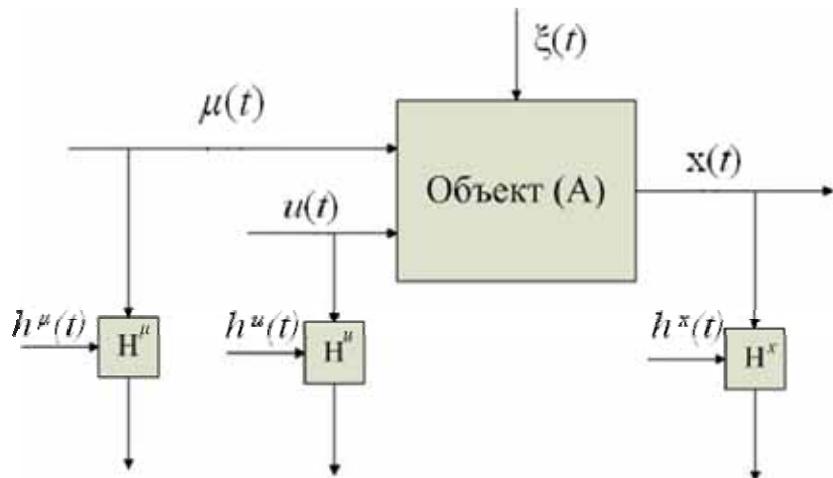


Рис. 1. Исследуемый процесс

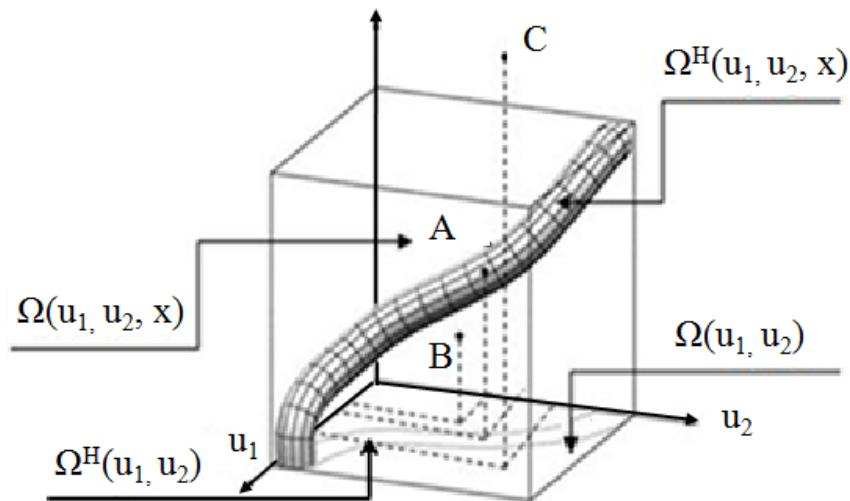


Рис. 2. «Трубчатый» процесс

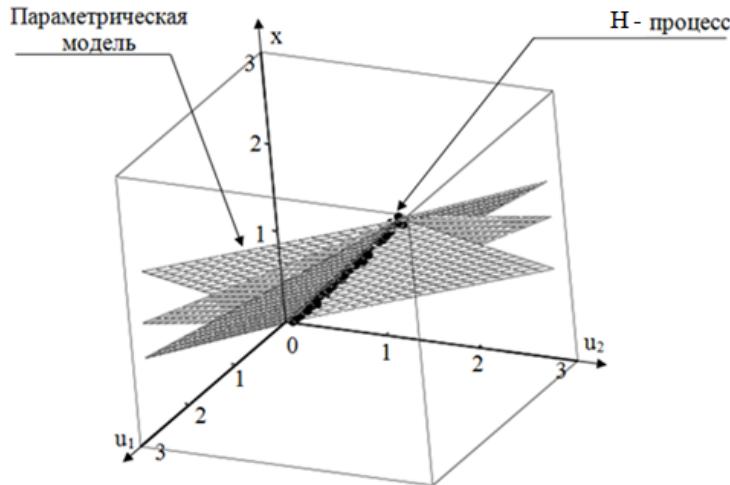


Рис. 3. Параметрические модели «трубчатых» процессов (*H*-процесс)

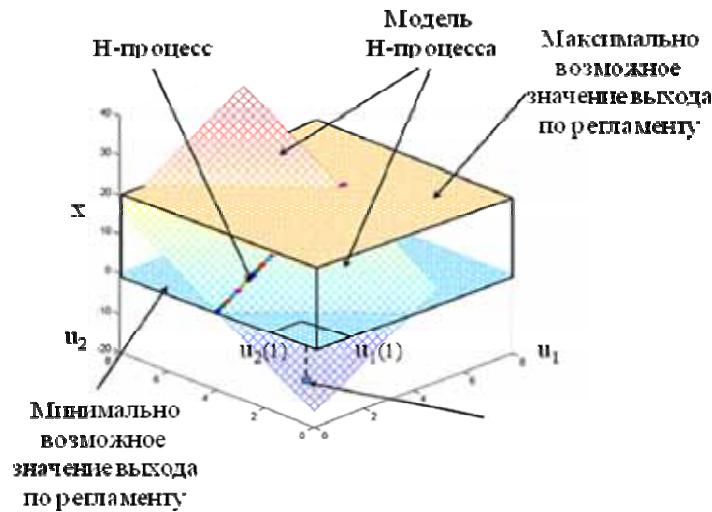


Рис. 4. Прогнозирование *H*-процессов

Для описания подобных процессов в существующую модель (3) необходимо включить индикаторную функцию $I(u(t), \mu(t))$:

$$\tilde{x}_s(t) = A_s(u(t), \mu(t), \alpha)I(u(t), \mu(t))), \quad (4)$$

где

$$I(u(t), \mu(t)) = \begin{cases} 0, & \text{если } \sum_{i=1}^s \prod_{j=1}^k \hat{O}\left(\frac{u_j - u_j^i}{c_s}\right) \times \\ & \times \prod_{j=1}^n \hat{O}\left(\frac{\mu_j - \mu_j^i}{c_s}\right) > 0, \\ 1, & \text{если } \sum_{i=1}^s \prod_{j=1}^k \hat{O}\left(\frac{u_j - u_j^i}{c_s}\right) \times \\ & \times \prod_{j=1}^n \hat{O}\left(\frac{\mu_j - \mu_j^i}{c_s}\right) \leq 0. \end{cases} \quad (5)$$

Очевидно, что если исследуемый процесс не является *H*-процессом, то индикаторная функция будет всегда иметь значение 1, и модель (4) будет иметь вид (3).

Таким образом, *H*-модель включает в себя стандартную модель идентификации, а наличие или отсутствие зависимости между входными переменными не влияет на точность построенной оценки.

Особенности обрабатываемых данных. В работе проводится моделирование экологической ситуации в г. Красноярске с использованием алгоритма ядерной аппроксимации [17]. Одним из основных параметров в данном алгоритме является вектор коэффициента размытости ядра. Точность построенной модели напрямую зависит от качества настройки данного вектора. Оптимизация вектора коэффициента размытости ядра (его настройка) выполнена при помощи алгоритма Недлера–Мидда [18; 19].

Данные об экологической обстановке в г. Красноярске получены с постов наблюдения за загрязнением атмосферы Среднесибирского УГМС, распределение которых на территории города отмечено на спутниковом снимке (рис. 5).

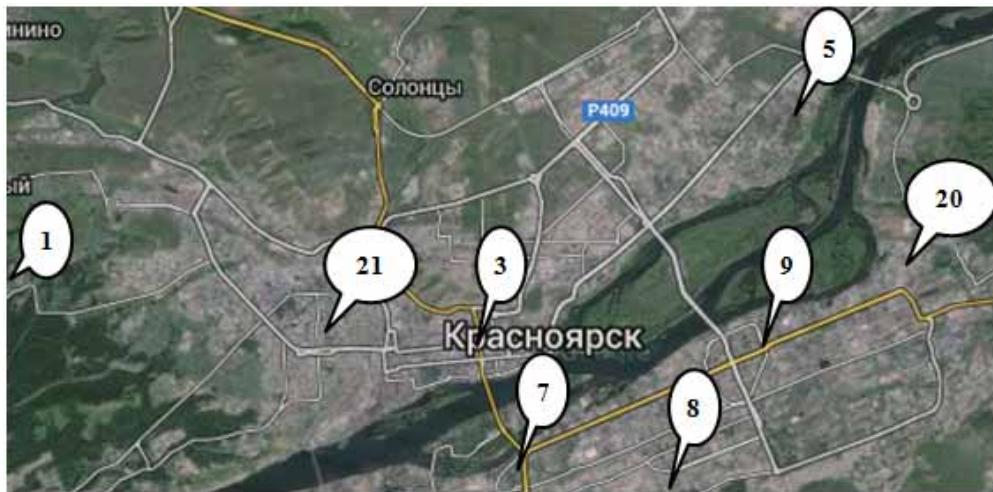


Рис. 5. Расположение постов наблюдения за загрязнением атмосферы в г. Красноярске

На постах выполняются измерения концентраций следующих веществ: SO_2 , сульфат, CO , NO_2 , NO , H_2S , CS_2 , фенол, HF , Cl_2 , HCl , NH_3 , бензол, ксиол, толуол, этилбензол. Также определяются температура и влажность воздуха, направление и скорость ветра. Отбор проб осуществляется 4 раза в сутки в установленное время: 01.00, 07.00, 13.00 и 19.00.

Данные мониторинга состояния окружающей среды, к сожалению, не всегда полны. Существуют пропуски данных как по значениям метеопараметров, так и по значениям концентраций вредных веществ. Многие посты имеют большую удаленность друг от друга (рис. 5). Увеличение частоты отбора проб не приведет к увеличению обучающей выборки (в ее стандартной интерпретации), так как измерения проводятся в одних и тех же точках.

Вследствие вышеописанной проблемы при использовании стандартного ядра многие точки будут иметь нулевой вес, что недопустимо при таком объеме выборки. Для исключения этой проблемы использовалось гауссово ядро, которое задается формулой

$$\hat{\Phi}(\delta) = (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right). \quad (6)$$

При помощи данного ядра будут определены веса таким входным параметрам, как широта и долгота. Другие входные параметры данной задачи не подвержены влиянию вышеописанной проблемы, вследствие этого для их учета будет использоваться стандартное треугольное ядро.

Таким образом, модель будет иметь следующий вид:

$$x_{s+1} = \sum_{i=1}^s x_i \hat{\Phi}_1\left(\frac{u_{1,s+1} - u_{1,i}}{c_1}\right) \cdot \hat{\Phi}_1\left(\frac{u_{2,s+1} - u_{2,i}}{c_2}\right) \cdot \hat{\Phi}_2\left(\frac{t_{s+1} - t_i}{c_3}\right), \quad (7)$$

где $u_{1,i}$ – долгота точки измерения; $u_{2,i}$ – широта точки измерения; t_i – время измерения; $i = 1..s$ – номер измерения; $\hat{\Phi}_1$ – гауссово ядро (6); $\hat{\Phi}_2$ – треугольное ядро (8):

$$\hat{\Phi}\left(\frac{t_{s+1} - t_i}{c_3}\right) = \begin{cases} 1 - \left| \frac{t_{s+1} - t_i}{c_3} \right|; & \left| \frac{t_{s+1} - t_i}{c_3} \right| < 1, \\ 0; & \left| \frac{t_{s+1} - t_i}{c_3} \right| \geq 1. \end{cases} \quad (8)$$

Направление и скорость ветра также учитываются. Изменяя коэффициенты размытости ядер c_1 и c_2 , можно менять форму «колокола», под который будут попадать точки для построения модели. Например, его можно вытянуть вдоль осей u_1 или u_2 в зависимости от скорости ветра. Направление учитывается простым поворотом координатной сетки на нужный угол, тогда координаты пунктов наблюдения пересчитываются по следующим формулам:

$$u_1' = u_1 * \cos(\theta) + u_2 * \sin(\theta), \quad (9)$$

$$u_2' = u_2 * \cos(\theta) - u_1 * \sin(\theta), \quad (10)$$

где u_1' и u_2' – координаты точек в системе координат, повернутой на угол θ .

Результаты моделирования. С помощью предложенной модели были выполнены сценарные расчеты содержания CO в атмосферном воздухе г. Красноярска. Оксид углерода наиболее часто используют в качестве прогнозируемого параметра в моделях качества воздуха в силу его химической инертности. Время нахождения в воздухе этого вещества без вступления в химические реакции достигает 5 дней. Распределение концентраций CO по территории г. Красноярска в разные периоды по результатам математического моделирования представлено на рис. 6–9.

Согласно выполненным расчетам (рис. 6, 7), наибольшие уровни загрязнения наблюдаются в центральном районе города, что объясняется наибольшей плотностью в центре города автотранспортных потоков, являющихся основным источником выбросов оксида углерода при благоприятных метеоусловиях (отсутствие температурных инверсий).

На северо-востоке города уровень загрязнения может повышаться за счет выбросов ТЭЦ и алюминиевого завода (рис. 7).

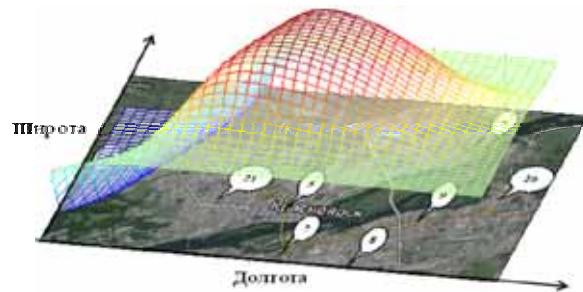


Рис. 6. Пространственное распределение СО в г. Красноярске
14.01.2004 г., 13.00 ч (расчетные данные)

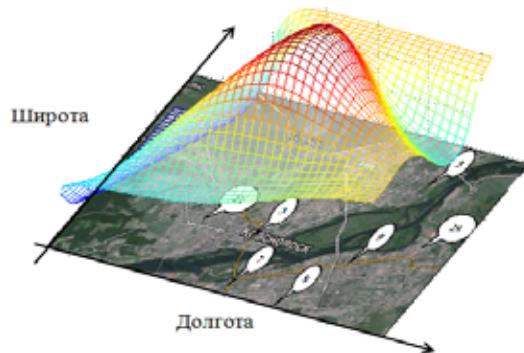


Рис. 7. Пространственное распределение СО в г. Красноярске
10.02.2004 г., 13.00 ч (расчетные данные)

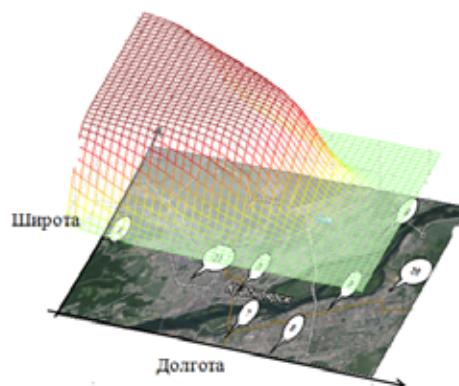


Рис. 8. Пространственное распределение СО в г. Красноярске
08.05.2004 г., 13.00 ч (расчетные данные)

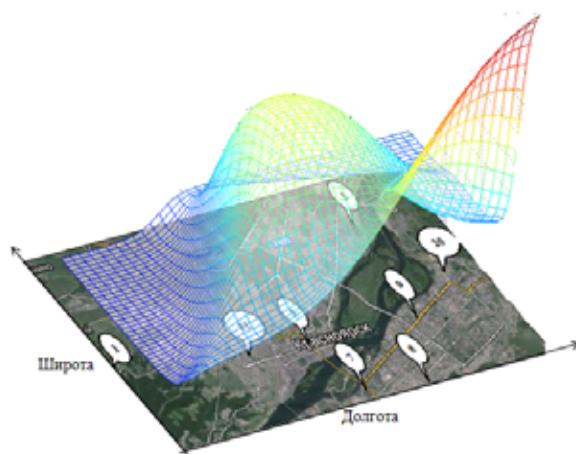


Рис. 9. Пространственное распределение СО в г. Красноярске
15.01.2004 г., 19.00 ч (расчетные данные)

На рис. 8 отражена ситуация, при которой уровень загрязнения увеличивается за счет регионального переноса.

В целом, результаты расчетов согласуются с данными натурных наблюдений.

Вследствие того, что модель является непараметрической, её построение сводится к простым вычислениям, а учитывая тот факт, что данных для расчета немного (8 точек в единицу времени), её расчет происходит менее чем за 1 с. Такая скорость моделирования позволяет использовать данный метод в режиме реального времени.

Также стоит уделить отдельное внимание возможности применения данных спутниковых систем для уточнения построенной модели экологической обстановки (в том числе скорость и направление ветрового потока, вертикальные профили температуры, интегральные характеристики влажности, характер облачности, рельеф местности). Дальнейшее усовершенствование модели возможно с применением аэроснимков и цифровых данных, получаемых в ходе дистанционного зондирования, с учетом их большой обзорности и одновременности, возможности давать интегрированное и вместе с тем генерализованное изображение всех элементов земной поверхности, что позволяет видеть их структуру и связи, возможности фиксации состояния объектов в разные моменты времени и возможность прослеживания их динамики [20]. В качестве дополнительных входных параметров может быть использована информация со спутниковых снимков в инфракрасном спектре, так как распределение температуры поверхностей имеет сильную зависимость с динамикой примесей в воздухе.

Заключение. В работе предложена модель прогноза экологической ситуации в г. Красноярске, приведены результаты моделирования пространственного распределения оксида углерода. Модель может быть использована для любых других загрязняющих веществ (при расчетах содержания химически активных веществ её необходимо дополнять блоком, учитывающим трансформации в атмосферном воздухе города). В дальнейшем возможно расширение модели, что позволит рассчитывать распространение загрязнения не только в пространстве, но и во времени и увеличит точность прогнозов.

Очевидна необходимость применения данного подхода в принятии управлений решений, регулирующих экологическую обстановку, в режиме реального времени. Наиболее актуальной по-прежнему остается задача выбора пунктов наблюдения и оптимизации программы мониторинга качества атмосферного воздуха в связи с необходимостью развития региональных сетей мониторинга, а также использования новейших технологий (в том числе применения дистанционных методов экологического мониторинга).

Библиографические ссылки

1. Максимова А. А. Мониторинг и прогноз стихийных и техногенных явлений: перспективы создания международной аэрокосмической системы // Авиапанorama. 2009. № 2. С. 11–16.
2. Яо Л. М. Социальная экология : учеб. пособие [Электронный ресурс]. Казань : Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2007. 280 с. URL: http://ekolog.org/books/9/12_1.htm (дата обращения: 14.10.2015).
3. 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.
4. Экологический мониторинг окружающей среды : учеб. пособие для вузов. В 2 т. Т. 1 / Ю. А. Комиссаров [и др.]; под ред. П. Д. Саркисова. М. : Химия, 2005. 365 с.
5. Бельская Е. Н., Тасейко О. В., Сугак Е. В. Оптимизация сети наблюдений состояния загрязнения атмосферного воздуха на городской территории // Решетневские чтения : материалы XIX Междунар. науч.-практ. конф. В 2 ч. Ч. 2. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2015. С. 308–309.
6. Антропов К. М., Казмер Ю. И., Вараксин А. Н. Описание пространственного распределения загрязнения атмосферного воздуха промышленного центра методом LandUseRegression (обзор) // Экологические системы и приборы. 2010. № 1. С. 28–41.
7. Аналитический обзор состояния и загрязнения атмосферного воздуха [Электронный ресурс]. URL: <http://krasecology.ru/Air/LabReport> (дата обращения: 14.08.2015).
8. Молодой учёный. Информационная система для моделирования распространения загрязнения атмосферного воздуха с использованием ArcGIS [Электронный ресурс]. URL: <http://www.moluch.ru/conf/tech/archive/4/895> (дата обращения: 14.07.2015).
9. Шлычков В. А. Диагноз экстремальных концентраций формальдегида в г. Томске на основе численного моделирования // Оптика атмосферы и океана. 2010. № 6. С. 493–498.
10. Кошкин Г. М., Пивен И. Г. Непараметрическая идентификация стохастических объектов PDF : монография. Хабаровск : РАН, Дальневост. отд-ние, 2009. 336 с.
11. Цыпкин Я. З. Основы теории обучающихся систем. М. : Наука, 1970. 252 с.
12. Цыпкин Я. З. Основы информационной теории идентификации. М. : Наука, 1984. 336 с.
13. Хардле В. Прикладная непараметрическая регрессия. М. : Мир, 1993. 349 с.
14. Медведев А. В. Непараметрические системы адаптации. Новосибирск : Наука, 1983. 174 с.
15. Медведев А. В. Основы теории адаптивных систем / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2015. 526 с.
16. Медведев А. В. Анализ данных в задаче идентификации // Компьютерный анализ данных моделирования. Минск : БГУ, 1995. Т. 2. С. 201–206.
17. Надарая Э. А. Непараметрическое оценивание плотности вероятностей и кривой регрессии. Тбилиси : Изд-во Тбил. ун-та, 1983. 194 с.
18. Михов Е. Д. Оптимизация коэффициента размытия ядра в непараметрическом моделировании // Вестник СибГАУ. 2015. № 2(16). С. 338–342.

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

20. Tulloch M., Li J. Applications of Satellite Remote Sensing to Urban Air-Quality Monitoring: Status and Potential Solutions to Canada // Environmental Informatics Archives. 2004. Vol. 2. P. 846–854.

References

1. Maksimova A. A. [Monitoring and forecast of the spontaneous and technogenic phenomena: prospects of creation of the international space system]. *Aviapanorama*, 2009, No. 2, P. 11–16 (In Russ.).
2. Yao L. M. *Sotsialnaya ekologiya* [Social ecology]. Kazan. 2007, 280 p. Available at: http://ekolog.org/books/9/12_1.htm. (accessed: 14.10.2015).
3. Taseiko O. V., Sugak E. V. [Representativeness of urban station for air quality monitoring]. *Sovremennye 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: 10.10.2015).
4. Komissarov Yu. A., Gordeev L. S., Edelstein Yu. D., Vent D. P. *Ekologicheskii monitoring okruzhaushei sredy* [Ecological monitoring of environment]. Vol. 1, Moscow, Khimiya Publ., 2005, 365 p. (In Russ.).
5. Belskaya E. N., Taseiko O. V., Sugak E. V. [Optimization of air pollution monitoring network in the urban area]. *Mat. XIX Mezhd. nauchno-prakt. Konferentsii "Reshetnevskie chteniya"* [Proceedings of XIX International scientific and practical conference "Reshetnevsky readings"]. In 2 parts. Krasnoyarsk, SibSAU, 2015, part 2, P. 308–309.
6. Antropov K. M., Kazmer Y. I., Varaksin A. N. [Description of spatial distribution of pollution of atmospheric air of the industrial center by the Land Use Regression method (review)]. *Ekologicheskie sistemy i pribory*, 2010, No. 1, P. 28–41 (In Russ.).
7. *Analiticheskyi obzor sostoyaniya i zagryazneniya atmosfernogo vozdukha* [Analytical review of air pollution levels]. (In Russ.). Available at: <http://krasecology.ru/Air/LabReport> (accessed: 14.08.2015).
8. *Informatsionnaya sistema dlya modelirovania rasprostranenia zagryazneniya atmosfernogo vozdukha s ispolzovaniem ArcGIS* [Young scientist. Information system for the modeling of air pollution using ArcGIS]. (In Russ.). Available at: <http://www.moluch.ru/conf/tech/archive/4/895/> (accessed: 14.08.2015).
9. Shlychkov V. A. [The diagnosis of extreme concentration of formaldehyde in Tomsk on the basis of numerical modeling]. *Optika atmosfery i okeana*, 2010, No. 6, P. 493–498 (In Russ.).
10. Koshkin G. M., Piven I. G. *Neparametricheskaya identifikatsiya stokhasticheskikh ob'ektov PDF* [Nonparametric identification of stochastic objects PDF]. Khabarovsk, RAN Dal'nevostochnoe otdelenie Publ., 2009, 336 p.
11. Zipkin Ya. *Osnovy teorii obuchauschikhsya sistem* [Bases of the theory of trained systems]. Moscow, Nauka Publ., 1970, 252 p.
12. Zipkin Ya. *Osnovi informatsionnoi teorii identifikatsii* [Bases of the information theory of identification]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 336 p.
13. Hardle V. *Prikladnaya neparametricheskaya regressiya* [Applied nonparametric regression]. Moscow, Mir Publ., 1993, 349 p.
14. Medvedev A. V. *Neparametricheskie sistemy adaptatsii* [Nonparametric systems of adaptation]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983, 174 p.
15. Medvedev A. V. *Osnovy teorii adaptivnykh sistem* [Bases of the theory of adaptive systems]. Krasnoyarsk, SibSAU, 2015, 526 p.
16. Medvedev A. V. [Analysis of the data in the problem identification]. *Komp'yuternyi analiz dannykh modelirovaniya* [Computer analysis of simulation data]. Vol. 2, Minsk, BGU, 1995, P. 201–206 (In Russ.).
17. Nadaraya E. A. *Neparametricheskoe otsenivanie plotnosti veroyatnosti i krivoi regressii*. [Nonparametric estimation of density of probabilities and curve regression]. Tbilisi, Tbil. Un-taPubl., 1983, 194 p.
18. Mikhov E. D. [Optimization of coefficient of blurring of a kernel in nonparametric modeling]. *Vestnik SibGAU*, 2015, Vol. 16, No. 2, P. 338–342 (In Russ.).
19. Prayoth Kumsawat. [A Genetic Algorithm Optimization Technique for Multiwavelet – Based Digital Audio Watermarking]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2010, Vol. 1, P. 15–25.
20. Tulloch M., Li J. Applications of Satellite Remote Sensing to Urban Air-Quality Monitoring: Status and Potential Solutions to Canada. *Environmental Informatics Archives*, 2004, Vol. 2, P. 846–854.

ВВЕДЕНИЕ ПРОСТРАНСТВА $L_{2,w}$ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ПРОЕКЦИОННОЙ ОЦЕНКИ ПЛОТНОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ

В. В. Браницти

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

Рассматривается задача восстановления неизвестной функции плотности вероятности непрерывной случайной величины по конечной независимой выборке. Исследуется построение проекционной оценки функции плотности вероятности в случае, когда квадрат функции плотности $f(x)$ не суммируется, т. е. функция $f(x)$ не принадлежит функциональному гильбертову пространству L_2 . В этом случае не выполняется условие сходимости оценки к истинной плотности даже при использовании оптимальных коэффициентов. Функции плотности вероятности, не принадлежащие L_2 , встречаются уже у модельных распределений, например, у распределения хи-квадрат с числом степеней свободы $k = 1$. Для решения этой задачи вводится функциональное пространство $L_{2,w}$, являющееся расширением пространства L_2 . Исследуются свойства вводимого пространства. Показано, что для любой положительной измеримой по Лебегу функции $w(x)$ оно также является гильбертовым. Кроме того, при расширении L_2 до $L_{2,w}$ сохраняется различимость элементов. Доказано утверждение о том, что плотность вероятности любой непрерывной случайной величины принадлежит некоторому пространству $L_{2,w}$. При этом оказалось важным установить сепарабельность вводимого пространства, так как лишь в этом случае последовательность проекционных оценок сходится к оцениваемой функции. Доказано, что любое пространство вида $L_{2,w}$, содержащее L_2 , является сепарабельным, что даёт возможность строить проекционную оценку функции плотности вероятности в этом пространстве. Установленные теоретические результаты были проверены на серии численных экспериментов. В статью включены результаты оценивания плотности вероятности случайной величины, подчинённой закону распределения хи-квадрат, а также случайной величины, у которой плотность вероятности не принадлежит L_2 и содержит две точки, в которых функция стремится к $+\infty$. Результаты расчётов позволяют сделать вывод о том, что предложенный метод может быть использован при оценивании функции плотности вероятности даже в случаях, когда она не принадлежит L_2 .

Ключевые слова: функция плотности вероятности, проекционная оценка, гильбертово пространство, сепарабельность, статистическое оценивание.

Vestnik SibGAU
Vol. 17, No. 1, P. 19–26

INTRODUCING THE $L_{2,w}$ SPACE FOR BUILDING THE PROJECTIVE ESTIMATION OF PROBABILITY DENSITY FUNCTION

V. V. Branishti

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

The task of recovering probability density function of continuous random variable from finite independent sample is considered in the paper. The author investigates the building of projective estimation of probability density function in the case when probability density $f(x)$ is not square integrable, i. e. function $f(x)$ is outside of the functional Hilbert space L_2 . In this case a convergence condition of density estimation to true density doesn't hold even with using optimal coefficients. Probability density functions, which is outside the L_2 space, occurs even in model distributions, for example, in chi-square distribution with number of freedom $k = 1$. For solving this task one introduces an $L_{2,w}$ functional space, which is expansion of the L_2 space. Properties of the introduced space are investigated in the paper. One shows that for any positive Lebesgue measurable function $w(x)$ it is also Hilbert. Moreover, discernibility of elements remains true in expansion from L_2 to $L_{2,w}$. A statement that probability density function of any continuous random variable belongs to some $L_{2,w}$ space is proved. Besides, establishing separability of the introducing space is found important, because only in this case sequence of projective estimations converges to true density. The author proved that any space of $L_{2,w}$ kind, which contains L_2 , is separable, so it is possible to build projective estimation

of probability density function in this space. Obtained theoretical results were tested on series of numerical experiments. Results are included in the paper. This paper contains the results which are about estimating of probability density function of chi-square distributed random variable and also variate which has probability density that is outside L_2 and contains two points where it converges to $+\infty$. The results let us make a conclusion that suggested method can be used in probability density function estimating even in cases when that density is outside L_2 .

Keywords: probability density function, projective estimation, Hilbert space, separability, statistical estimation.

Введение. Для решения задач классификации, распознавания, диагностики технических систем и др., возникающих в том числе в аэрокосмической отрасли, большое значение имеет качество восстановления неизвестной функции плотности вероятности непрерывных случайных величин. Зачастую закон распределения исследуемых случайных величин имеет сложную структуру: плотность вероятности разрывна, многоэкстремальна и т. д. В таких условиях часто применяются непараметрические методы оценивания функции плотности вероятности, основанные на оценках М. Розенблatta и Э. Парзена [1–3]. Также большое распространение получила проекционная оценка, предложенная Н. Н. Ченцовым [4]. Предполагается, что оцениваемая функция плотности вероятности $f(x)$ принадлежит гильбертову пространству L_2 функций, интегрируемых по Лебегу с квадратом на всей числовой прямой [5]. В этом случае функция $f(x)$ представима в виде

$$f(x) = \alpha_0 \varphi_0(x) + \alpha_1 \varphi_1(x) + \alpha_2 \varphi_2(x) + \dots \quad (1)$$

где $\{\varphi_k\}$ – полная ортонормальная система функций (базис) пространства L_2 ; коэффициенты α_k находятся по формуле:

$$\alpha_k = (f, \varphi_k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \varphi_k(x) dx .$$

Проекционная оценка $f_N(x)$ функции $f(x)$ представляет собой N -ю частичную сумму ряда (1):

$$f_N(x) = \alpha_0 \varphi_0(x) + \alpha_1 \varphi_1(x) + \dots + \alpha_N \varphi_N(x) . \quad (2)$$

Если восстанавливаемая функция $f \in L_2$, то при неограниченном увеличении N оценка (2) сходится к истинной плотности $f(x)$ в среднем квадратичном:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \|f_N - f\| = 0 .$$

В [6] указано, что если, кроме того, функция $f(x)$ является непрерывной и имеет ограниченное изменение, то оценка (2) сходится равномерно. Там же рассматривается оценка (2), в которой в качестве функций $\varphi_k(x)$ взяты многочлены Эрмита. Работа [6] была выполнена при поддержке агентства NASA.

В работах [7; 8] рассмотрены некоторые обобщения оценки (2), имеющие вид

$$\tilde{f}_N(x) = \sum_{j=0}^N \lambda_j \alpha_j \varphi_j(x) ,$$

где весовые коэффициенты λ_j выбираются из дополнительных соображений.

Однако требование $f \in L_2$ не выполняется уже для некоторых модельных законов распределения. Например, распределение χ^2 с числом степеней свободы 1 (т. е. распределение случайной величины, представ-

ляющей собой квадрат нормально распределённой случайной величины с параметрами $\mu = 0$ и $\sigma = 1$) имеет плотность вероятности [9]

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} x^{-\frac{1}{2}} e^{-\frac{x}{2}}, & x > 0, \\ 0, & \text{если } x \leq 0 . \end{cases} \quad (3)$$

При этом

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f^2(x) dx = \frac{1}{2\pi} \int_0^{+\infty} \frac{dx}{xe^x} = +\infty,$$

т. е. $f \notin L_2$, следовательно, проекционная оценка плотности вероятности не сходится к $f(x)$ в метрике пространства L_2 .

В работе предлагается построение сепарабельных гильбертовых пространств, являющихся расширениями пространства L_2 , в которых имеется возможность строить проекционные оценки функций плотности вероятности, не входящих в L_2 .

Определение и основные свойства пространства $L_{2,w}$. Пусть $w(x)$ – положительная измеримая функция. Определим пространство $L_{2,w}$ как множество действительных функций, для которых

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f^2(x) w(x) dx < +\infty . \quad (4)$$

Для любых двух функций $f, g \in L_{2,w}$ определено число

$$(f, g)_w = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) g(x) w(x) dx . \quad (5)$$

Действительно, для действительных функций $f(x)$ и $g(x)$ выполняется неравенство

$$|f(x)g(x)|w(x) \leq \frac{1}{2} (f^2(x)w(x) + g^2(x)w(x)) .$$

Поэтому из (4) следует, что интеграл в (5) принимает конечное значение. Очевидно, двухместный функционал (5) удовлетворяет аксиомам скалярного произведения. Причём условие (4) означает конечность нормы функции f , индуцированной этим скалярным произведением. Следовательно, пространство $L_{2,w}$ является гильбертовым. При $w(x) \equiv 1$ пространство $L_{2,w}$ совпадает с пространством L_2 . Подбирая различные функции $w(x)$, получим различные пространства $L_{2,w}$, причём справедливо следующее утверждение.

Утверждение 1. Если $w_1(x) \leq w_2(x)$, то

$$L_{2,w_2} \subseteq L_{2,w_1} .$$

В частности, при $w(x) \leq 1$ пространство $L_{2,w}$ включает в себя пространство L_2 .

Доказательство. Утверждение следует из того, что если для функции $f(x)$ выполнено условие

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f^2(x)w_2(x)dx < +\infty,$$

то

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f^2(x)w_1(x)dx \leq \int_{-\infty}^{+\infty} f^2(x)w_2(x)dx < +\infty.$$

Утверждение 2. Если для функций $w_1(x)$ и $w_2(x)$ существуют такие константы m и M , что

$$\forall x \in (-\infty; +\infty), \quad 0 < m \leq \frac{w_1(x)}{w_2(x)} \leq M < +\infty,$$

то пространства равны

$$L_{2,w_1} = L_{2,w_2}.$$

Доказательство. Из условия теоремы следует, что

$$w_1(x) \leq Mw_2(x), \quad w_2(x) \leq \frac{1}{m}w_1(x).$$

Тогда

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} f^2(x)w_1(x)dx &\leq \int_{-\infty}^{+\infty} f^2(x)Mw_2(x)dx = \\ &= M \int_{-\infty}^{+\infty} f^2(x)w_2(x)dx, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} f^2(x)w_2(x)dx &\leq \int_{-\infty}^{+\infty} f^2(x)\frac{1}{m}w_1(x)dx = \\ &= \frac{1}{m} \int_{-\infty}^{+\infty} f^2(x)w_1(x)dx. \end{aligned} \quad (7)$$

Из (6) следует включение $L_{2,w_2} \subseteq L_{2,w_1}$, из (7) – включение $L_{2,w_1} \subseteq L_{2,w_2}$. Утверждение доказано.

Из утверждения 2 следует, что для фактического расширения пространства (т. е. для $L_{2,w_2} \subset L_{2,w_1}$) необходимо, чтобы

$$\inf_x \frac{w_1(x)}{w_2(x)} = 0,$$

или, что то же самое,

$$\sup_x \frac{w_2(x)}{w_1(x)} = +\infty.$$

Заметим далее, что при таком расширении сохраняется различимость элементов, как показывает следующее утверждение.

Утверждение 3. Пусть $w_1(x)$ и $w_2(x)$ – две измеримые положительные функции, f – функция, принадлежащая обоим пространствам L_{2,w_1} и L_{2,w_2} . Тогда

$$\|f\|_{w_1} > 0 \Leftrightarrow \|f\|_{w_2} > 0.$$

Доказательство. Пусть, напротив, при некоторых $w_1(x)$ и $w_2(x)$ существует такая функция $f \in L_{2,w_1} \cap L_{2,w_2}$, для которой

$$\|f\|_{w_1} > 0, \quad (8)$$

но

$$\|f\|_{w_2} = 0.$$

Тогда

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f^2(x)w_2(x)dx = 0.$$

Так как подынтегральная функция неотрицательна, то отсюда следует, что она равна 0 почти всюду. Но $w_2(x)$ всюду положительна, поэтому почти всюду равна 0 функция $f^2(x)$, из чего следует, что

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f^2(x)w_1(x)dx = 0.$$

Получаем противоречие с (8), что доказывает утверждение.

Из утверждения 3 следует, в частности, что если две функции $f(x)$ и $g(x)$ принадлежат обоим пространствам L_{2,w_1} и L_{2,w_2} , то они в этих пространствах одновременно различаются или нет:

$$\|f - g\|_{w_1} > 0 \Leftrightarrow \|f - g\|_{w_2} > 0.$$

Оказывается, для любой функции плотности вероятности $f(x)$ можно построить такое расширение $L_{2,w}$ пространства L_2 , которое будет содержать функцию $f(x)$.

Утверждение 4. Пусть $f(x)$ – функция плотности вероятности некоторой непрерывной случайной величины. Тогда существует такая положительная измеримая функция $w(x)$, что выполняется включение

$$f \in L_{2,w}.$$

Доказательство. Как функция плотности вероятности, $f(x)$ интегрируема на всей числовой прямой, причём

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1.$$

Тогда существует (конечный или бесконечный) интеграл

$$I = \int_{-\infty}^{+\infty} f^2(x)dx.$$

При этом если $I < +\infty$, то $f \in L_{2,w}$ при $w(x) \equiv 1$. Если $I = +\infty$, то функцию $w(x)$ можно построить следующим образом:

$$w(x) = \begin{cases} \frac{1}{f'(x)}, & f'(x) > 1, \\ 1, & f'(x) \leq 1. \end{cases} \quad (9)$$

В силу измеримости функции $f(x)$ множества

$$X_1 = \{x \in \mathbb{R} \mid f(x) > 1\} \text{ и } X_2 = \{x \in \mathbb{R} \mid f(x) \leq 1\}$$

измеримы, поэтому измерима и построенная функция $w(x)$. Кроме того,

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} f^2(x)w(x)dx &= \int_{X_1} f^2(x)w(x)dx + \\ &+ \int_{X_2} f^2(x)w(x)dx = \int_{X_1} f(x)dx + \int_{X_2} f^2(x)dx; \end{aligned}$$

$$\int_{X_1} f(x) dx \leq \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1;$$

$$\int_{X_2} f^2(x) dx \leq \int_{X_2} f(x) dx \leq \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1.$$

Таким образом, получаем, что

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f^2(x) w(x) dx < +\infty,$$

поэтому $f \in L_{2,w}$. Утверждение доказано.

Построение функции плотности вероятности, не принадлежащей данному пространству $L_{2,w}$. Как показывает утверждение 4, для любой функции плотности вероятности $f(x)$ можно построить содержащее её гильбертово пространство $L_{2,w}$. Выбирая всё меньшие функции $w(x)$, можно получать всё более широкие пространства $L_{2,w}$. Однако не существует пространства $L_{2,w}$, которое содержало бы всё множество функций плотности вероятности любых непрерывных случайных величин. Действительно, справедливо следующее утверждение.

Утверждение 5. Пусть $w(x)$ – положительная измеримая функция. Тогда существует непрерывная случайная величина, у которой функция плотности вероятности $f(x)$ такова, что

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f^2(x) w(x) dx = +\infty.$$

Доказательство. Пусть $w(x)$ удовлетворяет условию утверждения. Тогда существует такое $\varepsilon > 0$, что множество

$$A = \{x \in \mathbb{R} \mid w(x) \geq \varepsilon\}$$

имеет положительную меру. Определим на этом множестве функцию $\phi(x)$, обладающую свойствами:

$$\int_A \phi(x) dx < +\infty, \quad \int_A \phi^2(x) dx = +\infty.$$

Заметим, что множество A может иметь весьма сложную структуру, в том числе быть нигде неплотным [10].

Так как система измеримых множеств пространства действительных чисел \mathbb{R} является σ -алгеброй, то любое множество положительной меры из этой системы можно представить в виде объединения счётного множества попарно непересекающихся его подмножеств положительной меры. В частности, для множества A имеем

$$A = \bigcup_{i=1}^{\infty} A_i, \quad \mu A_i > 0, \quad A_i \cap A_j = \emptyset \text{ при } i \neq j.$$

Ряд, составленный из мер множеств A , очевидно, сходится, причём

$$\sum_{n=1}^{\infty} \mu A_n = \mu A. \quad (10)$$

Обозначим через γ_n остаток ряда (10) после n -го члена:

$$\gamma_n = \sum_{k=n+1}^{\infty} \mu A_k.$$

Так как ряд (10) положительный, то согласно результату У. Дини [11, с. 319] ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} \mu A_n \gamma_{n-1}^{-\frac{1}{2}}$$

сходится, в то время как ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} \mu A_n \gamma_{n-1}^{-1}$$

расходится. Используя это свойство, для каждого множества A_n построим функцию

$$\varphi_n(x) = \begin{cases} -\frac{1}{2}, & x \in A_n, \\ 0, & x \notin A_n \end{cases}$$

и определим функцию $\phi(x)$ следующим образом:

$$\phi(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_n(x).$$

При этом

$$\begin{aligned} \int_A \phi(x) dx &= \sum_{n=1}^{\infty} \int_{A_n} \phi(x) dx = \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \int_{A_n} \varphi_n(x) dx = \sum_{n=1}^{\infty} \mu A_n \gamma_{n-1}^{-\frac{1}{2}} < +\infty; \\ \int_A \phi^2(x) dx &= \sum_{n=1}^{\infty} \int_{A_n} \phi^2(x) dx = \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \int_{A_n} \varphi_n^2(x) dx = \sum_{n=1}^{\infty} \mu A_n \gamma_{n-1}^{-1} = +\infty. \end{aligned}$$

Функцию $f(x)$ будем искать в виде

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\phi(x)}{k \sqrt{w(x)}}, & x \in A, \\ 0, & x \notin A, \end{cases}$$

где коэффициент k определим из условия нормировки:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = \frac{1}{k} \int_A \frac{\phi(x)}{\sqrt{w(x)}} dx = 1.$$

Заметим, что интеграл в последнем выражении сходится, так как

$$\int_A \frac{\phi(x)}{\sqrt{w(x)}} dx \leq \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \int_A \phi(x) dx < +\infty.$$

Тогда получаем

$$k = \int_A \frac{\phi(x)}{\sqrt{w(x)}} dx.$$

Таким образом, функция $f(x)$ является функцией плотности вероятности некоторой случайной величины. При этом

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} f^2(x)w(x)dx &= \frac{1}{k^2} \int_A \frac{\varphi^2(x)}{w(x)} w(x)dx = \\ &= \frac{1}{k^2} \int_A \varphi^2(x)dx = +\infty. \end{aligned}$$

Утверждение доказано.

Сепарабельность пространства $L_{2,w}$. Как показывает утверждение 5, не существует некоего универсального гильбертова пространства, пригодного для оценивания любой мыслимой функции плотности вероятности. Кроме того, при рассмотрении пространства $L_{2,w}$ очень важным является установление его сепарабельности, так как в этом случае у этого пространства гарантировано существование счётного базиса и возможность представления любого элемента пространства в виде (1). Таким образом, если функция плотности вероятности принадлежит сепарабельному пространству $L_{2,w}$, то её проекционная оценка сходится к ней. Рассмотрим следующую теорему.

Теорема. Пусть $L_2 \subseteq L_{2,w}$. Тогда пространство L_2 плотно в пространстве $L_{2,w}$.

Для доказательства этой теоремы сформулируем следующую лемму.

Лемма. Пусть $h(x)$ – измеримая функция, ортогональна пространству L_2 :

$$\forall f \in L_2 \quad (f, h) = 0.$$

Тогда $h(x)$ равна 0 почти всюду.

Доказательство. Пусть, напротив, $h(x)$ ортогональна пространству L_2 и отлична от 0 на некотором множестве A положительной меры:

$$\mu A = \mu \{x \in \mathbb{R} \mid h(x) \neq 0\} > 0.$$

Разобьём множество A на два подмножества

$$\begin{aligned} A_1 &= \{x \in \mathbb{R} \mid h(x) > 0\}, \\ A_2 &= \{x \in \mathbb{R} \mid h(x) < 0\}. \end{aligned}$$

Очевидно, что мера хотя бы одного из них положительна. Тогда из A_1 или A_2 можно выделить ограниченное подмножество положительной меры. Обозначим это подмножество через B . Очевидно, на множестве B функция $h(x)$ сохраняет знак. Определим функцию $f(x)$ следующим образом:

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x \in B, \\ 0, & x \notin B. \end{cases}$$

Функция $f(x)$ принадлежит пространству L_2 , и, кроме того,

$$(f, h) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)h(x)dx = \int_B h(x)dx \neq 0.$$

Получаем противоречие с ортогональностью функции $h(x)$ пространству L_2 . Лемма доказана.

Доказательство теоремы. Пусть, напротив, L_2 не является плотным в $L_{2,w}$. Известно, что для того, чтобы линейное многообразие M было плотным в гильбертовом пространстве H , необходимо и достаточно, чтобы в H не существовало ненулевого элемента, ортогонального всем элементам из M [12]. Отсюда следует, что в $L_{2,w}$ существует ненулевой элемент g , ортогональный пространству L_2 :

$$\forall f \in L_2 \quad (f, g)_w = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)g(x)w(x)dx = 0.$$

Из доказанной леммы применительно к $h(x) = g(x)w(x)$ следует, что функция $g(x)w(x)$ равна 0 почти всюду. Так как $w(x) > 0$, то почти всюду равна 0 функция $g(x)$, что противоречит тому, что g – ненулевой элемент пространства $L_{2,w}$. Теорема доказана.

Из доказанной теоремы следует, что пространство L_2 плотно в любом содержащем его пространстве $L_{2,w}$. Тогда из сепарабельности L_2 следует сепарабельность любого такого $L_{2,w}$. В совокупности с утверждением 4 получаем, что для любой функции плотности вероятности можно построить проекционную оценку, сходящуюся в некотором пространстве $L_{2,w}$.

Результаты численных экспериментов. Построим проекционную оценку плотности вероятности некоторых случайных величин, не принадлежащих пространству L_2 . Для этого с помощью формулы (9) построим весовую функцию $w(x)$ и для соответствующего пространства $L_{2,w}$ построим ортонормированный базис методом ортогонализации Грамма–Шмидта [13]. Коэффициенты a_k в выражении (2) оценим по формуле [14]

$$a_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_k(x_i)w(x_i). \quad (11)$$

Длину ряда N получим минимизацией значения

$$\hat{W}_N = \frac{2}{n} \sum_{k=0}^N s_{\varphi_k}^2 - \sum_{k=0}^N m_{\varphi_k}^2, \quad k = 0, \dots, N, \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} m_{\varphi_k} &= a_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_k(x_i)w(x_i), \\ s_{\varphi_k}^2 &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\varphi_k(x_i)w(x_i) - m_{\varphi_k})^2, \end{aligned}$$

которое является (с точностью до постоянного слагаемого) несмешённой оценкой функционала качества

$$Q\{\hat{f}\} = M\left\{\|\hat{f} - f\|_w^2\right\}$$

оценки плотности вероятности [15].

Пример 1. Для функции (3) плотности вероятности случайной величины, подчинённой закону распределения χ^2 , функция $w(x)$ имеет вид

$$w(x) = \begin{cases} \sqrt{2\pi x e^{-x}}, & x \in (0; 0,139), \\ 1, & \text{если } x \geq 1. \end{cases}$$

Оценку будем строить на луче $[0; +\infty)$, для чего в качестве системы линейно независимых функций возьмём последовательность

$$e^{-x}, xe^{-x}, x^2 e^{-x}, \dots, x^n e^{-x}, \dots$$

После применения процесса Грамма–Шмидта был построен базис, несколько первых элементов которого имеют вид

$$\begin{aligned} \varphi_0(x) &\approx 1,482e^{-x}, \quad \varphi_1(x) \approx (-1,611 + 2,954x)e^{-x}, \\ \varphi_2(x) &\approx (1,73 - 6,138x + 2,945x^2)e^{-x}, \quad \dots \end{aligned}$$

Оценка плотности вероятности строилась по независимой выборке случайной величины объёма $n = 300$. Оценки a_k коэффициентов, а также их оптимальные значения занесены в табл. 1.

В табл. 2 приведены значения \hat{W}_N .

Из табл. 2 видно, что минимальное значение \hat{W}_N достигается при $N = 15$. График соответствующей оценки приведён на рис. 1.

Качество оценивания при этом составляет

$$\left\| \hat{f} - f \right\|_w^2 \approx 0,045.$$

Пример 2. Рассмотрим непрерывную случайную величину, заданную следующей плотностью вероятности:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{4\sqrt{x}}, & 0 < x < 1, \\ \frac{1}{4\sqrt{x-1}}, & 1 < x < 2, \\ 0, & \text{если } x \geq 2. \end{cases} \quad (13)$$

Квадрат этой функции не суммируем в окрестности двух точек $x = 0$ и $x = 1$, следовательно, $f \notin L_2$. Построим содержащее эту функцию пространство $L_{2,w}$. Для этого введём весовую функцию

$$w(x) = \begin{cases} 4\sqrt{x}, & x \in \left(0; \frac{1}{16}\right), \\ 4\sqrt{x-1}, & x \in \left(1; \frac{17}{16}\right), \\ 1, & \text{если } x \geq \frac{17}{16}. \end{cases}$$

Построим проекционную оценку функции плотности вероятности в интервале $(0; 2)$. Для построения базиса возьмём линейно независимую систему

$$1, \cos \frac{\pi}{2}x, \cos \pi x, \dots, \cos \frac{n\pi}{2}x, \dots$$

и по независимой выборке этой случайной величины объёма $n = 300$ построим проекционную оценку плотности вероятности. Результат численного эксперимента приведён на рис. 2.

Таблица 1

**Оценки (11) коэффициентов и их оптимальные значения
при восстановлении плотности вероятности (3)**

k	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
a_k	0,633	-0,135	0,166	-0,117	0,104	-0,097	0,085	-0,066	0,051	-0,038
α_k	0,636	-0,133	0,148	-0,1	0,088	-0,075	0,067	-0,061	0,056	-0,052
k	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
a_k	0,033	-0,034	0,034	-0,031	0,028	-0,025	0,023	-0,029	-0,029	-0,03
α_k	0,048	-0,045	0,042	-0,04	0,038	-0,036	0,034	-0,043	-0,043	-0,043

Таблица 2

**Значения оценки (12) функционала качества
при восстановлении плотности вероятности (3)**

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9
\hat{W}_N	-0,416492	-0,442569	-0,455039	-0,464734	-0,473139	-0,479536	-0,483056	-0,484753	-0,485328
N	10	11	12	13	14	15	16	17	18
\hat{W}_N	-0,485565	-0,485918	-0,486332	-0,486598	-0,486696	-0,486703	-0,48666	-0,48659	-0,486517

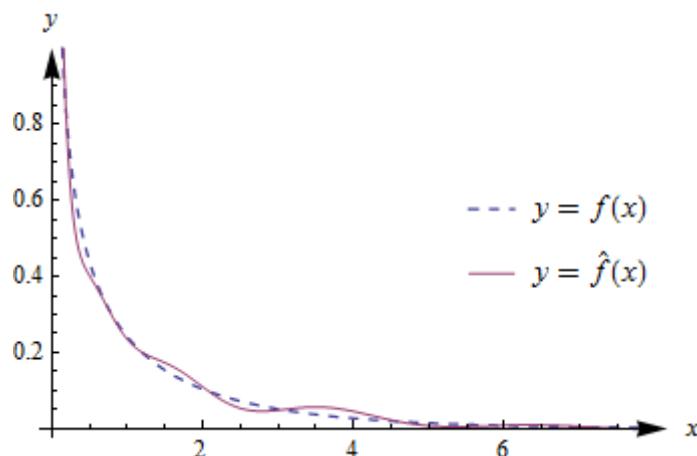


Рис. 1. Результат восстановления функции плотности вероятности случайной величины, подчинённой закону распределения χ^2 при $k = 1$

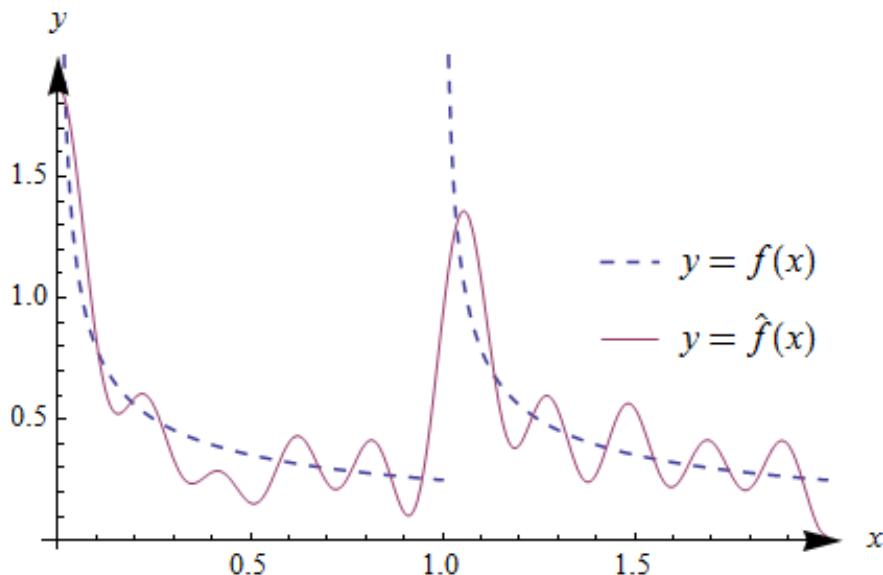


Рис. 2. Результат восстановления функции плотности вероятности случайной величины, подчинённой закону распределения (13)

Качество оценивания при этом составило

$$\|\hat{f} - f\|_w^2 \approx 0,102.$$

Наличие разрыва второго рода внутри области оценивания значительно ухудшило качество аппроксимации по сравнению с примером 1.

Заключение. Из доказанных свойств пространства $L_{2,w}$ следует, что для функции плотности вероятности любой непрерывной случайной величины можно построить проекционную оценку, сходящуюся в этом пространстве при определённом выборе весовой функции $w(x)$. Численные эксперименты подтвердили, что предложенный способ оценивания плотности вероятности может быть использован в случаях, когда квадрат оцениваемой функции $f(x)$ не суммируется, т. е. $f \notin L_2$.

Библиографические ссылки

1. Rosenblatt M. Remarks on some nonparametric estimates of a density function // The Annals of Mathematical Statistics. 1956. Vol. 27, 3. P. 832–837.
2. Parzen E. On estimation of a probability density function and mode // The Annals of Mathematical Statistics. 1962. Vol. 35, 3. P. 1065–1076.
3. Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрические модели и алгоритмы обработки информации : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2010. 220 с.
4. Ченцов Н. Н. Оценка неизвестной плотности распределения по наблюдениям // ДАН СССР. 1962. Т. 147, 1. С. 45–48.
5. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. 6-е изд. М. : Наука, 1989. 624 с.
6. Schwartz S. Estimation of probability density by an orthogonal series // The Annals of Mathematical Statistics. 1967. Vol. 38, 4. P. 1261–1265.

7. Watson G. Density estimation by orthogonal series // The Annals of Mathematical Statistics. 1967. Vol. 40, 4. P. 1496–1498.

8. Wahba G. Data-based optimal smoothing of orthogonal series density estimates // The Annals of Statistics. 1981. Vol. 9, 1. P. 146–156.

9. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика: для инженеров и научных работников. М. : Физматлит, 2006. 816 с.

10. Натансон И. П. Теория функций вещественной переменной. 3-е изд. М. : Наука, 1974. 480 с.

11. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. 8-е изд. М. : Физматлит, 2003. Т. 2. 864 с.

12. Люстерник Л. А., Соболев В. И. Элементы функционального анализа. 2-е изд. М. : Наука, 1965. 520 с.

13. Ленг С. Алгебра. М. : Мир, 1968. 564 с.

14. Новосёлов А. А. Об оптимальном выборе структуры функции плотности вероятности и регрессии : препринт. Красноярск : ВЦ СО АН СССР, 1979. 31 с.

15. Браницкий В. В. О параметрическом оценивании функции плотности вероятности // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 1. С. 13–16.

References

1. Rosenblatt M. Remarks on some nonparametric estimates of a density function. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1956, Vol. 27, No. 3, P. 832–837.
2. Parzen E. On estimation of a probability density function and mode. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1962, Vol. 35, 3, P. 1065–1076.
3. Lapko A. V., Lapko, V. A. *Neparametricheskie modeli i algoritmy obrabotki informatsii* [Nonparametric models and algorithms of information processing]. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2010, 220 p.

4. Čencov N. N. Evaluation of an unknown distribution density from observations. *Soviet Math*, 1962, Vol. 3, P. 1559–1562.
5. Kolmogorov A. N., Fomin S. V. *Elementy teorii funktsiy i funktsional'nogo analiza* [Elements of function theory and functional analysis]. 6th ed. Moscow, Nauka Publ., 1989, 624 p.
6. Schwartz S. Estimation of probability density by an orthogonal series. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1967, Vol. 38, No. 4, P. 1261–1265.
7. Watson G. Density estimation by orthogonal series. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1967, Vol. 40, No. 4, P. 1496–1498.
8. Wahba G. Data-based optimal smoothing of orthogonal series density estimates. *The Annals of Statistics*, 1981, Vol. 9, No. 1, P. 146–156.
9. Kobzar' A. I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika: Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* [Applied mathematical statistics: For engineers and scientists]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006, 816 p.
10. Natanson I. P. *Teoriya funktsiy veshchestvennoj peremennoj* [Theory of functions of real variable]. 3rd ed. Moscow, Nauka Publ., 1974, 480 p.
11. Fikhtengol'ts G. M. *Kurs differentzial'nogo i integral'nogo ischisleniya* [Course of differential and integral calculus]. 8th ed. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003, 864 p.
12. Lyusternik L. A., Sobolev V. I. *Elementy funktsional'nogo analiza* [Elements of functional analysis]. 2nd ed. Moscow, Nauka Publ., 1965, 520 p.
13. Lang S. *Algebra*. New York, Springer, 2005, 917 p.
14. Novoselov A. A. *Ob optimal'nom vybere struktury funktsii plotnosti veroyatnosti i regressii* [On optimal choice of structure of probability density function and regression]. Krasnoyarsk, Computation Center of Siberian Department of USSR Academy of Sciences Publ., 1979, 31 p.
15. Branishti V. V. [On parametric estimation of probability density function]. *Nauchno-tehnicheskiy vestnik Povolzh'ya*, 2014, No. 1, P. 13–16 (In Russ.).

© Браницти В. В., 2016

**MULTI-OBJECTIVE GENETIC ALGORITHMS AS AN EFFECTIVE TOOL
FOR FEATURE SELECTION IN THE SPEECH-BASED EMOTION RECOGNITION PROBLEM**

Ch. Yu. Brester^{1*}, O. E. Semenkina¹, M. Yu. Sidorov²

¹Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
²Ulm University
43, Albert-Einstein-Allee, Ulm, 89081, Germany
*E-mail: christina.brester@gmail.com

Feature selection is a quite important step in data analysis. Extracting relevant attributes may not only decrease the dimensionality of the dataset and, consequently, reduce time costs spent on the next stages, but also contribute to the quality of the final solution. In this paper we demonstrate some positive effects of the usage of a heuristic feature selection scheme which is based on a two-criterion optimization model. The approach proposed is applied to the speech-based emotion recognition problem, which is currently one of the most important issues in human-machine interactions. A number of high-dimensional multilingual (English, German, Japanese) databases are involved to investigate the effectiveness of the technique presented. Three different multi-objective genetic algorithms and their cooperative modifications are applied as optimizers in combination with classification models such as a Multilayer Perceptron, a Support Vector Machine and Logistic Regression. In most cases we may observe not only a dimensionality reduction, but also an improvement in the recognition quality. To avoid choosing the most effective multi-objective genetic algorithm and the best classifier, we suggest applying a heterogeneous genetic algorithm based on several heuristics and an ensemble of diverse classification models.

Keywords: feature selection, multi-objective genetic algorithm, island model, speech-based emotion recognition.

Вестник СибГАУ
Том 17, № 1. С. 27–35

**ГЕНЕТИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ
КАК ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ОТБОРА ПРИЗНАКОВ
В ЗАДАЧЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ЭМОЦИЙ ПО РЕЧИ**

К. Ю. Брестер^{1*}, О. Э. Семенкина¹, М. Ю. Сидоров²

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

²Ульмский университет
Германия, 89081, г. Ульм, аллея им. Альберта Эйнштейна, 43
*E-mail: christina.brester@gmail.com

Отбор информативных признаков является одним из важных этапов анализа данных. Извлечение релевантных атрибутов может не только снизить размерность набора данных, а следовательно, сократить временные затраты на последующих стадиях, но и улучшить качество финального решения. Демонстрируются положительные эффекты использования эвристической схемы отбора информативных признаков, основанной на двухкритериальной оптимизационной модели. Предлагаемый подход применяется к задаче распознавания эмоций человека по речи, что в настоящее время является одним из ключевых вопросов в сфере человеко-машинных коммуникаций. Для исследования эффективности представленной технологии были привлечены базы данных высокой размерности: они содержат акустические характеристики голосовых записей на английском, немецком и японском языках. Три различных генетических алгоритма многоокритериальной оптимизации и их кооперативные модификации были использованы в сочетании с рядом классификаторов (полносвязный перцептрон, машины опорных векторов, логистическая регрессия). В большинстве случаев можно обнаружить не только сокращение размерности вектора признаков, но и улучшение качества распознавания эмоций. Чтобы избежать выбора наиболее эффективного генетического алгоритма и классификатора, предлагается использовать гетерогенный кооперативный алгоритм, сочетающий несколько эвристик, и ансамбль классификаторов различной природы.

Ключевые слова: отбор признаков, генетический алгоритм многоокритериальной оптимизации, островная модель, распознавание эмоций по речи.

Introduction. Nowadays due to the tremendous capacity of data storage it has become possible to collect a huge amount of information. But the crucial question which needs to be answered by researchers is how to use all this data in an effective way? In the international scientific community there are plenty of discussions about proper solutions. Generally, two common directions might be distinguished. The first way is extensive, which implies a constant increase in computer power and the usage of as much data as possible. The second one is intensive, which is based on the subtle methodology of choosing the most relevant data such as instance or feature selection. From our perspective, the intensive approach seems to be more preferable because it refers to the thorough pre-processing of the source data which is considered to be an essential stage before the application of any mathematical model.

In this paper we discuss one of the possible approaches for selecting informative attributes from datasets in the framework of classification problems. We propose a heuristic feature selection scheme based on a two-criterion optimization model as an alternative to conventional methods (Principal Component Analysis (PCA) or Factor Analysis). Various multi-objective genetic algorithms (MOGAs) and their modifications are used as optimizers; a Multilayer Perceptron, a Support Vector Machine and Logistic Regression are involved as classification models.

In the human-machine communication sphere lots of high-dimensional feature sets are gathered too. Speech records are now used to train machines to reveal the speaker state: there is a wide spectrum of different classification problems such as gender, age or emotion recognition. However, the number of acoustic characteristics which might be extracted from the speech signal varies from several hundred to thousands. Therefore, it is necessary to select a subsystem of informative features related to each problem. And in this study we investigate the effectiveness of the approach proposed on the emotion recognition problem using a set of multilingual corpora (English, German, and Japanese).

The rest of the paper is organized as follows: the next section contains a brief description of the approach proposed. Then, some details of MOGAs and their modifications are presented. Further, we introduce the speech-based emotion recognition problem and the corpora used. Next, we continue with the experiments conducted and the results obtained. The conclusion includes some inferences and future plans.

Heuristic feature selection. Previously, it was demonstrated [1] that for the speech-based emotion recognition problem selecting informative features with the conventional PCA led to a tremendous decrease in the classifier performance. Therefore, based on the experimental results [2], we highlight the necessity of developing some effective alternative methods.

In recent times there has been a growing interest in the sphere of *Evolutionary Machine Learning*. The integration of an evolutionary search into the machine learning field allows researchers to develop more universal algorithmic schemes which might be applied for high-dimensional problems with different types of variables in the dynamic environment. Taking into account these posi-

tive effects, we decided to engage genetic algorithms (GAs) in the feature selection procedure.

Firstly, a two-criterion optimization model was designed based on the feature selection scheme called *filter* [3]. This approach is referred to the pre-processing stage because it uses information extracted from datasets and reduces the number of attributes, taking into consideration such measures as consistency, dependency and distance. Possible criteria which characterize the dataset relevance are *Attribute Class Correlation*, *Inter- and Intra-Class Distances*, *Laplacian Score*, *Representation Entropy* and the *Inconsistent Example Pair measure* [4]. We should also emphasize that in the framework of this approach the information about classifier performance and a learning algorithm is ignored totally, therefore, feature selection procedures based on the filter scheme might be effectively used in combination with an ensemble of diverse classifiers, which is quite reasonable in such a case when we do not know one particular reliable and effective model.

The two-criterion model, which we propose using, contains the *Intra-class distance (IA)* and the *Inter-class distance (IE)* as optimized criteria:

$$IA = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^k n_r d(p_j^r, p_r) \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$IE = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^k n_r d(p_r, p) \rightarrow \max, \quad (2)$$

where p_j^r is the j -th example from the r -th class; p is the central example of the dataset; $d(\dots, \dots)$ denotes the Euclidian distance; p_r and n_r represent the central example and the number of examples in the r -th class.

To define possible solutions, we suggest applying a MOGA which operates with binary strings, where *unit* and *zero* correspond to a relevant attribute and an irrelevant one respectively. In contrast to one-criterion GAs, the outcome of MOGAs is a set of non-dominated points which form the Pareto set approximation. Non-dominated candidate-solutions cannot be preferred to each other and, taking into account this fact, we propose a way to derive the final solution based on all the points from the Pareto set (fig. 1).

In the experiments the sample should be divided into the training and test parts. It is assumed that the outcome of a MOGA, which is executed on the training examples, is N binary strings (the set of non-dominated solutions). Each chromosome should be decoded into reduced databases (training and test parts), according to the rule: if a gene is equal to '0' then eliminate the corresponding attribute, and if a gene is equal to '1' then include the respective feature in the reduced database. In short, we obtain N different sets of features and train N various classifiers based on this data. For each test example the engaged models vote for different classes according to their own predictions. The final decision is defined as a collective choice based on the majority rule.

Taking into consideration the predictions of several classifiers is a good alternative to choosing one particular solution from the set of non-dominated points. In fact, candidates, which demonstrate high effectiveness on the training data, might often be the worst on the test data. Therefore, to avoid such cases, we use the scheme described.

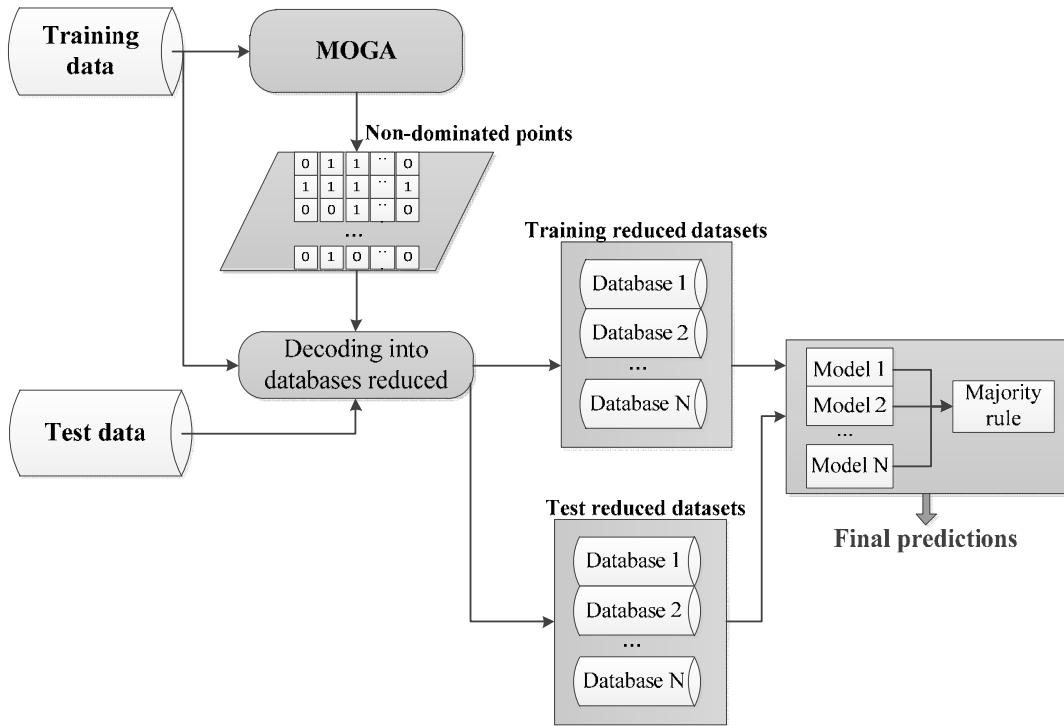


Fig. 1. The general scheme of the approach proposed

In most cases the quality of the final solution, found with a MOGA, depends on the algorithm settings. For the problem considered the effectiveness of different heuristics might vary significantly. Therefore, in this study we apply a number of MOGAs which are based on diverse heuristic mechanisms. Moreover, we are also trying to improve the performance of conventional MOGAs by implementing their cooperative modifications. The next section provides a concise description of the algorithms used.

Multi-objective genetic algorithms and their cooperative modifications. The common scheme of any MOGA includes the same steps as any conventional one-criterion GA:

```

Generate the initial population
Evaluate criteria values
While (stop-criterion!=true), do:
  {Estimate fitness-values;
  Choose the most appropriate individuals with
  the mating selection operator based on their
  fitness-values;
  Produce new candidate solutions with
  recombination;
  Modify the obtained individuals with mutation;
  Evaluate criteria values for new candidate
  solutions;
  Compose the new population (environmental
  selection);
}
  
```

Designing a MOGA, researchers are faced with some issues which are related to fitness assignment strategies, diversity preservation techniques and ways of elitism implementation. Therefore, in this paper we investigate the effectiveness of MOGAs, which are based on various heuristics, from the perspective of the feature selection procedure. *Non-Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)* [5], *Preference-Inspired Co-Evolutionary Algorithm with goal vectors (PICEA-g)* [6] and *Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2 (SPEA2)* [7] are used as tools to optimize the introduced criteria (1), (2). In tab. 1 there are the basic features of each method.

However, it is almost impossible to know in advance which algorithm is the most effective for the current problem. On the one hand, a series of experiments might be conducted to find the best MOGA, which is quite a time-consuming way. On the other hand, different algorithms might be combined in a cooperation to avoid the choice of the most effective one. Actually, this kind of modification is easily implemented based on an island model.

The *island model* [8] of a GA implies the parallel work of several algorithms: they might be the same or different. The initial number of individuals M is spread across L subpopulations: $M_i = M/L$, $i = 1, \dots, L$. At each T -th generation algorithms exchange the best solutions (*migration*). There are two parameters: *migration size*, the number of candidates for migration, and *migration interval*, the number of generations between migrations. It is also necessary to define the island model topology, in other words, the scheme of migration. We use the fully connected topology that means each island shares its best solutions with all other islands included in the model. This multi-agent model is expected to preserve a higher level of genetic diversity.

Table 1

Basic features of the MOGA used

MOGA	Fitness Assignment	Diversity Preservation	Elitism
NSGA-II	Pareto-dominance (<i>niching mechanism</i>) and diversity estimation (<i>crowding distance</i>)	Crowding distance	Combination of the previous population and the offspring
PICEA-g	Pareto-dominance (<i>with generating goal vectors</i>)	Nearest neighbour technique	The archive set and combination of the previous population and the offspring
SPEA2	Pareto-dominance (<i>niching mechanism</i>) and density estimation (<i>the distance to the k-th nearest neighbour in the objective space</i>)	Nearest neighbour technique	The archive set

Firstly, conventional NSGA-II, PICEA-g, and SPEA2 have been implemented to be used as optimizers in the feature selection procedure.

Secondly, we have achieved a number of *homogeneous* cooperative algorithms: in each case the island model has the same three components: they are NSGA-II, PICEA-g or SPEA2. In addition to diversity preservation, another benefit of this model is the possibility to reduce the computational time due to the parallel work of islands.

Finally, a *heterogeneous* cooperative algorithm has been developed. Three different MOGAs (NSGA-II, PICEA-g and SPEA2) have been included in this model as its components at once. The benefits of the particular algorithm (NSGA-II, PICEA-g or SPEA2) could be advantageous at different stages of optimization [9].

To sum up, there are three main categories of MOGAs which are used in this study and they are portrayed in fig. 2.

Speech-based emotion recognition and corpora description. One of the obvious ways to improve the intellectual abilities of spoken dialogue systems is related to their personalization. While communicating, machines should perceive the qualities of the user (as people usually do) such as age, gender and emotions to adapt their answers for the particular speaker.

In this paper we consider one particular aspect of the personalization process that is *speech-based emotion recognition*. Generally, any approach used to solve this recognition problem consists of three main stages.

At first, it is necessary to extract acoustic characteristics from the collected utterances. At the “INTERSPEECH 2009 Emotion Challenge” an appropriate set of acoustic characteristics representing any speech signals was introduced. This set of features includes attributes such as power, mean, root mean square, jitter, shimmer, 12 MFCCs and 5 formants. The mean, minimum, maximum, range and deviation of the following features are also used: pitch, intensity and harmonicity. The number of characteristics is 384. To get the conventional feature set introduced at INTERSPEECH 2009, the Praat [10] or OpenSMILE [11] systems might be used. Secondly, all extracted attributes or the most relevant of them should be involved in the supervised learning process to adjust a classifier. At the final stage, the signal that has to be analysed is transformed into an unlabelled feature vector (also with the usage of the Praat or OpenSMILE systems) and then the trained classification model receives it as the input data to make a prediction.

In the study a number of multilingual speech databases have been used and here we provide their brief description.

The *Emo-DB* emotional database (German) [12] was recorded at the Technical University of Berlin and consists of labelled emotional German utterances which were spoken by 10 actors (5 female). Each utterance has one of the following emotional labels: neutral, anger, fear, joy, sadness, boredom or disgust.

The *SAVEE* (Surrey Audio-Visual Expressed Emotion) corpus (English) [13] was recorded as a part of an investigation into audio-visual emotion classification from four native English male speakers. The emotional label for each utterance is one of the standard set of emotions (anger, disgust, fear, happiness, sadness, surprise and neutral).

The *UUDB* (The Utsunomiya University Spoken Dialogue Database for Paralinguistic Information Studies) database (Japanese) [14] consists of spontaneous Japanese human-human speech. The task-oriented dialogue produced by seven pairs of speakers (12 female) resulted in 4.737 utterances in total. Emotional labels for each utterance were created by three annotators on a five-dimensional emotional basis (interest, credibility, dominance, arousal and pleasantness). For this work, only the pleasantness and arousal axes are used. The corresponding quadrant (anticlockwise, starting in the positive quadrant, and assuming arousal as abscissa) can also be assigned emotional labels: happy-exciting, angry-anxious, sad-bored and relaxed-serene.

There is a statistical description of the used corpora in tab. 2.

Performance assessment. The effectiveness of the proposed feature selection technique was estimated in combination with three classification models [15]:

1. Support Vector Machine (SMO). To design a hyperplane separating sets of examples Sequential Minimal Optimization (SMO) is used for solving the large scale quadratic programming problem.

2. Multilayer Perceptron (MLP). A feedforward neural network with one hidden layer is trained with the error backpropagation algorithm (BP).

3. Linear Logistic Regression (Logit). This linear model describes the relationship between labels and independent variables using probability scores.

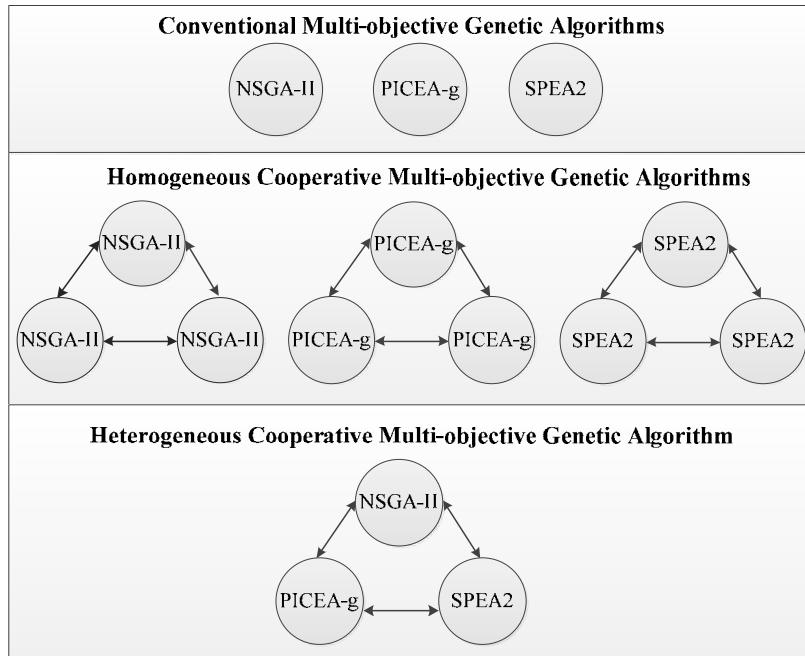


Fig. 2. The three categories of algorithms used

Table 2

Statistical description of the used corpora

Database	Language	Full length (min)	Number of emotions	File level duration		Notes
				Mean (sec)	Std. (sec)	
Emo-DB	German	24.7	7	2.7	1.02	Acted
SAVEE	English	30.7	7	3.8	1.07	Acted
UUDB	Japanese	113.4	4	1.4	1.7	Non-acted

In all experiments the F -score metric [16] was assessed to compare the quality of classification (the more effective the classifier used, the higher F -score value obtained). To derive more statistically significant results, the 6-fold cross-validation procedure was implemented for each database.

Firstly, all these classifiers were applied without any feature selection procedure at all. We obtained their predictions separately to assess the F -score value for each model. Then these classifiers were included in the ensemble of models and the final prediction was formed based on the majority rule.

Secondly, conventional MOGAs were engaged for feature selection. All algorithms were provided with the same amount of resources (90 generations and 150 individuals in populations). For each MOGA the following settings were defined: binary tournament selection, uniform recombination and the mutation probability $p_m = 1/n$, where n is the length of the chromosome. In the final set of non-dominated points we had 30 binary strings. After the feature selection stage all of the classifiers mentioned above and their ensembles were applied.

In this paper we do not compare the proposed feature selection technique with some conventional methods because the main purpose is to accomplish the thorough investigation of MOGAs and their cooperative modifications as optimizers in the framework of the discussed approach. Some results related to the comparison with a number of conventional feature selection techniques might be found in [2].

Then, in the next experiments we used cooperative modifications of MOGAs to select informative features. We applied three homogeneous algorithms (NSGA-II – NSGA-II – NSGA-II; PICEA-g – PICEA-g – PICEA-g; SPEA2 – SPEA2 – SPEA2) and the heterogeneous one (NSGA-II – PICEA-g – SPEA2). For each MOGA all islands had an equal amount of resources (90 generations and $150/3 = 50$ individuals in populations), the migration size was equal to 10 (in total each island got 20 points from two others), and the migration interval was equal to 10 generations. The genetic operators were the same as in the previous experiment.

The results obtained are presented below in the diagrams (fig. 3–5).

Firstly, these diagrams demonstrate that on full datasets the most effective classifiers for EMO-DB, SAVEE and UUDB are not the same (when they are applied separately). Moreover, we may find that the ensemble of classifiers (SMO, MLP, and LOGIT) outperforms any of these models for all of the corpora. Therefore, the problem of choosing the most effective model might be solved with the application of classifier ensembles.

Predominantly for EMO-DB and SAVEE the usage of MOGAs for selecting informative features leads to an improvement in F -score values. For UUDB in some cases we may observe a minor decrease in this metric, but it is not statistically significant (a t-test with a significance level $p = 0.05$).

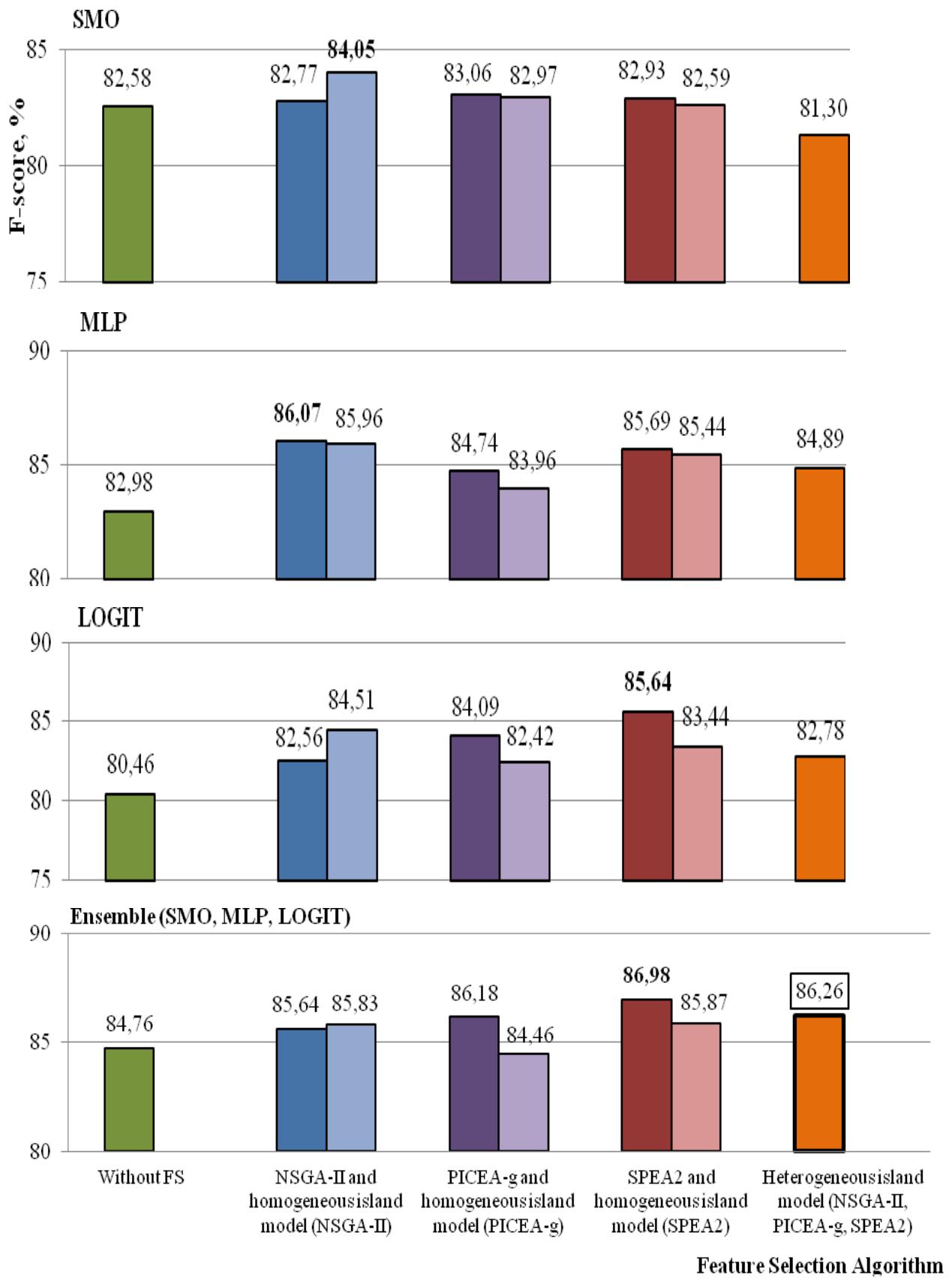


Fig. 3. The experimental results for the EMO-DB database

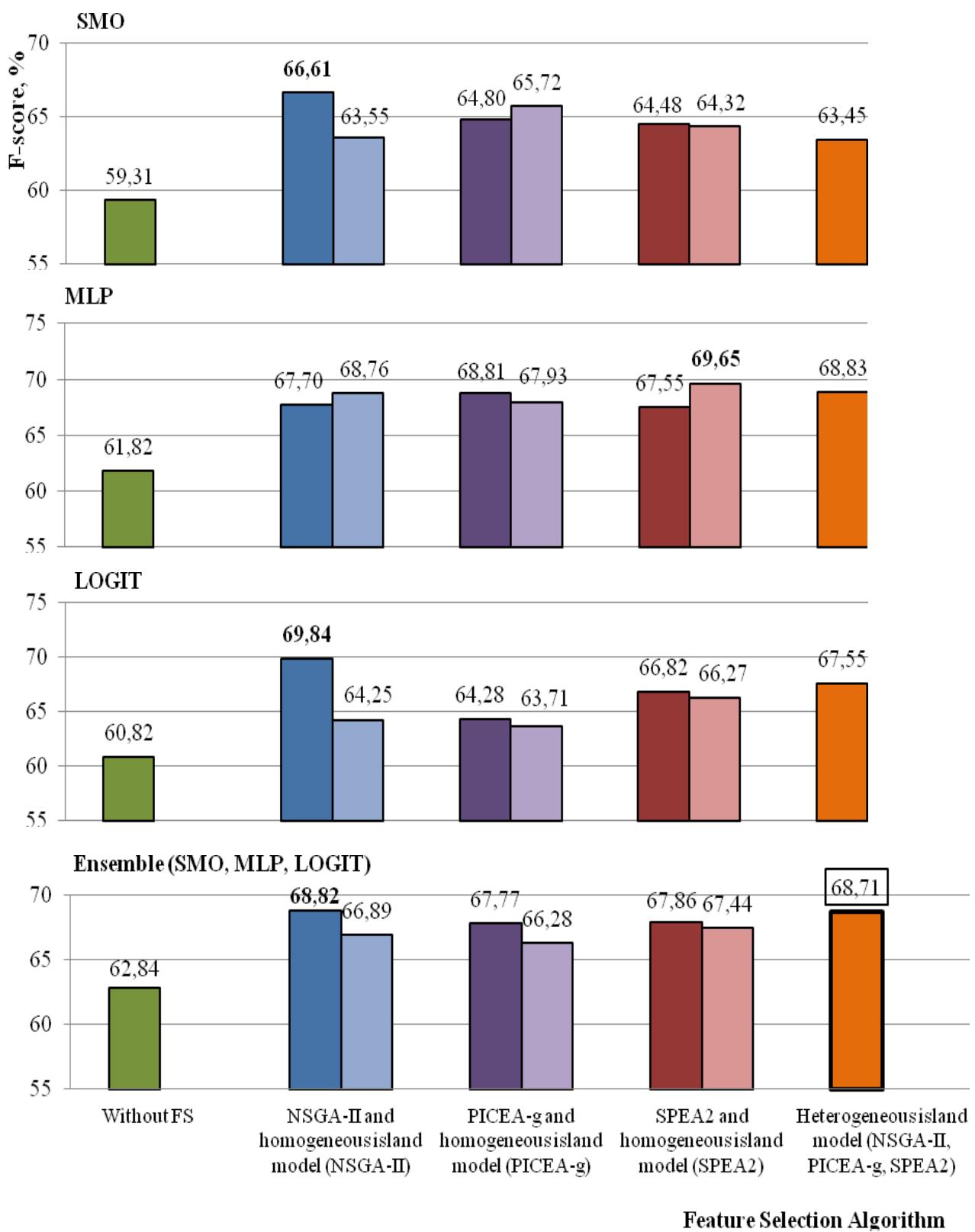


Fig. 4. The experimental results for the SAVEE database

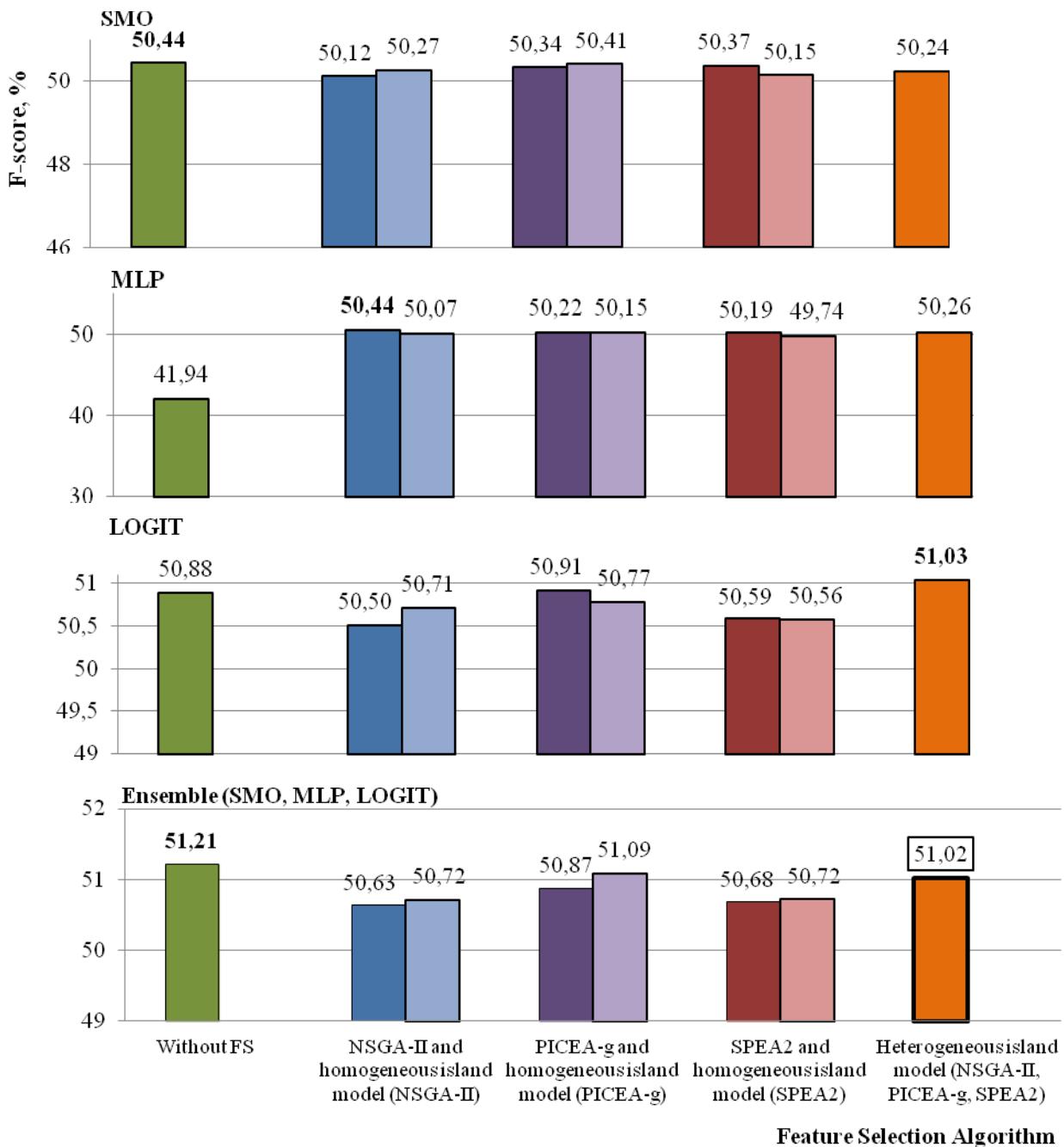


Fig. 5. The experimental results for the UUDB database

Talking about various categories of MOGAs (conventional, homogeneous and heterogeneous), we may note:

- for different corpora various combinations of classifiers (SMO, MLP, LOGIT) and conventional MOGAs are the best;

- the homogeneous modification of a MOGA often demonstrates worse results in terms of *F*-score in comparison with the same conventional MOGA. However, due to the parallel structure, these algorithms require less time spent on their execution. On average, for all of the corpora time costs for feature selection are decreased roughly by a factor of 2.55 (the additional time is spent on the migration process);

- the heterogeneous MOGA might be effectively used in combination with the ensemble of classifiers,

which allows us to avoid the choice of the most effective MOGA and the best classification model for the problem considered. For each corpus we compared the *F*-score value achieved by the heterogeneous MOGA and the ensemble of classifiers with the best value of this metric obtained with any MOGA and any classifier. As a result, we revealed that this difference is not significant statistically (a t-test with a significance level $p = 0.05$).

Generally, for diverse MOGAs the average number of selected features in the reduced databases varies: for EMO-DB from 159.5 to 180.9, for SAVEE from 162.0 to 186.1, for UUDB from 139.1 to 167.5 (initially there are 384 features).

Conclusion. Based on the results obtained, we may conclude that the proposed feature selection technique is

an effective alternative to the conventional PCA because in most cases the application of any MOGA leads to an improvement in the classifier performance and a significant dimensionality reduction.

We investigated the effectiveness of different MOGAs and their modifications in the framework of the approach presented and found that it was reasonable to use the heterogeneous MOGA and the ensemble of classifiers to eliminate the choice of the most effective heuristic algorithm and the best model without detriment to the classification quality.

In comparison with conventional MOGAs, homogeneous modifications are often preferable only in the sense of time costs, whereas the heterogeneous one shows high F-score values, especially in combination with the ensemble of classifiers.

Finally, the promising results prove that the proposed algorithmic scheme might be applied to solve some other problems related to the speech-based recognition of human qualities such as gender or speaker identification.

References

1. Brester C., Semenkin E., Sidorov M., Kovalev I., Zelenkov P. Evolutionary feature selection for emotion recognition in multilingual speech analysis. *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC2015)*, Sendai, Japan, 2015, p. 2406–2411.
2. Sidorov M., Brester Ch., Schmitt A. Contemporary stochastic feature selection algorithms for speech-based emotion recognition. *Proceedings of INTERSPEECH 2015*, Dresden, Germany, *in press*.
3. Kohavi R., John G. H. Wrappers for feature subset selection. *Artificial Intelligence*, 97, 1997, p. 273–324.
4. Venkatadri M., Srinivasa Rao K. A multiobjective genetic algorithm for feature selection in data mining. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, vol. 1, no. 5, 2010, p. 443–448.
5. Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 6 (2), 2002, p. 182–197.
6. Wang R. Preference-inspired co-evolutionary algorithms. A thesis submitted in partial fulfillment for the degree of the Doctor of Philosophy, University of Sheffield, 2013, p. 231.
7. Zitzler E., Laumanns M., Thiele L. SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm for Multiobjective Optimization. *Evolutionary Methods for Design Optimisation and Control with Application to Industrial Problems EUROGEN 2001*, 3242 (103), 2002, p. 95–100.
8. Whitley D., Rana S., and Heckendorn R. Island model genetic algorithms and linearly separable problems. *Proceedings of AISB Workshop on Evolutionary Computation*, Manchester, UK. Springer, Vol. 1305 of LNCS, 1997, P. 109–125.
9. Brester Ch., Semenkin E. Cooperative Multi-objective Genetic Algorithm with Parallel Implementation. *Advances in Swarm and Computational Intelligence*, LNCS 9140, 2015, p. 471–478.
10. Boersma P. Praat, a system for doing phonetics by computer. *Glot international*, Vol. 5, No. 9/10, 2002, P. 341–345.
11. Eyben F., Wöllmer M., and Schuller B. Open-smile: the munich versatile and fast opensource audio feature extractor. *Proceedings of the international conference on Multimedia*, 2010. ACM, P. 1459–1462.
12. Burkhardt F., Paeschke A., Rolfs M., Sendlmeier W. F., and Weiss B. A database of German emotional speech. *In Interspeech*, 2005, P. 1517–1520.
13. Haq S., Jackson P. Machine Audition: Principles, Algorithms and Systems. *Chapter Multimodal Emotion Recognition*, IGI Global, Hershey PA, Aug. 2010, P. 398–423.
14. Mori H., Satake T., Nakamura M., and Kasuya H. Constructing a spoken dialogue corpus for studying paralinguistic information in expressive conversation and analyzing its statistical/acoustic characteristics. *Speech Communication*, 53, 2011, P. 36–50.
15. Hall M., Frank E., Holmes G., Pfahringer B., Reutemann P., Witten I. H. The WEKA Data Mining Software: An Update. *SIGKDD Explorations*, Vol. 11, Iss. 1, 2009, P. 10–18.
16. Goutte C., Gaussier E. A probabilistic interpretation of precision, recall and F-score, with implication for evaluation. *ECIR'05 Proceedings of the 27th European conference on Advances in Information Retrieval Research*, 2005, P. 345–359.

**ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ В РЕШЕНИИ
ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ ЛЕСНОЙ РЕКУЛЬТИВАЦИИ
НА УГОЛЬНЫХ КАРЬЕРАХ СИБИРИ**

И. В. Зеньков

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука»
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, просп. Мира, 53
E-mail: zenkoviv@mail.ru

На территории Красноярского края и Иркутской области в России производится добыча угля открытым способом. В этих регионах на значительной площади действуют 13 крупных угольных карьеров. Открытые горные работы наносят значительный урон окружающей природной среде. Восстановление экологии в местах добычи угля производят путем производства работ по рекультивации нарушенных земель. Проводить контроль за изменением состояния природных ландшафтов в местах добычи угля можно достаточно эффективно с использованием средств дистанционного зондирования Земли. По результатам дистанционного зондирования установлены долговременные тренды в трансформации локальных экосистем на отработанных участках Ирши-Бородинского и Азейского угольных месторождений. Полученные результаты говорят о том, что искусственные лесопосадки в ходе лесной рекультивации постепенно переходят в категорию смешанного леса, в формировании которого принимают участие береза, тальник и др. Представлены результаты лесной рекультивации на породных отвалах, образованных при отработке Ирши-Бородинского и Азейского буроугольных месторождений. На идеально спланированных поверхностях породных отвалов происходит образование оврагов, которые при расширении их размеров частично уничтожают результаты работ по лесной рекультивации. С использованием результатов дистанционного зондирования исследованы водосборные площади образованных действующих оврагов, а также установлены наиболее встречающиеся геометрические формы оврагов в плане. В целом результаты дистанционного зондирования и полевых исследований говорят о том, что ситуация с лесной рекультивацией в исследуемых районах в целом благоприятная и является сбалансированной в плане формирования лесных экосистем на отработанных территориях угольных месторождений. Вместе с тем в ходе горно-экологического мониторинга отмечена неблагоприятная ситуация, связанная с воздействием водной эрозии на рельеф участков с лесонасаждениями, что в итоге приводит к образованию овражно-балочных систем с постоянно расширяющимися размерами.

Ключевые слова: открытые горные работы, породные отвалы, лесная рекультивация, дистанционное зондирование Земли, экологические показатели, угольные разрезы, формирование оврагов.

Vestnik SibGAU
Vol. 17, No. 1, P. 36–44

**REMOTE SENSING IN THE DECISION OF ENVIRONMENTAL PROBLEMS
OF FOREST REMEDIATION AT COAL STRIP MINES IN SIBERIA**

I. V. Zenkov

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
Special Designing and Technological Bureau “Nauka”
53, Mira Av., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation
E-mail: zenkoviv@mail.ru

On the territory of Krasnoyarsk region and Irkutsk region in Russia the extraction of coal by opencast methods is produced. In these regions there are 13 large coal pits. Open-pit mining causes significant damage to the environment. Ecological restoration in areas of coal pit is produced through the production of work on recultivation of disturbed lands. Carrying out monitoring of the changing state of natural landscapes in areas of coal mining can be quite effective with the use of remote sensing of the Earth. According to the results of remote sensing, long-term trends in the transformation of local ecosystems on the waste sections of the Irsha-Borodino and Azejskiy coal deposits have been built. The results show that the artificial forest plantations in the forestry reclamation gradually pass into the category

of mixed forest with birches, willows, etc. The paper presents the results of forest reclamation on spoil piles formed during the mining of the Irsha-Borodino lignite and Azejskiy coal deposits. On the perfectly-planned surfaces of spoil dumps, the formation of gullies partially destroys the results of work on forest reclamation. With the use of remote-sensing results, catchment of educated, active gullies are investigated; the most common geometric shape of the ravines in the plan is observed. Overall, the results of remote sensing and field studies suggest that the situation with forest intensive reclamation in the studied areas is generally favorable and is balanced in shaping forest ecosystems at abandoned areas of coal deposits. However, in the course of mining-ecological monitoring untoward conditions involving the water erosion on the relief areas with forestation have been marked, which ultimately leads to the formation of gully systems, with ever-expanding dimensions.

Keywords: open pit mining, waste dumps, forest reclamation, remote sensing, environmental performance, coal mines, forming ravines.

Введение. Наши исследования выполнены в соответствии с основными положениями государственной политики Российской Федерации в области космической деятельности на период до 2030 г. и дальнейшую перспективу, утвержденными Президентом Российской Федерации от 19 апреля 2013 г., № Пр-906. Следуя реализации и ресурсному обеспечению мероприятий Госпрограммы «Космическая деятельность России на 2013–2020 годы», определяющей использование космических средств дистанционного зондирования Земли в экологическом мониторинге, а также в соответствии с Государственной программой Российской Федерации «Развитие лесного хозяйства на 2013–2020 годы», в рамках основного мероприятия по лесовосстановлению предполагается всестороннее содействие естественному восстановлению лесов, а также лесной рекультивации на деградированных территориях, в том числе и после завершения открытых горных работ при разработке месторождений различных полезных ископаемых.

В настоящее время Красноярский край и Иркутская область являются регионами со значительной техногенной нагрузкой, и к тому же им принадлежит особая роль лидеров в экономическом развитии РФ. На наш взгляд, этим территориям должен быть отдан приоритет в разработке промышленных технологий, направленных на снижение техногенной нагрузки на окружающую природную среду. На территории этих регионов размещены 13 угольных карьеров.

Восстановление горнопромышленных ландшафтов на угольных карьерах. Специалистам в области экологии горного производства труды российских ученых достаточно известны, и останавливаться на обзоре этих трудов не имеет смысла. Другое дело – труды зарубежных исследователей-экологов. Решения актуальных экологических проблем в области сохранения биоразнообразия, рекультивации горнопромышленных ландшафтов при ведении открытых горных работ содержатся в многочисленных научных трудах зарубежных исследователей [1–23]. Также имеются труды в области решения экологических проблем с использованием средств дистанционного зондирования Земли [24–27]. Но, несмотря на большой объем научных работ, по-прежнему существуют резервы в повышении экологизации открытых горных работ при разработке угольных месторождений на территории Центральной и Восточной Сибири, а именно, до сих пор не решены экологические проблемы в лесной рекультивации.

В Российской Федерации основные мощности по добыче угля открытым способом сосредоточены в регионах Сибири. В Кузбассе ежегодно добывают 150 млн т угля на угольных разрезах различной мощности (от 0,5 до 10 млн т в год). В Красноярском крае единичная мощность разрезов изменяется от 200 тыс. т до 17 млн т в год. В Иркутской области в двух районах вблизи городов Тулун и Черемхово расположены крупные угольные разрезы суммарной мощностью по добыче угля 12,0 млн т. В зависимости от горно-геологических условий залегания угольных пластов отвалы вскрышных пород размещают как в выработанном пространстве карьера, так и за пределами карьерной выемки. В любом случае на отвалах проводят рекультивацию, исходя из условий предварительных договоренностей с администрациями районов, на чьих территориях производится разработка месторождения угля.

К настоящему времени на угольных разрезах накоплен большой опыт в реализации различных направлений рекультивации нарушенных земель. Несмотря на имеющиеся положительные результаты в этой области, в лесной рекультивации имеет место ряд экологических проблем, которые необходимо своевременно решать, используя полученный опыт. При выборе объектов исследования использованы следующие критерии: возраст разреза, площадь нарушенных земель, производство работ по лесной рекультивации. В этой связи мы остановились на двух территориях отработанных буроугольных месторождений: Ирша-Бородинское (угольный разрез «Бородинский», Красноярский край) и Азейское буроугольное месторождение (восточнее г. Тулун, Иркутская обл., угольные разрезы «Тулунский» и «Азейский») (рис. 1, 2).

Нарушения земной поверхности на исследуемых территориях составили 4000 и 6527 га соответственно для разреза «Бородинский» (1949 г.) и разрезов «Тулунский» (1946 г.) и «Азейский» (1972 г.). В исследованиях мы использовали результаты дистанционного зондирования Земли, полученные в разное время с космических летательных аппаратов (1987–2014 гг.), а также результаты полевых экспедиций.

Отметим горно-геологическое строение этих месторождений как простое – горизонтально залегающие угольные пласти с незначительной по мощности толщиной вскрышных пород. Это обстоятельство легло в основу применения однобортовых систем разработки с перевалкой вскрыши непосредственно в выработанное пространство на Азейском месторождении

и с вывозкой вскрыши с использованием железнодорожного транспорта на Ирша-Бородинском месторождении. Угольные пласты отрабатывают роторными (ЭР-1250, ЭРП-2500) и одноковшовыми экскаваторами ЭКГ-4у с погрузкой их в забое в железнодорожный транспорт. Производственная мощность разреза определяется рыночным спросом на уголь. В ходе отработки месторождений с 1970 г. по 2014 гг. проводили комплекс работ по сельскохозяйственной, водной (обустройство берегов водоема на Азейском месторождении) и лесной рекультивации.

Работы по лесной рекультивации на разрезе «Бородинский» производили с 2000 года, и с 1970 года – на разрезах «Тулунский» и «Азейский». На всех разрезах также проводили сельскохозяйственную рекультивацию, которая, как известно, оказалась не вос требованной со стороны предприятий агропромышленного комплекса.

В наших исследованиях территория отработанных месторождений, где проводились работы по лесной рекультивации, условно разграничена следующим образом. На внутренних породных отвалах разреза «Бородинский» выделены западный сектор, центральная часть и восточный сектор. Территория Азейского месторождения восточнее г. Тулун было условно разделена на три участка: центральный сектор с максимальной площадью – находится восточнее г. Тулун, северная мульда с тремя въездными траншеями и участок современных горных работ.

На разрезе «Бородинский» площади под лесной рекультивацией (горизонтальные участки) составили 113, 55 и 30 га на территории западного сектора, в центральной части и восточном секторе внутренних отвалов соответственно. Кроме того, высажены тополя и клены на откосах отвалов на площади 1,1 га.



Рис. 1. Участки лесной рекультивации на породных отвалах угольного разреза «Бородинский»



Рис. 2. Фрагмент космического снимка территории разработки открытым способом Азейского буроугольного месторождения (Иркутская область, РФ)



Рис. 3. Фрагменты лесной рекультивации на разрезе «Бородинский»

На разрезе «Бородинский» практически повсеместно отмечена ситуация перехода искусственно посаженного соснового леса в смешанный лес. В формировании последнего активно принимают участие береза, облепиха, тальник (верба), что отмечено на рис. 3. По нашим исследованиям к 2015 г. примерно 60 % (118 га) площади участков с лесной рекультивацией перешли в категорию «смешанный лес». В изменении площади участков, на которых произрастает смешанный лес, отмечен возрастающий тренд, т. е. ежегодно удельный вес смешанного леса на площади всех участков с искусственными посадками сосны увеличивается, а площадь чистого соснового леса, наоборот, сокращается.

В центральном секторе отработанного Азейского месторождения на горизонтальных участках в ходе лесной рекультивации высаживали сосны. Именно в этом секторе находятся искусственные чистые сосновые боры в возрасте 18–20 (и более) лет без заселения их представителями лиственного леса этого географического района – березы, осины и т. п. (рис. 4).

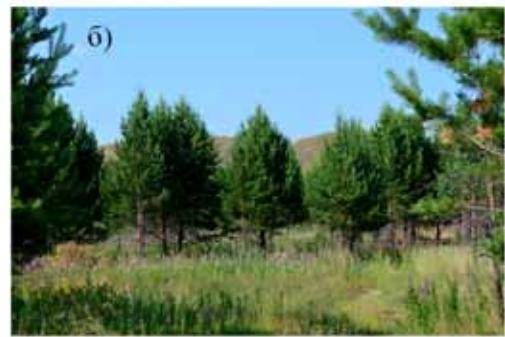


Рис. 4. Фрагменты лесной растительности на породных отвалах отработанной части Азейского угольного месторождения в центральном секторе: *а* – естественное заселение смешанным лесом; *б* – лесная рекультивация (сосновый бор)

На рис. 4, *а* смешанный лес формируется за счет переноса семян деревьев, снабженных крылом – лиственница, береза, осина, сосна и др. Последние являются типичными представителями смешанных лесов, находящихся вблизи породных отвалов и вне зоны ведения горных работ. Густота лесного покрова является вполне адекватной естественному зарастанию. Сосновый бор без заселения его представителями лиственного леса на сегодняшний день имеет два явно выраженных яруса: верхний (первый) – взрослая

сосна и хорошо развитый нижний, четвертый, растительный ярус (рис. 4, *б*).

На территории северной мульды в ходе лесной рекультивации были высажены молодые сосны, которые в большинстве своем погибли. Это произошло, на наш взгляд, по причине весеннего пожара, возникшего в результате поджога сухой травы. Сектор производства горных работ практически не заселен растительностью, и это вполне нормально, поскольку временной отрезок для формирования устойчивой экосистемы весьма мал. Вместе с тем в восточной части свежеотсыпанных породных отвалов в мелких складках рельефа наблюдается поселение древесно-кустарниковой растительности.

Результаты дистанционного зондирования состояния лесной рекультивации. Наши коллективы развили новое направление в геоэкологии горнодобывающей промышленности РФ с использованием результатов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В этой связи мы представили выборочно результаты обработки космоснимков с фрагментами отрабатываемых месторождений. Необходимо было получить результаты работ по основным направлениям рекультивации: динамику площади искусственных лесонасаждений, возможное формирование смешанного леса на территории лесной рекультивации и др. В статье мы представили отправную (начало исследований) и завершающую точку в мониторинге с применением средств ДЗЗ – 1987 и 2014 гг. (рис. 5).

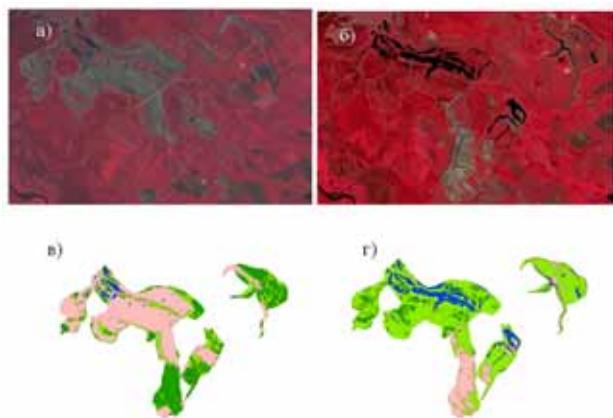


Рис. 5. Фрагменты космоснимков с выделением видов экосистемы: *а, в* – в 1987 г.; *б, г* – в 2014 г.

На рис. 5, *в, г* соответствующими цветами и оттенками показаны горные выработки без заселения их растительностью, зеркало техногенных водоемов, образованных в складках искусственного рельефа (въездные траншеи, остаточная карьерная выемка), травянисто-кустарниковая растительность, смешанный лес и лесная рекультивация.

Наиболее эффективно лесная рекультивация проведена угольными разрезами в центральном секторе. На территории северной мульды до 1987 г. находился смешанный лес, и после ее отработки разрезом проведена малоэффективная лесная рекультивация. По состоянию на 2014 г. взрослые деревья не просматриваются, к тому же на значительной площади сосновый бор или

смешанный лес просто отсутствует. В настоящее время на территории породных отвалов северной мульды произрастает неуправляемое сообщество – травянисто-кустарниковая растительность. На территории участка, где в настоящее время производятся открытые горные работы, ранее произрастал смешанный лес, который был полностью уничтожен. К 2014 г. породные отвалы стоят без растительности. Наш прогноз по этому участку – необходим временной период порядка 7–10 лет для восстановления лесной экосистемы.

Итак, в ходе обработки результатов ДЗЗ этого района получена динамика качественных и количественных характеристик формируемого в разные годы горнопромышленного ландшафта на территории отработанной части Азейского буроугольного месторождения (рис. 6).

Чистый сосновый лес (сосновый бор) составляет всего 197 га. Смешанный лес находится на площади 636 га, в том числе и на участках лесной рекультивации. Если учесть, что лесная рекультивация проведена на площади 809 га (по данным разреза), к настоящему времени смешанный лес находится на 75 % площади всех участков с лесной рекультивацией. Это говорит о том, что находящиеся рядом смешанные леса в природном нетронутом состоянии оказывают самое непосредственное влияние на формирование лесных экосистем, представляющих изначально

искусственные лесопосадки, поскольку семена деревьев основных представителей этих лесов, снаженные крылом, разносятся ветром весьма эффективно на большие расстояния. Обладая хорошей привлекательностью, семена дают жизнь деревцам на территории участков с лесной рекультивацией. Таким образом, происходит переход участков с искусственной лесопосадкой в смешанный лес.

В настоящее время на части месторождений площадью 990 га, где производятся открытые горные работы, наблюдается вялое самовосстановление лесной экосистемы на породных отвалах, отсыпанных 5–7 лет назад.

Структура сформированной к настоящему времени молодой наземной экосистемы представлена на рис. 7. Наибольшую площадь занимает травянисто-кустарниковая растительность – 59 % площади нарушенных земель. Смешанный лес – береза, сосна, лиственница, осина и др. – занимает площадь 9,8 %, в том числе и на территории лесной рекультивации. Площадь техногенных водоемов занимает 9,5 %. Чистый сосновый бор находится на площади 3 %. По нашему мнению, совершенно неважным является то, что на большей территории с лесной рекультивацией произрастает смешанный лес, а не чистый сосновый бор. В ситуации с лесовосстановлением более значимо не допустить весенний поджог сухой травы, что может свести на нет усилия разреза.

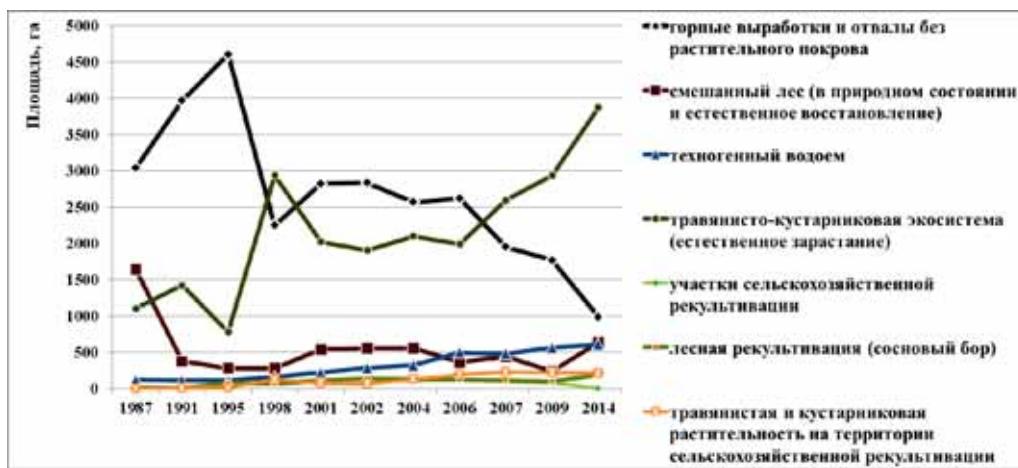


Рис. 6. Изменение площади участков водной, растительной и лесной экосистем на отработанной части Азейского буроугольного месторождения

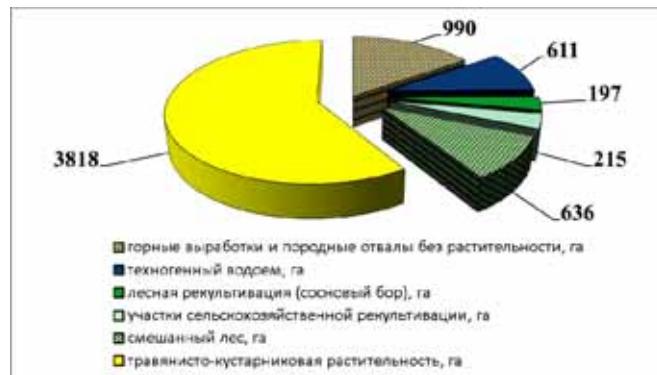


Рис. 7. Структура экосистемы на отработанной части Азейского месторождения по данным космического зондирования в 2014 г.

Выявление экологических проблем в лесной рекультивации с применением средств дистанционного зондирования Земли. Отработанная часть Ирша-Бородинского бурового месторождения с географическими координатами центральной части $55^{\circ} 51' 54''$ с.; $94^{\circ} 54' 44''$ в., которой в наших исследованиях было уделено самое пристальное внимание, имеет размеры 7200×4200 м. Лесная рекультивация на разрезе проводилась в трех секторах внутренних породных отвалов: в западном секторе, центральной части и в восточном секторе внутренних породных отвалов. В западном секторе отвалов расположены посадки сосны в возрасте 14–15 лет. Рельеф поверхности отвалов в этом секторе спокойный с плавными локальными понижениями и возвышенностями с небольшим уклоном в 3° – 40° . Темпы роста сосны на этом участке составляют от 22 до 60 см у отдельных особей и в среднем равны 38 см/год. В настоящее время площадь лесопосадок составляет примерно 100 га.

В ходе полевых экспедиций было отмечено, что в лесной рекультивации имеют место экологические проблемы, и в основном это касается разрушения целостности рельефа горнорудных ландшафтов. К важнейшим из них можно отнести наличие поверхностных водотоков, вызывающих водную эрозию горизонтальных участков и откосов породных отвалов. В результате в центральной части отвалов в местах проседания их спланированной поверхности с небольшим уклоном с запада на восток в сторону его повышения произошли со временем усадочные процессы в теле отвала. Это произошло крайне неравномерно, поскольку тело отвала сложено горными породами различной морфологии. Глинистые породы являются пластичными и обладают способностью к изменению геометрической формы под действием внешних факторов (внешнее давление, насыщение водой и др.). Песчаные породы при избыточном увлажнении и насыщении влагой приобретают свойства текучести. Крупнообломочный материал, состоящий из крепких алевролитов и аргиллитов, практически со временем не уплотняется, что приводит к тому, что в местах укладки крепких пород отвал не просаживается, и в этих местах формируются водотоки. Начав движение по наклонному основанию, вода перемещается по нему, достигая при этом тех участков, которые сложены четвертичными породами, при этом начинается их размыв. Так в этом месте появляется овраг, размеры которого со временем начинают увеличиваться. Результаты водной эрозии – действующие овраги – хорошо просматриваются на космоснимках, представленных на рис. 8, 9.

Водосборные площади имеют размеры 2,2, 1,54 и 2,35 га соответственно для оврагов № 1, 2 и 3 (рис. 8). При мощности снежного покрова от 30 до 50 см масса воды, проходящая по оврагам, может составлять 600–1000 т за период от 7 до 12 дней в зависимости от температуры окружающей среды. На рис. 8 в нижней части показаны контуры вынесенных из тела отвала горных пород. Такая ситуация, как было представлено в ранних работах, приводит к сокращению рекультивированных земель на нижнем ярусе отвала, а также к сокращению площади земель, на которых произведены посадки сосны и ели.

Аналогичная картина наблюдается и на породных отвалах разреза «Азейский», где в центральной его части имеется участок размером 480×480 м, центр которого имеет географические координаты $54^{\circ} 29' 01''$ с.; $100^{\circ} 41' 25''$ в. (рис. 9). На территории этого участка хорошо просматриваются 13 действующих оврагов. Такая ситуация объясняется планировкой поверхности отвала с постоянным уклоном с высотной отметки 542 м до отметки 506 м, а также укладкой вскрышных пород разной морфологии в тело отвала, которые имеют различную степень уплотнения.



Рис. 8. Фрагмент участка лесной рекультивации в центральном секторе внутренних породных отвалов разреза «Бородинский»



Рис. 9. Фрагмент участка лесной рекультивации и формирующихся оврагов на внутреннем породном отвале разреза «Азейский»

При проведении полевых экспедиций на породных отвалах разреза «Бородинский» в период с 2000 по 2015 гг. установлены геометрические формы действующих оврагов (рис. 10). Всего было выявлено 43 оврага различной протяженности и глубины. Все они систематически и безостановочно во времени увеличиваются в размерах, поскольку природные факторы (снеговые и дождевые осадки, чередование отрицательных и положительных температур и др.) действуют круглогодично.

Овраги на рис. 10, а по размерам небольшие и за исключением оврага на отвале «Западный» чаще всего имеют площадь 0,5 га. Овраги площадью от 0,5 га до 1 га формируются по схемам на рис. 10, б, г. Овраги на рис. 10, в, разветвленные в плане, имеют площадь более 1 га. К настоящему времени количество оврагов на породных отвалах разреза «Бородинский» составляет 29, 7, 2 и 5 соответственно для схем на рис. 10. Водосборные площади оврагов корреспондируют с их формами, т. е. самые максимальные водосборные площади у оврагов на рис. 10, в, г и самые минимальные – у оврагов на рис. 10, а. Фрагменты действующих оврагов, в ходе развития которых уничтожаются результаты лесной рекультивации, выборочно представлены на рис. 11, 12.

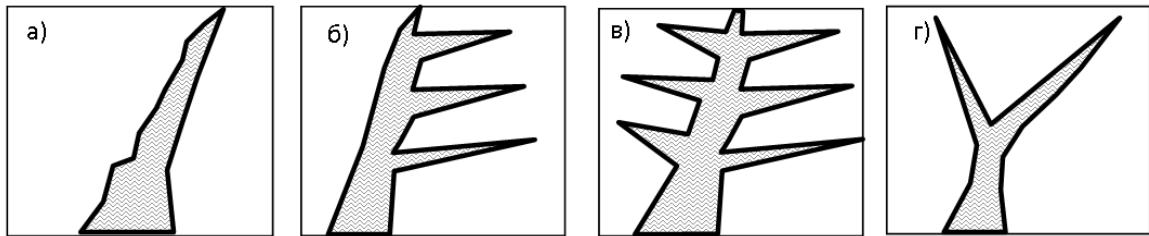


Рис. 10. Схемы оврагов, сформированных на породных отвалах: а – линейная форма; б – одностороннее ответвление; в – двустороннее ответвление; г – вилочная форма

На рис. 11 на дне оврага находятся молодые деревца (сосна, ель), которые при развитии оврага оказались в зоне поверхностных водотоков. В итоге они со временем перенесутся водой в нижний сектор оврага с крупнообломочным материалом, где постепенно усохнут и погибнут.



Рис. 11. Фрагмент расходящегося оврага вилочной формы



Рис. 12. Фрагменты оврагов линейной формы

В проектах на рекультивацию принимаются в основном высадка саженцев в ряды. Расстояние между рядами определяется в 3 и 4 м. Количество деревьев

при их высадке по прямоугольной сетке 3×4, 4×4 м, которые попадают в контуры оврага, представлены на графике (рис. 13).

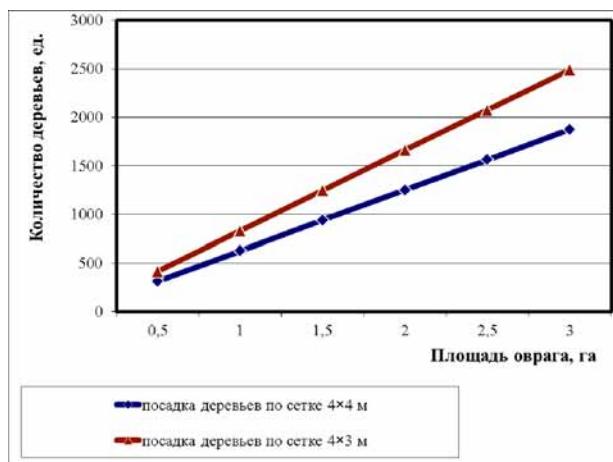


Рис. 13. Количество высаженных при рекультивации деревьев, уничтожаемых при формировании и развитии оврагов на породных отвалах

Стоимость лесной рекультивации в зависимости от количества высаженных сосен на единицу площади отвала представлена на рис. 14. При определении затрат на лесную рекультивацию учитывались следующие ее составляющие: цена саженцев в лесопитомниках, стоимость их доставки из питомника до объекта рекультивации, затраты на посадку саженцев, затраты на уход за саженцами в течение 2–3 лет после их высадки.

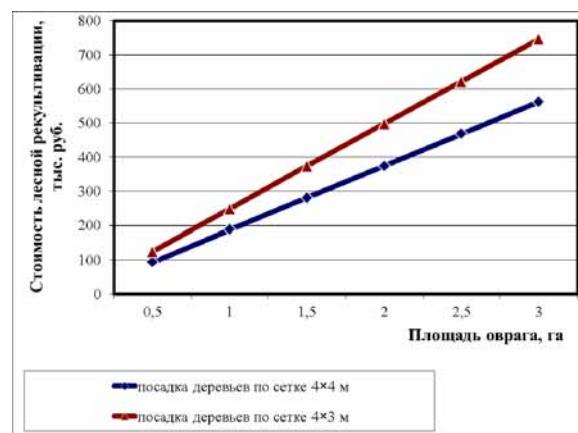


Рис. 14. Изменение стоимости лесной рекультивации

Рельеф породных отвалов согласно ГОСТ 17.5.3.04–83 для проведения лесной рекультивации должен обеспечивать эффективное использование механизированной колесной техники. После планировки поверхность отвала не должна содержать локальных понижений. При проведении полевых исследований растительного мира на поверхности отвала выявлены особенности локального фитоценоза. В первую очередь необходимо было вычленить из всего видового разнообразия каркас фитоценоза. Его составляющие следующие: из травянистых растений преобладают пырей ползучий (*elytrigia repens*), полынь обыкновенная (*artemisia vulgaris*), осот (*sonchus*), пижма обыкновенная (*tanacetum vulgare*), из древесно-кустарниковых – тополь черный (*populus nigra*), облепиха крушиновидная (*hippophae rhamnoides*), тальник (ива, *Salix*).

Осот произрастает семействами от 2–3 до 30–40 ед и селится в основном на участках с содержанием гумуса более 3 %. Пырей ползучий образует густопреплетенные стеблевые и корневищные заросли также на участках, отсыпанных преимущественно четвертичными отложениями. Полынь обыкновенная селится отдельными полянами площадью от 0,5 до 2–3 м², а также произрастает в сочетании со всеми видами пионерного фитоценоза. Было обнаружено и то, что на отвале произрастают лекарственные травы отдельными особями: тысячелистник, щавель конский и т. п. Облепиха встречается чаще в 2–3 раза на склонах, обращенных на север, чем на южных склонах. Тополь произрастает редко и равномерно на всей территории обследованных отвалов.

Продуктивность этих видов растений по весу надземной части у всех особей разная, но именно перегнившие остатки являются источником питания корневых систем деревьев, высаженных в ходе лесной рекультивации на породные отвалы.

Результаты полевых экспедиций по исследованию результатов лесной рекультивации на отработанных территориях Ирша-Бородинского и Азейского угольных месторождений позволяют сделать следующие выводы: достоверно доказано, что форма рельефа породного отвала в виде идеально спланированной поверхности способствует возникновению оврагов, прорезающих как горизонтальные поверхности, так и откосы отвалов. Формирующиеся овраги, имеющие тенденцию к увеличению размеров, частично уничтожают результаты работ по лесной рекультивации, приводят к сокращению площади рекультивируемых отвалов, а также способствуют уничтожению деревьев, высаженных в ходе работ по лесной рекультивации. В этой связи возникает необходимость в разработке технологии формирования рельефа породных отвалов для лесной рекультивации, практическая реализация которой будет способствовать улучшению ее результатов.

В линейке месторождений этого типа (горизонтальное залегание угольных пластов – месторождения Красноярского края, Иркутская область, Забайкальский край) показатели лесной рекультивации на породных отвалах исследуемых разрезов могут использоваться как индикаторные, т. е. показательные для других угольных разрезов со сходными горно-геологическими условиями, входящих в ТЭК РФ.

Заключение. Разработанное информационное обеспечение результатов работ по лесной рекультивации, а также полевые исследования говорят о том, что ситуация с лесной рекультивацией в исследуемых районах в целом благоприятная и является сбалансированной в плане формирования лесных экосистем на отработанных территориях угольных месторождений. В заключение отметим, что к настоящему времени на территории породных отвалов, расположенных в выработанном пространстве Ирша-Бородинского и Азейского бороугольных месторождений на участках с лесной рекультивацией формируются смешанные леса, каркас которых составляют искусственные лесопосадки. Также в ходе экологического мониторинга отмечена неблагоприятная ситуация, связанная с воздействием водной эрозии на рельеф участков с лесонасаждениями, что в итоге приводит к образованию овражно-балочных систем с постоянно расширяющимися размерами. Вместе с этим, на наш взгляд, при разработке экологической стратегии предприятий (угольные разрезы «Бородинский» и «Азейский») необходима оптимизация в области лесной рекультивации нарушенных земель, поскольку не всё, что делается на разрезе с позиции экологии, в итоге (по прошествии некоторого времени) выглядит так, как это предполагалось изначально, по крайней мере, в проектах. Наши предложения по оптимизации экологической политики предприятия в области восстановления нарушенных земель будут, при необходимости, направлены на существенное снижение затрат на производство работ по лесной рекультивации земель с одновременным получением экологических результатов, схожих с показателями уже восстановленных горнопромышленных ландшафтов.

References

1. Dekoninck Wouter, Hendrickx Frederik, Dethier Michel, Maelfait Jean-Pierre. Forest Succession Endangers the Special Ant Fauna of Abandoned Quarries along the River Meuse (Wallonia, Belgium). *Restoration Ecology*, 2010, Vol. 18(5), P. 681–690.
2. Madejón E., Doronila A. I., Sanchez-Palacios J. T., Madejón P., Baker A. J. M. Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) and Biosolids Enhance the Growth of a Native Australian Grass on Sulphidic Gold Mine Tailings. *Restoration Ecology*, 2010, Vol. 18(S1), P. 175–183.
3. Markham John, Young Ian, Renault Sylvie. Plant Facilitation on a Mine Tailings Dump. *Restoration Ecology*, 2011, Vol. 19(5), P. 569–571.
4. Faucon Michel-Pierre, Parmentier Ingrid, Colinet Gilles, Mahy Grégory, Ngongo Luhembwe Michel, Meerts Pierre. May Rare Metallophytes Benefit from Disturbed Soils Following Mining Activity? The Case of the Crepidorhopalon tenuis in Katanga (D. R. Congo). *Restoration Ecology*, 2011, Vol. 19(3), P. 333–343.
5. Dominguez-Haydar Yamileth, Armbrecht Inge. Response of Ants and Their Seed Removal in Rehabilitation Areas and Forests at El Cerrejón Coal Mine in Colombia. *Restoration Ecology*, 2011, Vol. 19(201), P. 178–184.
6. Gentili Rodolfo, Sgorbati Sergio, Baroni Carlo. Plant Species Patterns and Restoration Perspectives in the

- Highly Disturbed Environment of the Carrara Marble Quarries (Apuan Alps, Italy). *Restoration Ecology*, 2011, Vol. 19(101), P. 32–42.
7. Walter Cynthia A., Nelson Dean, Earle Jane I. Assessment of Stream Restoration: Sources of Variation in Macroinvertebrate Recovery throughout an 11-Year Study of Coal Mine Drainage Treatment. *Restoration Ecology*, 2012, Vol. 20(4), P. 431–440.
8. Kappes Heike, Clausius Alexandra and Topp Werner. Historical Small-Scale Surface Structures as a Model for Post-Mining Land Reclamation. *Restoration Ecology*, 2012, Vol. 20(3), P. 322–330.
9. Cusser Sarah, Goodell Karen. Diversity and Distribution of Floral Resources Influence the Restoration of Plant-Pollinator Networks on a Reclaimed Strip Mine. *Restoration Ecology*, 2013, Vol. 21(6), P. 713–721.
10. Naeth M. Anne, Wilkinson Sarah R. Establishment of Restoration Trajectories for Upland Tundra Communities on Diamond Mine Wastes in the Canadian Arctic. *Restoration Ecology*, 2014, Vol. 22(4), P. 534–543.
11. Gillard Keith E. and McCarthy Brian C. Microtopography Influences Early Successional Plant Communities on Experimental Coal Surface Mine Land Reclamation. *Restoration Ecology*, 2014, Vol. 22(2), P. 232–239.
12. Uhlig Charles-Andre, Fahle Werner. Vibrocompacting in the Lusatian lignite mining area – State of the Art technology. *World of Mining – Surface & Underground*, 2015, Vol. 67 (2), P. 91–101.
13. Kulik Lars, Stemann Hendrik. Ecology and biodiversity protection in the Rhenish lignite mining area. *World of Mining – Surface & Underground*, 2014, Vol. 66 (3), P. 143–152.
14. Pabsch Thomas, Müller Frank, Rosne Peter. Related projects focusing on the implementation of the Water Framework Directive – Ore Mining Project Significant sources of pollution in ore mining and potential measures to be taken as part of management planning in NRW. *World of Mining – Surface & Underground*, 2013, Vol. 65(6), P. 374–384.
15. Knapp Sonja, Gerth André, Klotz Stefan. Sustainable recultivation and wastewater treatment in Vietnamese coal mining. *World of Mining – Surface & Underground*, 2012, Vol. 64(4), P. 253–263.
16. Martens Per N., Lehnert Felix, Kratz Thorsten. Current challenges and status of lignite mine rehabilitation. *World of Mining – Surface & Underground*, 2012, Vol. 64(5), P. 310–319.
17. Milojcic George. High-quality rehabilitation: A contribution to the acceptance of lignite. *World of Mining – Surface & Underground*, 2011, Vol. 63(4), P. 201–206.
18. Kuyumcu Mahmut. Special challenges in lignite remediation. *World of Mining – Surface & Underground*, 2011, Vol. 63(6), P. 207–216.
19. Schlenstedt Jörg, Bilek Felix, Kochan Hans-Jürgen. Planning and building a complex mine water treatment plant for Vietnam. *World of Mining – Surface & Underground*, 2010, Vol. 62(3), P. 154–163.
20. Freytag Klaus, Pulz Karina. The New Federal Nature Conservation Act from the perspective of mining projects. *World of Mining – Surface & Underground*, 2010, Vol. 62(4), P. 214–221.
21. Oster Arthur. Inden opencast mine – transition from the present to the new power plant residue landfill. *World of Mining – Surface & Underground*, 2010, Vol. 62(5), P. 270–274.
22. Albrecht Claus, Esser Thomas. Biodiversity in recultivation – Examples from the Rhenish lignite mining area. *World of Mining – Surface & Underground*, 2010, Vol. 62(5), P. 275–281.
23. Pinzke Günter, Jockel Andreas. A retrospective look at the closure of the old potash shaft Friedrich Franz (Lübtheen, Mecklenburg) with lignite filter ash and its safety assessment 30 years later. *World of Mining – Surface & Underground*, 2010, Vol. 62(5), P. 282–294.
24. Shoo Luke P., Scarth Peter, Schmidt Susanne, Wilson Kerrie A. Reclaiming Degraded Rainforest: A Spatial Evaluation of Gains and Losses in Subtropical Eastern Australia to Inform Future Investment in Restoration. *Restoration Ecology*, 2013, Vol. 21(4) P. 481–489.
25. Abdullah Meshal M., Feagin Rusty A., Musawi Layla, Whisenant Steven, Popescu Sorin. The use of remote sensing to develop a site history for restoration planning in an arid landscape. *Restoration Ecology*, 2016, Vol. 24(9), P. 91–99.
26. Zweig Christa L., Newman Susan. Using landscape context to map invasive species with medium-resolution satellite imagery. *Restoration Ecology*, 2015, Vol. 23(5), P. 524–530.
27. Borrelle Stephanie B., Buxton Rachel T., Jones Holly P., Towns David R. A GIS-based decision-making approach for prioritizing seabird management following predator eradication. *Restoration Ecology*, 2015, Vol. 23(5), P. 580–587.

**MULTI-OBJECTIVE BASED FEATURE SELECTION AND NEURAL NETWORKS ENSEMBLE
METHOD FOR SOLVING EMOTION RECOGNITION PROBLEM**

I. A. Ivanov

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

In this paper we apply multi-objective optimization approach to find a Pareto optimal ensemble of neural network classifiers, which is used for solving the emotion recognition problem. Pareto set of neural networks is found by optimizing two conflicting criteria: maximizing emotion classification rate and minimizing the number of neural network neurons. We implemented several ensemble fusion schemes – voting, averaging class probabilities and adding auxiliary meta-classification layer. The number of audio and video features extracted from raw video sequences for analysis is quite large, so we also applied multi-objective approach in order to find the optimal subset of features. The optimized criteria in this case are maximizing classification rate and minimizing the number of features. The multi-objective approach to neural network parameter optimization and to feature selection was compared to the classic single-objective optimization approach on several datasets. According to experimental results, multi-objective approach to neural net optimization provided on average 7.1 % higher emotion classification rate than single-objective optimization. Applying multi-objective approach to feature selection as well helped to improve the classification rate by 2.8 % compared to single-objective approach, by 5.4 % compared to using principal components analysis, and by 13.9 % compared to not using dimensionality reduction at all. Taking into account the obtained results, we suggest using multi-objective approach to machine learning algorithms optimization and feature selection in further research connected with emotion recognition problem and other complex classification tasks.

Keywords: ensemble, neural network, multi-objective optimization, emotion recognition.

Вестник СибГАУ
Том 17, № 1. С. 45–49

**МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ МЕТОД ОТБОРА ПРИЗНАКОВ И ПОСТРОЕНИЯ КОЛЛЕКТИВА
НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАСПОЗНАВАНИЯ ЭМОЦИЙ**

И. А. Иванов

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

Применен подход многокритериальной оптимизации, чтобы найти парето-оптимальный коллектив нейронных сетей, используемых для решения задачи распознавания эмоций. Поиск парето-множества нейросетей ведется путем оптимизации двух противоречивых критерииев: максимизируется точность распознавания эмоций и минимизируется число нейронов сети. Реализовано несколько методов слияния классификаторов в коллективе: голосование, усреднение вероятностей классов, добавление вспомогательного слоя метаклассификации. Так как количество извлеченных для анализа аудио- и видеопризнаков достаточно велико, также применен многокритериальный подход для нахождения оптимального подмножества признаков. В данном случае оптимизируются следующие критерии: максимизируется точность классификации и минимизируется количество признаков. Многокритериальный подход к оптимизации параметров нейросетей и к отбору признаков был сравнен с классическим однокритериальным подходом на нескольких выборках. Согласно полученным экспериментальным результатам, с помощью многокритериального метода оптимизации нейронных сетей удалось достичь в среднем на 7,1 % лучшей точности классификации эмоций, чем с помощью однокритериального метода. Применение многокритериального метода к отбору информативных признаков также позволило улучшить точность классификации на 2,8 % по сравнению с однокритериальным методом, на 5,4 % по сравнению с использованием метода главных компонент и на 13,9 % по сравнению с использованием всех признаков, без процедуры снижения размерности. Беря во внимание полученные результаты, рекомендовано использовать многокритериальный подход для оптимизации алгоритмов машинного обучения и для отбора информативных признаков в дальнейших исследованиях, связанных с задачей распознавания эмоций и другими сложными задачами классификации.

Ключевые слова: коллектив классификаторов, нейронная сеть, многокритериальная оптимизация, распознавание эмоций.

Introduction. The problem of configuring machine learning algorithms is crucial for finding effective solutions to practical machine learning and data analysis problems. There has been much research done on developing the algorithms for configuring machine learning algorithms parameters and structure. In this work we apply multi-objective optimization method to neural networks parameter optimization and compare it to the single-objective optimization method. The emotion recognition problem by audio-visual features serves as a benchmark problem. There are two conflicting optimized criteria: emotion classification rate (maximized) and the number of neural network neurons (minimized). In such optimization formulation we end up with finding a Pareto optimal set of neural networks, some of which may naturally have a complex structure (more neurons) and a better classification rate on a train set (overfitting), while some may have a simpler structure and worse classification rate, but at the same time have a lower generalization error (underfitting). The idea proposed in this work is to combine such diverse Pareto optimal neural networks into an ensemble, that would, hopefully, yield a better classification rate on the test set.

Another important step performed in machine learning is the feature space dimensionality reduction. In this work we also apply multi-objective optimization method to find the optimal subset of features. The optimized criteria are: emotion classification rate (maximized) and the total number of features chosen for further analysis (minimized). The proposed multi-objective optimization approach to feature selection is compared to single-objective optimization approach and to principal components analysis (PCA).

The problem of emotion recognition is a part of a more global problem of human-machine interaction (HMI). The systems that provide means of HMI are called dialogue systems (DS). Dialogue systems consist of several modules: speech analysis, intelligence gathering, taking actions. The gathered intelligence includes person's gender, age, emotional state, ethnicity and other information that might be valuable for making decision about the actions. In this work we focus on the problem of person emotional state classification by the available audio and video information of person's face.

Significant related work. The paper by Rashid et al. [1] explores the problem of human emotion recognition and proposes the solution of combining audio and visual features. First, the audio stream is separated from the video stream. Feature detection and 3D patch extraction are applied to video streams and the dimensionality of video features is reduced by applying PCA. From audio streams prosodic and mel-frequency cepstrum coefficients (MFCC) are extracted. After feature extraction the authors construct separate codebooks for audio and video modalities by applying the K-means algorithm in Euclidean space. Finally, multiclass support vector machine (SVM) classifiers are applied to audio and video data, and decision-level data fusion is performed by applying Bayes sum rule. By building the classifier on audio features the authors received an average accuracy of 67.39 %, using video features gave an accuracy of 74.15 %, while combining audio and visual features on the decision level improved the accuracy to 80.27 %.

Kahou et al. [2] described the approach they used for submission to the 2013 Emotion Recognition in the Wild Challenge. The approach combined multiple deep neural networks including deep convolutional neural networks (CNNs) for analyzing facial expressions in video frames, deep belief net (DBN) to capture audio information, deep autoencoder to model the spatio-temporal information produced by the human actions, and shallow network architecture focused on the extracted features of the mouth of the primary human subject in the scene. The authors used the Toronto Face Dataset, containing 4.178 images labelled with basic emotions and with only fully frontal facing poses, and a dataset harvested from Google image search which consisted of 35.887 images with seven expression classes. All images were turned to grayscale of size 48×48. Several decision-level data integration techniques were used: averaged predictions, SVM and multi-layer perceptron (MLP) aggregation techniques, and random search for weighting models. The best accuracy they achieved on the competition testing set was 41.03 %.

In the work by Cruz et al. [3] the concept of modelling the change in features is used, rather than their simple combination. First, the faces are extracted from the original images, and Local Phase Quantization (LPQ) histograms are extracted in each $n \times n$ local region. The histograms are concatenated to form a feature vector. The derivative of features is computed by two methods: convolution with the difference of Gaussians (DoG) filter and the difference of feature histograms. A linear SVM is trained to output posterior probabilities and the changes are modelled with a hidden Markov model. The proposed method was tested on the Audio/Visual Emotion Challenge 2011 dataset, which consists of 63 videos of 13 different individuals, where frontal face videos are taken during an interview where the subject is engaged in a conversation. The authors claim that they increased the classification rate on the data by 13 %.

In [4] the authors exploit the idea of using electroencephalogram, pupillary response and gaze distance to classify the arousal of a subject as either calm, medium aroused, or activated and valence as either unpleasant, neutral, or pleasant. The data consists of 20 video clips with emotional content from movies. The valence classification accuracy achieved is 68.5 %, and the arousal classification accuracy is 76.4 %.

Busso et al. [5] researched the idea of acoustic and facial expression information fusion. They used a database recorded from an actress reading 258 sentences expressing emotions. Separate classifiers based on acoustic data and facial expressions were built, with classification accuracies of 70.9 % and 85 % respectively. Facial expression features include 5 areas: forehead, eyebrow, low eye, right and left cheeks. The authors covered two data fusion approaches: decision level and feature level integration. On the feature level, audio and facial expression features were combined to build one classifier, giving 90 % accuracy. On the decision level, several criteria were used to combine posterior probabilities of the unimodal systems: maximum – the emotion with the greatest posterior probability in both modalities is selected; average – the posterior probability of each modality is equally weighted and the maximum is selected; product – posterior probabilities

are multiplied and the maximum is selected; weight – different weights are applied to the different unimodal systems. The accuracies of decision-level integration bimodal classifiers range from 84 % to 89 %, product combining being the most efficient.

Methodology. The process of solving the emotion recognition problem, as well as any other classification problem, consists of the following steps:

1. Raw data gathering, in our case obtaining the database of labeled video recordings with emotional content.
2. Feature extraction, in order to perform quantitative analysis, we need quantitative features to base upon.
3. Dimensionality reduction, performed when the number of features is too large, for higher generalizability and lower computational costs.
4. Training classifier, using the train set.
5. Making predictions, using the test set.

Completion of each step is crucial for successful classification problem solving. While gathering valuable data and using the right technique for feature extraction are the most important and time consuming steps, usually it turns out that researchers do not have the ability to collect their own data, or are forced to work with the data that was provided to them. In such cases what really matters, are steps 3 and 4, that are actually about taking as much as you can from available data and implementing the right classifier in order to make accurate predictions. In this work we focus on achieving these two goals.

But let us begin from the beginning. We are using SAVEE emotional database [6] as a data source for our analysis. It contains 480 video recordings of 4 male individuals reading a set of sentences expressing 7 basic emotions: anger, happiness, disgust, neutral, fear, surprise, sadness. We apply openSMILE software [7] for extracting audio features, and 3 video feature extraction methods:

- 1) Quantized Local Zernike Moments (QLZM) [8];
- 2) Local Binary Patterns (LBP) [9];
- 3) Local Binary Patterns on Three Orthogonal Planes (LBP-TOP) [10].

After that goes dimensionality reduction step, which can be performed in several ways. There are two groups of algorithms used for dimensionality reduction:

1. Feature transformation methods, that take the large number of features and transform them to less number of more informative features. Principal components analysis (PCA) is a popular method of this group.
2. Feature selection methods, that take the large number of features and select the optimal (in some sense) subset of features.

The classic approach in feature selection is to use single-objective optimization algorithms for finding the optimal features that, when used with a proper classifier, would provide the highest classification rate. We went further and applied multi-objective optimization algorithms for solving this problem. The first optimized objective is the same as in single-objective formulation, the classification rate, which is defined as follows:

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

where N_c is the number of correctly classified instances; N is the total number of dataset instances; R is the classification rate. The second objective is the minimization of

the number of selected features, because this is the essence of dimensionality reduction step:

$$|F| \rightarrow \min, \quad (2)$$

where F is the subset of selected features. Support vector machine (SVM) algorithm was used for classification purposes. Other objectives may be used for optimization during feature selection procedure, like intra-class and inter-class distances [11].

The next step, training the classifier, involves choosing the classification algorithm and adjusting its parameters. We chose feed-forward single-layer neural network algorithm with sigmoid activation function. The popular approach to neural network parameter adjustment is based on using the optimization algorithms for finding the optimal neural net parameter values. In our optimization formulation, the input variables include the overall number of network neurons and the number of iterations for network training. The input variables vary in the following borders. Number of network neurons $N_n = 2 : 50$, number of network training iterations $N_t = 2 : 200$.

We applied the multi-objective optimization approach to neural network parameter optimization. The optimized criteria are as follows: maximizing the classification rate and minimizing the number of network neurons. As a result of multi-objective optimization, we obtain a Pareto optimal set of neural networks. In order to make possible the comparison of single and multi-objective approaches, we combine Pareto optimal neural network classifiers into an ensemble, fusing the outputs of multiple neural networks by several techniques:

1. Voting, the class that was predicted by the majority of neural nets is chosen as a final prediction.
2. Averaging the class probabilities over all networks, posterior class probabilities for each class are averaged over all neural networks in the ensemble.
3. Adding auxiliary meta-classification layer, training dataset is divided into two parts, the first part is used to train the ensemble classifiers. The output posterior class probabilities of all ensemble classifiers are treated as input variables, and the second part of the training dataset is used to train an auxiliary SVM meta-classifier, which outputs the resulting class prediction.

The class of genetic algorithms was chosen for solving the optimization tasks described above. We used Co-evolutionary Genetic algorithm for single-objective optimization, and several algorithms for multi-objective optimization: Strength Pareto Evolutionary algorithm (SPEA) [12], Non-dominated Sorting Genetic algorithm (NSGA-2) [13], Vector Evaluated Genetic algorithm (VEGA) [14] and Self-configuring Co-evolutionary Multi-objective Genetic algorithm (SelfCOMOGA) [15].

Experimental results. We performed a series of experiments on using the proposed multi-objective optimization approach to feature selection and neural networks parameter optimization. The experiments were conducted on 5 different datasets, including audio features dataset, 3 video features datasets, namely QLZM, LBP and LBP-TOP datasets, and audio-visual dataset that is merely a combination of the audio and 3 video features datasets.

Emotion classification rate, as well as the reduced number of features obtained by different dimensionality reduction techniques can be found in tab. 1. As can be observed, multi-objective approach to feature selection provides the highest classification rate on 4 out of 5 datasets, leaving the second place to single-objective approach to feature selection, and the third one to PCA. The highest achieved emotion classification rate is 45.7 %.

Tab. 2 contains results on the comparison of single and multi-objective approaches to neural network parameter optimization. Different ensemble fusion schemes and multi-objective optimization algorithms were tried. According to the results, multi-objective optimization approach outperformed single-objective optimization approach on all 5 datasets. The highest achieved emotion

classification rate is 39.8 %, which is still high enough for such a complex problem, taking into account that the baseline model, that is, always predicting the most frequently observed class label from the train set, would yield the 25 % accuracy.

Conclusion. In this work we addressed two crucial steps of building an emotion recognition system – dimensionality reduction and classifier training. We applied the multi-objective optimization approach to these two steps, which helped to achieve the 45.7 % classification rate.

As a result of our research, we defined that the proposed approach proved to be useful in both feature selection and neural network parameter optimization procedures, so we recommend using it in further research connected with emotion recognition.

Emotion classification rate (%), dimensionality reduction approaches comparison

Dataset		Audio	QLZM	LBP	LBP-TOP	Audio + video
Initial number of features		991	656	59	177	1883
Emotion classification rate / reduced number of features	All features	28.542	10.506	20.486	22.847	19.732
	Principal components analysis	35.923 / 131	21.458 / 36	23.75 / 4	32.017 / 10	31.718 / 180
	Feature selection	Single-objective optimization	38.095 / 476	20.208 / 301	25.972 / 33	40.278 / 77
		Multi-objective optimization	39.702 / 484	24.911 / 319	25.694 / 31	45.694 / 90
						35.893 / 885

Emotion classification rate (%), neural networks optimization and ensemble forming

Optimization Algorithm (number of objectives)	Ensemble Classifiers Output Fusion Scheme	Dataset				
		Audio	QLZM	LBP	LBP-TOP	Audio + video
Co-evolutionary GA (1)	–	35.923	21.458	23.75	32.917	31.718
SPEA (2)	Voting	31.012	16.319	16.667	34.167	27.292
	Average class probabilities	16.994	10.903	16.458	39.583	14.256
	SVM meta-classifier	28.631	16.042	18.264	34.583	25.06
NSGA-2 (2)	Voting	29.226	21.181	19.236	33.403	24.554
	Average class probabilities	29.435	14.722	16.667	17.639	23.571
	SVM meta-classifier	39.762	11.528	17.5	38.125	34.94
VEGA (2)	Voting	33.839	17.5	24.514	32.639	22.5
	Average class probabilities	27.262	24.306	20.069	21.042	15.119
	SVM meta-classifier	38.899	13.958	29.167	36.736	37.292
SelfCOMOGA (2)	Voting	26.577	20.347	33.125	36.25	19.94
	Average class probabilities	23.244	15.935	25.417	22.708	17.768
	SVM meta-classifier	36.518	26.756	38.333	36.319	29.405

References

1. Rashid M., Abu-Bakar S. A. R., Mokji M. Human emotion recognition from videos using spatio-temporal and audio features. *The Visual Computer*, 2012, P. 1269–1275.
2. 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. In Proceedings of the 15th ACM on International Conference on Multimodal Interaction, Sydney, Australia, December 9–13, 2013, P. 543–550.
3. Cruz A., Bhanu B., Thakoor N. Facial emotion recognition in continuous video. In Proceedings of the 21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2012), Tsukuba, Japan, November 11–15, 2012, P. 1880–1883.
4. Soleymani M., Pantic M., Pun T. Multimodal emotion recognition in response to videos. *IEEE Transactions on affective computing*, 2012, Vol. 3, No. 2, P. 211–223.
5. 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, Speech and Multimodal Information. In Proceedings of the 6th international conference on Multimodal interfaces, Los Angeles, 2004, P. 205–211.
6. Haq S., Jackson P. J. B. Speaker-dependent audio-visual emotion recognition. In Proceedings Int. Conf. on Auditory-Visual Speech Processing (AVSP'09), Norwich, UK, September 2009, P. 53–58.
7. Eyben F., Wullmer M., Schuller B. OpenSMILE – the Munich versatile and fast open-source audio feature extractor. In Proceedings ACM Multimedia (MM), Florence, Italy, 2010, P. 1459–1462.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Sidorov M., Brester C., Semenkin E., Minker W. Speaker state recognition with neural network-based classification and self-adaptive heuristic feature selection. In Proceedings International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO), 2014, P. 699–703.
12. Zitzler E., Thiele L. An evolutionary algorithm for multiobjective optimization: the strength Pareto approach. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland, TIK-Report No. 43, May 1998, P. 1–40.
13. Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, 2002, Vol. 6, No. 2, P. 182–197.
14. Schaffer J. D. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms. Proc. of the 1st International Conference on Genetic Algorithms, 1985, P. 93–100.
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.).

Библиографические ссылки

1. Rashid M., Abu-Bakar S. A. R., Mokji M. Human emotion recognition from videos using spatio-temporal and audio features // The Visual Computer. 2012. P. 1269–1275.
2. Combining modality specific deep neural networks for emotion recognition in video / S. E. Kahou [et al.] // In Proceedings of the 15th ACM on Intern. Conf. on Multimodal Interaction. Sydney, 2013. P. 543–550.
3. Cruz A., Bhanu B., Thakoor N. Facial emotion recognition in continuous video // In Proceedings of the 21st Intern. Conf. on Pattern Recognition (ICPR 2012) (Tsukuba, Japan, November 11–15). 2012. P. 1880–1883.
4. Soleymani M., Pantic M., Pun T. Multimodal emotion recognition in response to videos // IEEE Transactions on affective computing. 2012. Vol. 3, no. 2. P. 211–223.
5. Analysis of Emotion Recognition using Facial Expressions, Speech and Multimodal Information / C. Busso [et al.] // In Proceedings of the 6th Intern. Conf. on Multimodal interfaces. Los Angeles, 2004. P. 205–211.
6. Haq S., Jackson P. J. B. Speaker-dependent audio-visual emotion recognition // In Proceedings Int. Conf. on Auditory-Visual Speech Processing (AVSP'09). Norwich, 2009, P. 53–58.
7. Eyben F., Wullmer M., Schuller B. OpenSMILE – the Munich versatile and fast open-source audio feature extractor // In Proceedings ACM Multimedia (MM). Florence, 2010. P. 1459–1462.
8. Local Zernike moment representation for facial affect recognition / E. Sariyanidi [et al.] // Proc. of British Machine Vision Conference. 2013. P. 1–13.
9. 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.
10. 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.
11. Speaker state recognition with neural network-based classification and self-adaptive heuristic feature selection / M. Sidorov [et al.] // In Proceedings Intern. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO). 2014. P. 699–703.
12. Zitzler E., Thiele L. An evolutionary algorithm for multiobjective optimization: the strength Pareto approach // TIK-Report. 1998. No. 43. Zurich, Switzerland, Swiss Federal Institute of Technology P. 1–40.
13. 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.
14. Schaffer J. D. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms // Proc. of the 1st Intern. Conf. on Genetic Algorithms. 1985. P. 93–100.
15. Иванов И. А., Сопов Е. А. Самоконфигурируемый генетический алгоритм решения задач поддержки многокритериального выбора // Вестник СибГАУ. 2013. № 1 (47). С. 30–35.

ПОДХОД К СОЗДАНИЮ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

А. С. Картамышев^{1*}, А. В. Мурыгин²

¹АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина 52

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: kartam@iss-reshetnev.ru

Раскрываются причины возникновения потребности в интеграции информационных систем, используемых на предприятиях ракетно-космической отрасли. Приводятся основные инструменты управления жизненным циклом продукции и информационные системы, предназначенные для общего управления предприятием. Обозначаются источники негативного влияния на качество управляемых реакций, и формулируется решение, позволяющее повысить эффективность управления. Предлагается подход к созданию интегрированной информационной системы управления и отсыывается его суть. Определяется общая составляющая во всех функциональных инструментах для представления ее в виде связки между различными информационными системами. Отсыивается возможность создания нового абстрактного уровня для интеграции через него различных функциональных информационных систем, используемых на предприятии, где в качестве логической интеграционной связи предлагается понятие работы. Объясняется положительный эффект предлагаемого подхода к интеграции информационных систем управления предприятием. На примере методических документов АО «ИСС» рассматривается возможность классификации всех выполняемых работ на предприятии по принадлежности к основным стадиям производства продукции и составу изделия. Приводятся примеры классификаторов, разработанных на основании нормативных документов АО «ИСС», и объясняется преимущество от их использования. Акцентируется внимание на необходимости расширения функционала системы управления проектами, стоящей во главе предлагаемого инструмента, служащего базой для интеграции используемых на предприятии информационных систем. Говорится о положительном эффекте, достигаемом при увязке контрактных этапов на верхнем уровне управления с работами исполнителей, а также о возможности использования накопленных данных для уточнения и обоснования характеристик проекта на этапе заключения контрактов. Делаются выводы о целесообразности применения предлагаемого подхода к интеграции систем управления на предприятии.

Ключевые слова: интеграция информационных систем, системы управления предприятием, единое информационное поле, управление проектами, жизненный цикл изделия.

Vestnik SibGAU
Vol. 17, No. 1, P. 50–55

APPROACH FOR DEVELOPMENT OF INTEGRATED INFORMATION CONTROL SYSTEM ON AEROSPACE ENTERPRISES

А. С. Kartamyshev^{1*}, А. В. Murygin²

¹JSC “Information satellite systems” named after academician M. F. Reshetnev”
52, Lenin Str., Zheleznogorsk Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: kartam@iss-reshetnev.ru

In this article we develop causes of occurrence of integration necessity for information systems used on aerospace enterprises. We also show the main tools of product life cycle control and information systems for general enterprise administration. Moreover we define sources of negative influence on administrative reactions quality and represent the decision which can increase control efficiency. The approach to design of the integrated information control system is suggested and its core is described. General aspect of all functional tools is defined to represent it as a link between different information systems. Possibility of development of a new abstract level is described to integrate through it different functional information systems used on the enterprise where the term of work is proposed as a logical integration link. A positive effect of suggested approach for integration of information control system is illustrated. Possibility of classification of all enterprise perform activities by the main manufacturing phases and product structure

belonging is considered by the example of ISS methodical documents. The examples of classifiers developed on the base of ISS normative documents are given and their advantages are explained. Necessity to expanse functional of the project control system which heads the suggested tool which is the base for integration of information systems used on the enterprise is pointed out. A positive effect reached by the contact phase coordination at the top control level with performer activities is discussed and the possibility of accumulated data usage to specify and justify project characteristics at the contract award stage is defined. Conclusions about usage practicability of suggested approach to enterprise control system integration are made.

Keywords: information system integration, enterprise control systems, uniform information field, project control, product life cycle.

Введение. Предприятия ракетно-космической отрасли (РКО) отличаются от предприятий, производящих продукцию массового спроса, рядом характеристик [1]. Большой объем научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, единичное производство, во многих случаях отсутствие стандартных техпроцессов и трудно нормируемые работы интеллектуального характера не позволяют использовать в управлении предприятием предлагаемые на рынке готовые информационные системы комплексной автоматизации. Современные российские предприятия РКО являются конкурентоспособными во многом за счет собственной модели управления, разрабатываемой внутри самих предприятий. Инструментами же, поддерживающими принятую модель управления, являются адаптированные под нее функциональные информационные системы, которые с развитием технических возможностей постоянно модернизируются, и во многих случаях независимо друг от друга. В нынешних реалиях, с повсеместным сокращением затрат и переходом к принципам управления бережливым производством, требуется постоянное наличие актуальной и непротиворечивой информации о состоянии всех проходящих на предприятии процессов [2]. Для этого необходимо разрабатывать способы и подходы к интеграции различных инструментов для формирования единого информационного пространства.

Предпосылки создания комплексной информационной системы управления предприятием. В управлении современным предприятием ракетно-космической отрасли задействовано множество информационных систем, ориентированных на сопровождение определенных видов деятельности. Часто эти системы существуют на различных уровнях управления и не имеют между собой интеграционных связей, а исполнители, работающие в них, вводя и поддерживая только свою информацию, не знают и не учитывают влияющих факторов из других информационных источников. Функциональная структура управления способствует развитию на предприятиях различных инструментов, поддерживающих на приемлемом уровне для конкретного процесса необходимый объем информации. Как правило, эти информационные системы работают автономно, со своей нормативной и справочной информацией и созданы с применением различных технологий и способов хранения данных [3]. Если в информационной системе, поддерживающей какой-либо процесс, требуется информация из других учетных систем, то, как правило, для их интеграции используются различные отчетные формы, подготовленные в предыдущих процессах. Эти входные данные загружаются вручную

либо через программы-загрузчики. При такой технологии работы с информацией затруднены, а в некоторых случаях невозможно влиять на предшествующие процессы, протекающие в другом информационном поле и поддерживаемые другими функциональными подразделениями [4].

Основным инструментом для разработки космической техники на предприятиях РКО являются системы автоматизированного проектирования (САПР), где создается цифровая модель изделия, состоящая из огромного количества деталей сборочных единиц. Ввиду повышенной сложности функционала таких систем, они являются покупными, и как правило – у иностранных производителей. После проектирования деталей, узлов оформляется рабочая документация, которая хранится определенным образом в системах электронного архива и передается в систему управления производством для планирования процесса изготовления материальной части. Помимо собственного производства при создании космической техники задействованы многочисленные контрагенты, выполняющие для предприятия определенные услуги, а также поставщики материалов и покупных изделий. Для управления этими процессами используются уже системы складского учета, управления закупками, взаимоотношениями с контрагентами и т. п. Перечисленные информационные системы, представленные на рис. 1, относятся к непосредственной разработке и созданию готового изделия на предприятиях РКО, их можно отнести к уровню исполнителей. По ним отслеживается жизненный цикл продукции.

Помимо упомянутых выше инструментов, для общего управления предприятием используются информационные системы экономического планирования и бюджетирования, управления финансами, учета и подготовки кадров, управления рисками и т. п. [5]. Учитывая позаказный, часто штучный, тип производства и особенности рассматриваемых предприятий, необходимым является использование системы управления проектами с функциями распределения ресурсов, а также связанной с ней системы контроля и исполнения поручений. В свою очередь, хозяйственная деятельность любого предприятия учитывается в системе бухгалтерского учета, который является основанием для всех форм отчетности и уплаты обязательных платежей во все государственные структуры. Такой набор основных информационных систем задействован в процессе управления российскими предприятиями РКО. Различная функциональная принадлежность этих систем, различные объекты учета в них, отсутствие унифицированного подхода к анализу информации негативно влияют на качество управленческих решений на всех уровнях руководства.

Для повышения качества и эффективности оперативного управления предприятием требуются автоматизированные информационные системы управления технологическими процессами, позволяющие организовывать последовательную их увязку по иерархическим уровням с возможностью накапливать и анализировать информацию в единой системе сбора и обработки данных. Для оптимальных и взвешенных решений необходимо иметь единое информационное поле структурированных данных, которые можно будет анализировать с различных точек зрения [6]. Первым и наиболее простым решением описанной проблемы будет покупка или создание продукта комплексной автоматизации, в котором учтены все нюансы жизнедеятельности предприятия. Этот способ теоретически прост, но практически для российских предприятий РКО ввиду их особенностей почти невозможен [7]. Вторым способом может стать интеграция существующих информационных систем между собой и упорядочивание информации по необходимым критериям [6].

Подход к созданию интегрированной информационной системы управления предприятием. Для организации единого источника информации с актуальными и непротиворечивыми данными необходимо

определить общую составляющую во всех функциональных инструментах и представить её в виде связки между различными информационными системами. Определив логическую интеграционную связь, появляется возможность создать новый абстрактный уровень, служащий для интеграции через него готовых информационных систем, используемых на предприятии [8]. Для предприятий РКО в качестве такой интеграционной составляющей можно использовать понятие работы или задачи, выполняемой исполнителем для получения какого-то результата. Понятие «работа» может обладать множеством характеристик, некоторые из которых, необходимые для последующего анализа, будут упорядочиваться в едином хранилище базы данных, а результаты работ и попутная информация о её свойствах будут доступны в своих функциональных системах. При такой организации данных на новом уровне абстракции формируется подготовленное к всестороннему анализу информационное поле, а если требуется дополнительная информация об объекте исследования, её можно добыть по организованной ссылке из соответствующих источников [6; 8; 9]. Центральный узел информационной системы представлен на рис. 2.



Рис. 1. Основные инструменты управления жизненным циклом создания продукции

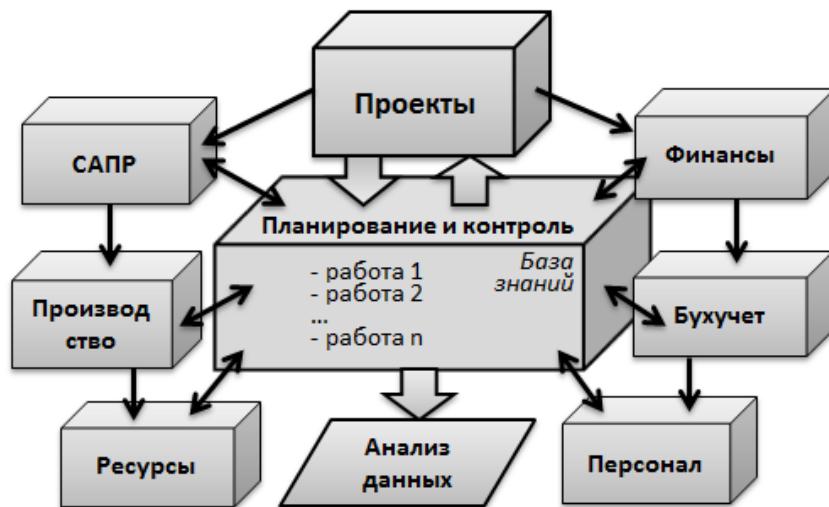


Рис. 2. Центральный узел информационной системы предприятия

Как правило, задания и поручения для отделов исполнителей на предприятиях РКО формируются на верхнем уровне управления, а взаимодействие с исполнителями осуществляется через «бумажный» документооборот: это рабочие планы, служебные записки, оперативные задания и т. п. При использовании в менеджменте предприятий информационных систем по управлению проектами несвязанных программным образом с инструментами исполнителей, отсутствует возможность автоматически получать данные о ходе выполнения работ с нижних уровней, возникают информационные разрывы, приводящие к снижению качества и своевременности управленческих решений [10]. Перечисленные проблемы послужили толчком к разработке нового подхода к созданию информационной системы управления предприятием, суть которого заключается в создании абстрактного уровня структурированных и непротиворечивых данных о работах или процессах, поддерживающих в свойственных им функциональных системах.

Для логической увязки работ между различными информационными системами управления предлагается использовать отраслевые справочники. Так, для предприятий РКО все основные работы можно классифицировать на основные этапы по созданию космической техники, определенные в собственных методических документах. Например, для АО «ИСС» в методических документах учтены все стадии производства, от общего менеджмента и проектирования до утилизации готового изделия [11; 12]. В табл. 1 представлен пример, демонстрирующий суть справочника основных стадий выполнения работ для предприятий РКО.

Само изделие можно детализировать на стандартные или приравненные к ним составные части, упорядочив их таким образом по дереву состава изделия. Сам справочник состава изделия может быть обобщающим для многих разновидностей выпускаемой продукции и иметь необходимую для анализа множества работ, с учетом отраслевой специфики, детализацию [11; 12]. Пример, демонстрирующий суть организации справочника обобщенного состава спутниковой системы, представлен в табл. 2.

Таблица 1

Стадии выполнения работ

Код	Обозначение	Наименование
01	М	Менеджмент
01.01	М.ТР	Выпуск технических решений, план-графиков, приказов, оперативных заданий и др.
01.02	М.Д	Заключение договоров, дополнительных соглашений
01.03	М.ТС	Проведение технических совещаний различного уровня
02	НИР	Научно-исследовательские работы
02.01	НИР.ИД	Выпуск исходных данных на проведение НИР
02.02	НИР.ПП	Выпуск план-проспекта отчета по НИР, проведение НИР
02.03	НИР.О	Выпуск отчета по НИР
03	АП	Аванпроект (техническое предложение)
04	ЭП	Эскизный проект
05	РД	Разработка рабочей документации на опытные изделия, макеты
06	МИ	Изготовление макетов и опытных изделий
06.01	МИ.ТПП	Технологическая подготовка производства
07	ОИ	Изготовление опытных изделий и корректировка РД
08	ЛИ	Летные испытания
09	ПД	Подготовка документации на изделия серийного производства
10	СИ	Подготовка и освоение серийного производства
10.01	СИ.ПП	Подготовка производства серийных изделий
10.02	СИ.ОП	Освоение производства серийных изделий
10.03	СИ.Из	Изготовление серийных изделий
10.04	СИ.И	Испытания серийных изделий
10.05	СИ.КД	Корректировка документации серийных изделий
11	11	Ввод в эксплуатацию
12	12	Эксплуатация
13	13	Утилизация

Таблица 2

Обобщенный состав спутниковой системы

Код	Обозначение	Наименование
1	СС	Спутниковая система
1.1	КС	Космический сегмент
1.1.1	РКК	Ракетно-космический комплекс
1.1.1.01	РН	Ракета-носитель
1.1.1.02	РБ	Разгонный блок
1.1.1.03	КА	Космический аппарат
1.1.1.03.01	КА.ПН	Полезная нагрузка

Код	Обозначение	Наименование
1.1.1.03.01.01	КА.ПН.БРТР	Бортовой ретранслятор
1.1.1.03.01.01.01	КА.ПН.БРТР.ЦА	Целевая аппаратура
1.1.1.03.01.01	КА.ПН.БРТР
1.1.1.03.01.02	КА.ПН.АФУ	Антенно-фидерные устройства
1.1.1.03.01.02.01	КА.ПН.АФУ.СБ	АФУ в сборе
.....
1.1.1.03.02	КА.СС	Служебные системы
1.1.1.03.02.01	КА.СС.БКУ	Бортовой комплекс управления
.....

Справочники организованы в древовидной форме, что предоставляет возможность анализировать создаваемый объем работ по разным уровням детализации состава изделия, а также разделять работы по их принадлежности к различным видам и подвидам. Маркируя работы в центральном информационном узле ссылками на состав и стадию работ, появляется возможность оперативно и с высокой степенью уверенности управлять как жизненным циклом продукции по конкретным проектам, так и загрузкой всего предприятия с учетом ограниченности в ресурсах. Инструмент управления проектами в описываемом подходе играет первоочередную роль, так как именно в нем, на верхнем уровне менеджмента, рождаются обобщающие работы с привязкой к описанным справочникам [13]. В дальнейшем, на рабочих местах исполнителей они детализируются и уточняются по справочной классификации, тем самым выстраивая деревья работ по различным элементам состава изделия.

Стоимостные показатели работ становятся основанием для систем экономического планирования и бюджетирования [14–16], что дает возможность организации на предприятии точного целевого финансирования, требуемого основными государственными заказчиками. Увязка работ от контрактного этапа до непосредственного исполнителя позволит находить ответы на любые вопросы управляющих организаций и заказчиков. Вовлеченность исполнителей в планирование и контроль работ позволяет составлять более точные рабочие планы, оперативно влиять на изменения как внешней, так и внутренней среды, тем самым повышая качество управления предприятием. Накопленная статистика с заданной детализацией может использоваться для расчета технико-экономического обоснования на этапах заключения контрактов.

Заключение. Предложенный в статье подход к созданию интегрированной информационной системы позволяет пошагово, не изменяя привычные инструменты работы исполнителей, создать новую информационную систему в качестве центрального узла, связанного со всеми учетными системами в едином информационном пространстве. Внедрение этой системы повысит прозрачность в планировании и контроле над работами, а также качество и эффективность в сфере управления предприятием.

Библиографические ссылки

1. Богатырев В. Д., Иноzemцев В. В. Интеграция стратегического и тактического уровней управления

финансированием на предприятии ракетно-космической отрасли. Самара, Вектор науки ТГУ № 1 (31). 2015, С. 71–77.

2. LEAN. Бережливое производство [Электронный ресурс]. URL: <http://www.up-pro.ru/shop/lean.html> (дата обращения: 17.09.2015).

3. Camarinha-Matos L. M., Afsarmanesh H. Designing the Information technology Subsystem for enterprise Integration [Электронный ресурс] URL: <http://www.uninova.pt/cam/is/EnterIntegr.pdf> (In En) (дата обращения: 20.12.2014).

4. Картамышев А. С., Негляд Е. В. Проблематика систем управления на предприятиях аэрокосмической отрасли // Вестник СибГАУ. 2014. № 4(56). С. 276–281.

5. Электронная библиотека. Жизненный цикл изделия [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Жизненный_цикл_изделия (дата обращения: 28.08.2015).

6. Ладыженский Г. Интеграция приложений такая, как она есть [Электронный ресурс] URL: <http://citforum.ru/gazeta/50/> (дата обращения: 10.09.2015).

7. Кочетов А. Г. Новационные бизнес-процессы. Пошаговая технология разработки, внедрения и контроля выполнения. М. : Эксмо, 2009. 144 с.

8. Доброльский А. Интеграция приложений: методы взаимодействия, топология, инструменты // Открытые системы. СУБД. 2006. № 9. 96 с.

9. ГОСТ Р ИСО 10303-239–2008. Системы организации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. М. : Стандартинформ, 2009. 154 с.

10. Бармаков Б. П. Актуальные проблемы в управлении отечественными предприятиями [Электронный ресурс]. URL: www.finexpertiza.ru/articles/actual_problems (дата обращения: 20.07.2014).

11. Положение о планировании, контроле и отчетности в акционерном обществе «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» АО «ИСС». Железногорск. 2013. 68 с.

12. Матрица кодирования основных этапов работ по созданию спутниковых систем связи, навигации, геодезии и специального назначения / АО «ИСС». Железногорск. 2007. 59 с.

13. КЭЛС-центр [Электронный ресурс]. URL: www.calscenter.ru (дата обращения: 10.10.2015).

14. Хруцкий В. Е., Гамаюнов В. В. Внутрифирменное бюджетирование: настольная книга по постановке финансового планирования. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Финансы и статистика, 2006. 464 с.

15. Лашев Е., Митрофанова Е., Рузаева Э. Бюджетирование: руководство к действию. М. : Акционерная компания «Медиа», 2010. 144 с.

16. Кондратьев В. В., Кузнецов М. Н. Показываем бизнес-процессы. М. : Эксмо, 2007. 352 с.

References

1. Bogatyrev V. D., Inozemsev V. V. [Integration of strategic and tactical levels of finance management at space-rocket enterprise]. *Vektor nauki TGU*. 2015, No. 1(31), P. 71–77 (In Russ.).
2. LEAN. Berezhlivoe proizvodstvo. [LEAN. Lean production]. Available at: <http://www.up-pro.ru/shop/lean.html> (accessed date 17.09.2015).
3. Luis M. Camarinha-Matos, Hamideh Afsarmanesh. Designing the Information technology Subsystem for enterprise Integration. Available at: <http://www.uninova.pt/cam/is/EnterIntegr.pdf> (accessed 20.12.2014).
4. Kartamyshev A. S., Neglyad E. V. [Problems of control systems at the enterprises of aerospace branch]. *Vestnik SibGAU*. 2014, No. 4(56), P. 276–281 (In Russ.)
5. Elektronnaya biblioteka. Zhiznennyj tsikl izdelya [Digital library. Product life cycle]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/bereglivoe_proizvodstvo/ (In Russ) (accessed date 28.08.2015).
6. Ladyzhenskiy G. Integratsiya prilozheniy takaya, kak ona est'. [Application integration as it is]. Available at: <http://www.citforum.ru/gazeta/50/> (In Russ) (accessed: 10.09.2015).
7. Kochetov A. G. Novatsionnye biznes-protsessy. Poshagovaya tekhnologiya razrabotki, vnedreniya i kontrolya vypolneniya. [Novation business processes. Step-by-step technology of development, introduction and control of performance]. Moscow, Eksmo Publ., 2009. 144 p.
8. Dobrovolskiy A. [Application integration: cooperation methods, topology, tools]. *SUBD*. 2006, No. 9, 96 p. (In Russ.).
9. GOST P ISO 10303-239–2008 Sistemy organizatsii proizvodstva i ikh integratsiya. Predstavlenie dannikh ob izdelii i obmen etimi dannimi [State Standard P ISO 10303-239–2008 Manufacturing organization systems and their integration. Product data presentation and these data exchange]. Moscow, Standartinform Publ., 2009. 10 p.
10. Barmakov B. P. Aktualnye problemy v upravlenii otechestvennymi predpriyatiyami [Current problems in the management of Russian enterprises]. (In Russ). Available at: www.finexpertiza.ru/articles/actual_problems/ (accessed 20.07.2014).
11. Polozhenie o planirovani, kontrole i otchetnosti v otkritom aktsionernom obshchestve "Informatsionnie sputnikovye sistemy" imeni akademika M. F. Reshetneva". [Statute of planning, control and reports at the joint-stock company Information Satellite Systems named after M. F. Reshetnev]. Zheleznogorsk, JSC "ISS", 2013, 68 p.
12. Matritsa kodirovaniya osnovnykh etapov rabot po sozdaniyu sputnikovikh sistem svyazi, navigatsii, geodezii i spetsial'nogo naznacheniya. [Scrambling matrix of the main working stages for satellite communication system development, navigation, geodesy and special appointment]. Zheleznogorsk, JSC "ISS", 2007, 59 p.
13. KELS-tsentr [Kelsey center]. Available at: www.calscenter.ru (accessed 10.10.2015).
14. Hrutckiy V. E., Gamayunov V. V. Vnutrifirmennoe budzhetirovanie: Nastol'naya kniga po postanovke finansovogo planirovaniya 2-e isd., pererab. i dop. [Budgeting in the firm: Handbook on the formulation of planning. 2 revised and enlarged edition]. Moscow, Finance and Statistics Publ., 2006, 464 p.
15. Lashhev E., Mitrofanova E., Ruzaeva E. Budzhetirovanie rukovodstvo k dejstviyu. [Budgeting guide to action] Moscow, Action-Media Publ., 2010, 144 p.
16. Kondratiev V. V., Kuznetcov M. N. Pokazyvaem biznes-protsessy [Show business processes]. Moscow, Eksmo Publ., 2007, 352 p.

STOCHASTIC NETWORK EQUILIBRIUM SEARCH WITH APPLICATIONS IN THE GAS TRANSPORTATION MODEL OF RUSSIA

A. V. Kolosnitsyn

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS
130, Lermontov Str., Irkutsk, 664033, Russian Federation
E-mail: ankolos25@mail.ru

We suggest an equilibrium search methodology under uncertainty conditions using the example of gas transportation model of Russia. This model includes gas producers and consumers that are joined by the network. Two-stage approach to finding the network equilibrium is described in details. For the first stage we investigate the method of demand and supply functions forming for gas consumers and producers that let us to find the equilibrium price as well as production and consumption volumes of gas. On the second stage we formulate a problem of finding the optimal plan of gas transportation with the network constraints. Then we add to our model the case of demand uncertainty and state a problem of finding the stochastic equilibrium in the gas transportation model. Gas production volume and price which provide demand satisfaction with specified probability is determined in our model. Described method of finding the stochastic equilibrium is applied to the gas transportation model of Russia. Results of numerical calculations are also given in this paper.

Keywords: stochastic equilibrium, network model, chance constraints convex optimization problem.

Вестник СибГАУ
Том 17, № 1. С. 56–61

ПОИСК ТРАНСПОРТНОГО СТОХАСТИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ С ПРИЛОЖЕНИЯМИ В ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ МОДЕЛИ РОССИИ

А. В. Колосницын

Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН
Российская Федерация, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130
E-mail: ankolos25@mail.ru

Рассматривается поиск равновесия в условиях неопределенности на примере сетевой газотранспортной модели России. Модель включает в себя поставщиков и потребителей природного газа, объединенных сетью транспортных линий. Подробно описывается двухэтапный подход к поиску сетевого равновесия. Для первого этапа разбирается способ формирования функций спроса и предложения для потребителей и поставщиков газа, а также поиск равновесной цены, объемов производства и потребления газа. На втором этапе ставится задача определения оптимального плана транспортировок газа с учетом сетевых ограничений. Рассматривается случай неопределенности спроса, и ставится задача поиска стохастического равновесия в газотранспортной модели. Определяются объемы производства и цена на газ, которые обеспечивают удовлетворение спроса с заданной вероятностью. Описанная методика поиска стохастического равновесия применяется к газотранспортной модели России. Приводятся результаты численных расчетов.

Ключевые слова: стохастическое равновесие, сетевая модель, задача выпуклой оптимизации с ограничениями по вероятности.

Introduction. We consider a gas network system in conditions of deregulated operation. This means that we have to take into account different (not necessarily antagonistic) aims of the participants of the system. The below suggested model is based on game-theoretical approach (see also [1]). The key point is consideration of stochastic gas demand uncertainty. In general, uncertainty is one of the main problems in energy system modelling [2]. We assume that uncertainty has stochastic nature, i. e. all uncertain parameters are random variables with known

distributions. Different approaches are used for studying games with stochastic uncertainty. In [3] authors base their investigations on Markov chains and stochastic dynamic programming. Random variational inequalities are used for finding the Wardrop traffic equilibria in [4]. Among other interesting and relevant topics the following can be mentioned: stochastic differential equations [5], stochastic Stackelberg games [6], generalization of the maxmin strategy [7; 8], stochastic Cournot models [9], two-stage stochastic programming model [10]. In our

approach we use standard stochastic programming technique [11; 12] and basic knowledge of probability theory [13]. Recent investigation concerning the paper topic can be found in [14] and [15].

The standard transportation model that joins gas producers and consumers and takes into account network constraints is considered. Minimizing total network costs, we obtain optimal gas transportation plan as a solution of the following mathematical programming problem:

$$\min \left\{ \sum_{j=1}^n c_j(x_j), \quad Ax = b, \quad -d \leq x \leq d \right\}. \quad (1)$$

Here A is an $m \times n$ incidence matrix, which defines relations between m nodes and n transportation lines; x_j – volume of the gas, transporting on the line j ; $c_j(x_j)$ – transportation costs; b_i – volume of the gas production or consumption in the node i ; d_j – capacity of the line j .

Two stage approach to finding the network equilibrium. We assume that the considering model reflects operation in the market conditions. It means that supply and demand functions are given in every production and consumption node respectively. Having that data, we can build total demand and supply functions that let us to find an equilibrium price, production and consumption volumes of gas in corresponding nodes.

Let I_p be node set of producers, I_c – node set of consumers, I_0 – set of the branching nodes. Production costs have nonlinear structure in general and for our purposes we represent it as the quadratic functions that practically appropriate:

$$z_i(b_i) = \alpha_i b_i^2 + \beta_i b_i + \gamma_i, \quad i \in I_p, \quad (2)$$

where $\alpha_i > 0$, $\beta_i > 0$, $\gamma_i > 0$, $i \in I_p$ – specified constants.

Consumption linearly depends on market price p :

$$b_i(p) = k_i - r_i p, \quad i \in I_c,$$

where $k_i > 0$, $r_i > 0$, $i \in I_c$ – specified constants. The following explanation can be given here to make justification to introduced functions representations. Production cost form is our assumption as the model designer, whereas consumption function form is standard assumption that reflects inverse dependency of the consumption volume from the price level.

In the branch nodes we have $b_i = 0$, $i \in I_0$.

One can naturally suppose that producers maximize their profit:

$$\begin{cases} pb_i - \alpha_i b_i^2 - \beta_i b_i - \gamma_i \rightarrow \max, \\ \underline{b}_i \leq b_i \leq \bar{b}_i, \quad i \in I_p, \end{cases} \quad (3)$$

where p – market price on the product. Then using (2), (3) we can build supply function of every producer:

$$b_i^*(p) = \begin{cases} \underline{b}_i, & p < 2\alpha_i \underline{b}_i + \beta_i, \\ \frac{p - \beta_i}{2\alpha_i}, & 2\alpha_i \underline{b}_i + \beta_i \leq p < 2\alpha_i \bar{b}_i + \beta_i, \\ \bar{b}_i, & p \geq 2\alpha_i \bar{b}_i + \beta_i, \quad i \in I_p. \end{cases} \quad (4)$$

Total supply equals to

$$S(p) = \sum_{i \in I_p} b_i^*(p). \quad (5)$$

Total demand function equals to

$$D(p) = \sum_{i \in I_c} b_i = \sum_{i \in I_c} (k_i - r_i p) = \sum_{i \in I_c} k_i - p \sum_{i \in I_c} r_i.$$

Intersection point of total supply and demand functions defines an equilibrium price p^* , which is set on the market of gas production and consumption:

$$p^* : S(p^*) = D(p^*). \quad (6)$$

We consider (6) as the key condition in defining the state of the network equilibrium in the represented model. Situation on the market of gas production and consumption in which total volume of production equals to the total volume of consumption taking into account network constraints will be understood to be the network equilibrium.

Note that considering market conditions it is quite reasonable to divide searching the network equilibrium into two stages. On the first stage we find equilibrium market price and also equilibrium volumes of gas production and consumption. To do this we need to implement next sequence of steps:

1. Considering gas production costs build supply function of each gas producer in the form of (4).
2. Build total supply function $S(p)$.
3. Build total demand function $D(p)$.
4. Using the relation (6) find the equilibrium price p^* .
5. Determine equilibrium volumes of gas production for each provider:

$$b_i^* = b_i^*(p^*), \quad i \in I_p.$$

6. Determine equilibrium volumes of gas demand for each consumer:

$$b_i^* = k_i - r_i p^*, \quad i \in I_c.$$

On the second stage we optimize gas transportation volumes considering throughput of each transport line and demand satisfaction in every consumption node. We can represent mathematical model of this problem in the next form:

$$\begin{cases} c(x) \rightarrow \min, \\ a^i x = b_i^*, \quad i \in I_p, \\ a^i x = -b_i^*, \quad i \in I_c, \\ a^i x = 0, \quad i \in I_0, \\ -d \leq x \leq d, \end{cases} \quad (7)$$

where b_i^* , $i = 1, \dots, m$ – equilibrium volumes of gas production and consumption that were obtained on the first stage. Solution of the problem (7) is optimal plan of gas transportation in the market conditions with network constraints.

Network equilibrium with demand uncertainty. Sometimes we can come across the difficulty in determination of consumers demand functions. In this case we can consider its uncertainty.

In our model demand functions have the form $b_i = k_i - r_i p$, $i \in I_c$. Now let the parameters k_i and r_i be random variables with normal distribution and known expectations and variances. Hence, $b_i(p)$, $i \in I_c$ and $D(p)$ become random variables as well with normal distribution. This representation of demand function includes a particular case, when parameters $r_i = 0$, $i \in I_c$. Then demand value of each consumer will be determined by the random variable k_i , $i \in I_c$ with normal distribution.

In the uncertainty conditions we can set the problem of searching such price and corresponding gas production volumes that provide satisfaction gas consumption with the probability not less than given positive constant δ . It means that we move to finding stochastic equilibrium in our model. We can write this condition formally in the next form:

$$P\{S(p) - D(p) \geq 0\} \geq \delta. \quad (8)$$

We can rewrite (8) as $F(S(p)) \geq \delta$, where $F(S(p))$ – is the distribution function of the random variable $D(p)$ with fixed price.

It is well known that the probability of random variable realization from the interval $(0, x)$ can be found using Laplace function [13]:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-z^2/2} dz.$$

To use Laplace function we need to normalize the random variable $D(p)$, that is count expression $(S(p) - M[D(p)]) / \sqrt{\Delta[D(p)]}$, where $M[D(p)]$ and $\Delta[D(p)]$ – are expectation and variance of the random variable $D(p)$ accordingly.

Using Laplace function we have

$$\Phi(S(p)) = \Phi\left(\frac{S(p) - M[D(p)]}{\sqrt{\Delta[D(p)]}}\right) \geq \delta, \quad (9)$$

transform the expression (9):

$$\begin{aligned} S(p) - M[D(p)] &\geq S_\delta \sqrt{\Delta[D(p)]}, \\ \text{or } S(p) &\geq M[D(p)] + S_\delta \sqrt{\Delta[D(p)]}, \end{aligned}$$

where $S_\delta : F(S_\delta) = \delta$.

Total demand will be entirely satisfied with the probability not less than δ with the price $\tilde{p} : S(\tilde{p}) = M[D(\tilde{p})] + S_\delta \sqrt{\Delta[D(\tilde{p})]}$.

Following the two stage approach of finding the stochastic equilibrium in describing model, now we need to solve gas transportation problem, using the obtained price and gas production volume. For this purpose it is quite convenient to use statement of the convex programming problem with chance constraints [11; 12]:

$$\begin{cases} \sum_{i \in I_c} (S_\delta - S_{\delta_i})^2 \rightarrow \min, \\ a^i x = b_i^*(\tilde{p}), \quad i \in I_p, \\ P\{-a^i x \geq b_i(\tilde{p})\} \geq \delta_i, \quad i \in I_c, \quad \delta_i \in (0, 1), \\ a^i x = 0, \quad i \in I_0, \\ -y - d \leq x \leq y + d, \\ y \geq 0. \end{cases} \quad (10)$$

Here on the one hand, expressions $P\{-a^i x \geq b_i(\tilde{p})\} \geq \delta_i$, $i \in I_c$ – are chance constraints, reflecting the requirement of demand satisfaction in each consumption node with the determine probabilities δ_i , $i \in I_c$ and with fixed price \tilde{p} . On the other hand, this constraints may be considered as distribution functions of the random variables $b_i(\tilde{p})$, $i \in I_c$.

It is important to note that for each consumption node the probability of demand satisfaction differs from the probability which is set on the first stage problem. It is related with weaker condition of demand satisfaction for whole model in general in comparison with the condition of demand satisfaction for each consumption node with the same probability. In order to find probabilities of demand satisfaction in every consumption node, we consider δ_i , $i \in I_c$ to be the variables, that we try to approximate to the probability of demand satisfaction of the first stage problem as close as possible. Note that throughput constraints may prevent us from obtaining the solution of the problem (10), that is why we add variables y_j , $j = 1, \dots, n$, which give us the possibility to broaden throughput of transport lines if it is necessary.

After determination of the values δ_i , $i \in I_c$, we can use the Laplace function for moving to the determine equivalent in the next form:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n c_j(x_j) + \sum_{j=1}^n h_j y_j \rightarrow \min, \\ a^i x = b_i^*(\tilde{p}), \quad i \in I_p, \\ -a^i x \geq \bar{b}_i, \quad i \in I_c, \\ a^i x = 0, \quad i \in I_0, \\ -y - d \leq x \leq y + d, \\ y \geq 0, \end{cases} \quad (11)$$

where $\bar{b}_i = M[b_i(\tilde{p})] + S_{\delta_i} \sqrt{\Delta[b_i(\tilde{p})]}$, $i \in I_c$. Constants h_j , $j = 1, \dots, n$ – are capital costs for broaden transport line j . Solution of the problem (11) is the optimal plan of gas transportation in the market conditions with the demand uncertainty.

Stochastic network equilibrium in the gas transportation model of Russia. Described approach to finding the stochastic equilibrium was applied to gas transportation model of Russia, which includes 70 transport lines and 51 nodes. There are 9 of these nodes that contain gas producers, 41 nodes with consumers and 4 branch nodes (fig. 1).

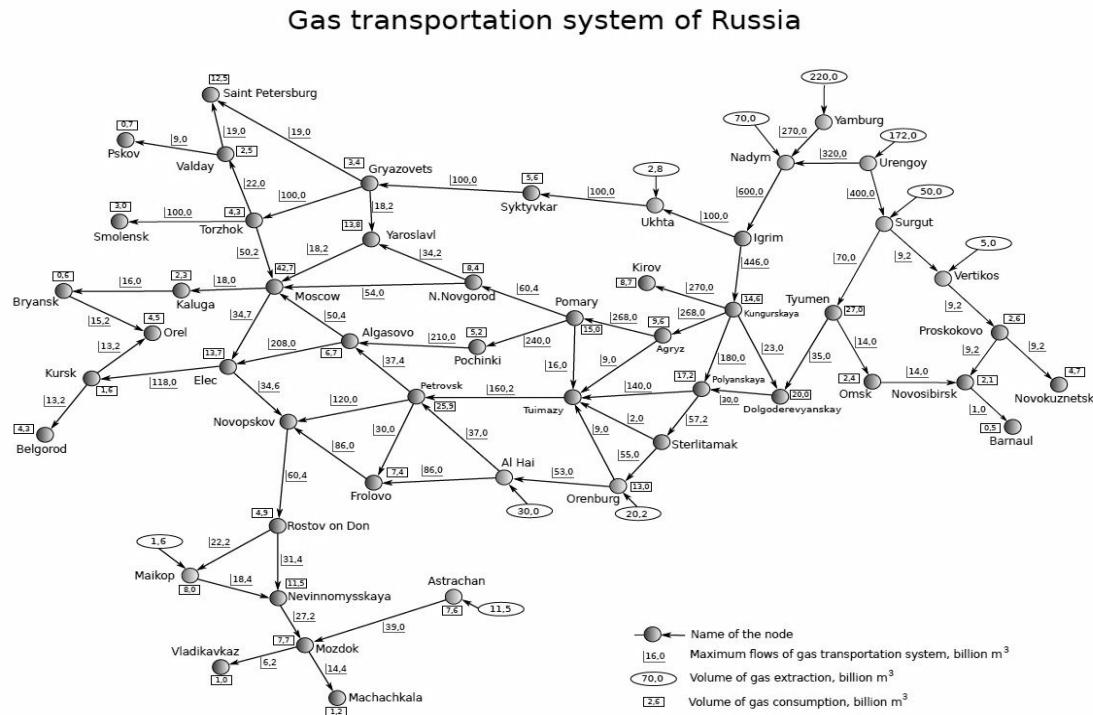


Fig. 1. Gas transportation system of Russia

Basic data of the model let us to set the production cost in the form (2) for every gas producer and build supply functions and total supply function in the form (5).

The demand functions were set for each consumer in two variants. In the first variant we set the deterministic parameters of the demand functions and then we obtained and solved deterministic problem of the finding the network equilibrium. In this case demand functions were formed automatically with using special technique described in [16] by means of solving next mathematical programming problem:

$$\begin{aligned} \sum_{i \in I_p} \alpha_i b_i^2 + \beta_i b_i + \gamma_i &\rightarrow \min, \\ a^i x = b_i & \quad i \in I_p, \\ a^i x = b_i & \quad i \in I_c, \\ a^i x = b_i & \quad i \in I_0, \\ -d \leq x \leq d. \end{aligned} \quad (12)$$

We can define dual variables for equalities $a^i x = b_i$, $i = 1, \dots, m$ from the solution of the problem (12). These variables or shadow prices reflect the resource value for producers and consumers and equal for them out of the problem properties (matrix A is the incidence matrix). Denote this price as \hat{p} . We can assume that the demand elasticity $e = -0.07$ is known (almost inelastic demand). Moreover we know the desirable consumption level from basic data of the model, denote it as \hat{b}_i , $i \in I_c$. To set the consumption functions in the form $b_i(p) = k_i - r_i p$, $i \in I_c$, we need to find parameters k_i and r_i , $i \in I_c$ from the following equations system:

$$\begin{cases} b_i(p) = k_i - r_i(\hat{p}) = \hat{b}_i, & i \in I_c, \\ e = \frac{db_i(p)}{dp} \frac{p}{b_i(p)}. \end{cases} \quad (13)$$

For instance we need to deliver 27 units of gas to Tyumen, elasticity of demand equals -0.07 and shadow price obtained from problem (12) equals 44.3 conventional units. Use the system (13):

$$\begin{cases} b_1(44.3) = k_1 - 44.3 r_1 = 27, \\ -0.07 = \frac{-r_1 p}{k_1 - r_1 p}. \end{cases}$$

Finally we get $k_1 = 28.89$ and $r_1 = 0.043$. Consumption function in Tyumen equals to $b_1(p) = 28.89 - 0.043p$.

Second variant of our gas system modeling included stochastic uncertainty of the demand functions that led to another solution of the stochastic network equilibrium problem. Both variants of problems were solved using program complex GAMS [17], the results are demonstrated in the fig. 2, where it is showed how demand uncertainty influence the main parameters of our model.

We obtained the following results for deterministic model: $S(p) = D(p) = 354.3$ billions m^3 , price for billion m^3 of gas equals to 33.9 conventional units. For stochastic model we set the level of demand satisfaction with the probability equals to 90 % and we got $S(p) = 370.4$ billions m^3 and price equals to 36.7 conventional units. As we can see, considering demand uncertainty increase the price, supply of the gas and the network load in the transport model. We received 4.5 % of the price growth, 8.3 % of the supply volume growth and 37.5 % of the network load growth under uncertainty conditions with the 90 % of demand satisfaction probability (fig. 2).

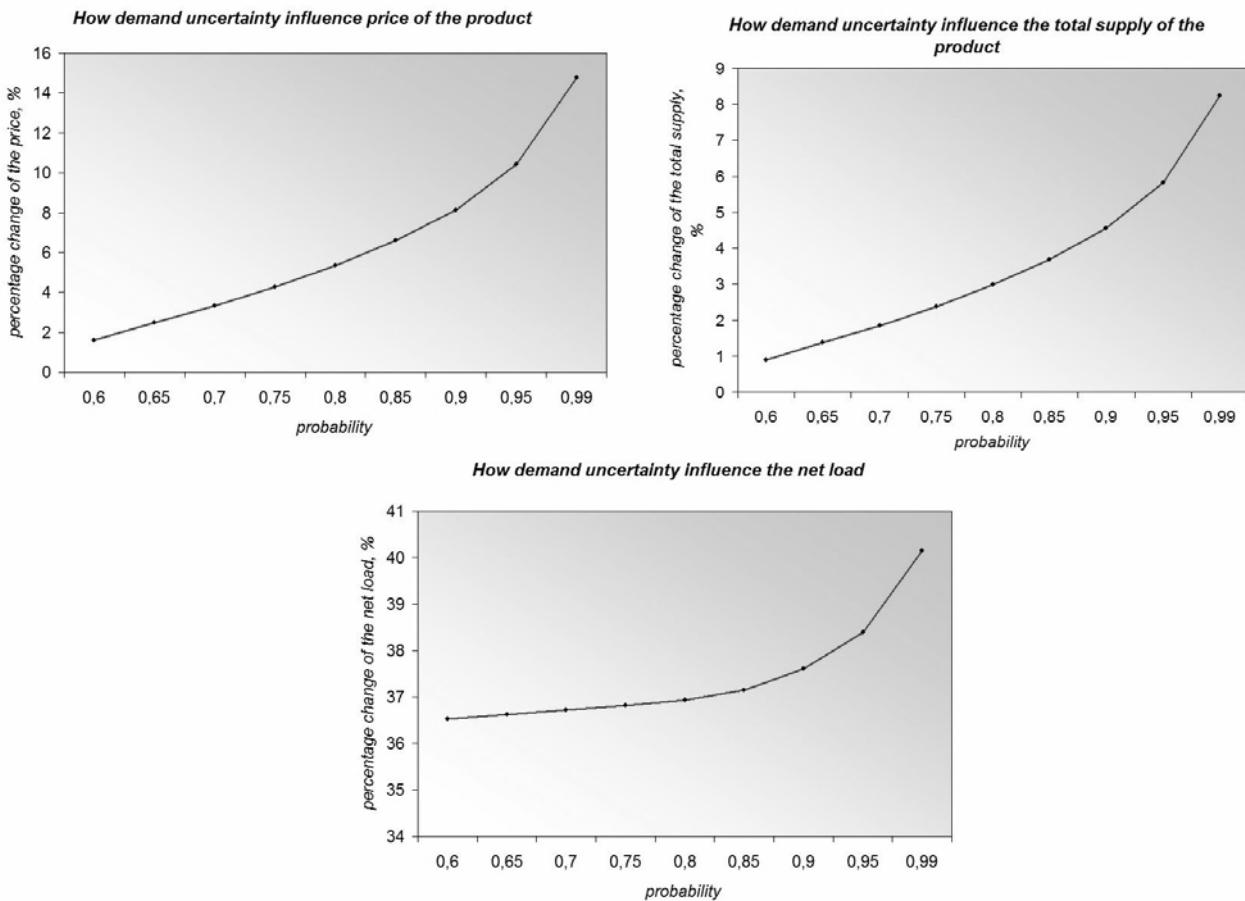


Fig. 2. How demand uncertainty influence the main parameters of the model

Conclusion. We represented the methodology of the finding of stochastic network equilibrium with specified probability level for natural gas demand volumes. Our approach consists of two stages. On the first stage we defined the equilibrium volumes of natural gas consumption and supply and equilibrium price. On the second stage we obtained the optimal plan of gas transportation. To consider the gas consumption uncertainty we modified our two-stage approach to finding the network equilibrium and obtained problem statement for finding the stochastic network equilibrium that included convex programming problem with chance constraints. This problem was solved by program complex GAMS. Our method of finding the stochastic network equilibrium was successfully applied to the gas transportation model of Russia.

Acknowledgments. This work was supported by the grant of RFBR № 15-07-08986.

Благодарности. Работа поддержана грантом РФФИ № 15-07-08986.

References

- Klassen G., Kryazhimskii A. V., Tarasyev A. M. Multiequilibrium game of timing and competition of gas pipeline projects. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 2004. Vol. 120, No. 1, P. 147–179.
- Weber C. Uncertainty in the electric power industry: methods and models for decision support. Springer, 2005, 291 p.
- Bonnans J. F., Cen Z., Christel T. Energy contract management by stochastic programming technique. *Annals of Operations Research*, 2012, Vol. 200, P. 199–222.
- Gwinner J., Racity F. Some equilibrium problems under uncertainty and random variational inequalities. *Annals of Operations Research*, 2012, Vol. 200, P. 299–319.
- Bensoussan A., Frehse J. Stochastic games for N players. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 2000, Vol. 105, No. 3, P. 534–565.
- Evgrafov A., Patriksson M. On the existence of solutions to stochastic mathematical programs with equilibrium constraints. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 2004, Vol. 121, No. 1, P. 65–76.
- Zhukovskiy V., Kudryavtsev K. [Equilibrating conflicts under uncertainty. I. Analogue of a saddle-point]. *Matematicheskaya teoriya igr i eye prilozheniya*. 2013, Vol. 5(1), P. 27–44 (In Russ.).
- Zhukovskiy V., Kudryavtsev K. [Equilibrating conflicts under uncertainty. II. Analogue of a maximin]. *Matematicheskaya teoriya igr i eye prilozheniya*. 2013, Vol. 5(2), P. 3–45 (In Russ.).
- Zhang D., Xu Y., Wu Y. A two stage stochastic equilibrium model for electricity markets with two way contracts. *Mathematical Methods of Operations Research*, 2010, Vol. 71, P. 1–45.
- Shapiro A. Stochastic programming with equilibrium constraints. *Journal of Optimization Theory and Applications*. 2006, Vol. 128, No. 1, P. 223–243.

11. Kall P., Wallace S.W. Stochastic programming. John Wiley & Sons, 1994, 307 p.
12. Judin D. *Matematicheskie metody upravleniya v usloviyakh nepolnoj informatsii* [Mathematical methods of controlling under incomplete information conditions]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1974, 400 p.
13. Gmurman V. *Rukovodstvo k resheniyu zadach po teorii veroyatnostej i matematicheskoj statistike* [Guidance to solving the probability theory and mathematical statistics problems]. Moscow, Vyshaya shkola publ., 1998, 400 p.
14. Dolgov S., Il'kevich N., Rabchuk V. *Upravlenie rezhimami raboty potrebitelj gaza pri narusheniyakh gazosnabzheniya* [Mode control operation of gas consumers in violation of gas supply]. Novosibirsk, "Geo" Academic Publ., 2013, 90 p.
15. Il'kevich N., Dzyubina T., Kalinina Z. H. *Mnogourovnevoe modelirovanie razvitiya sistem gazo-snabzheniya* [Multilevel modeling of gas-supply systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2014, 217 p.
16. Podkval'nikov S. V., Xamisov O. V. [Imperfect Electric Power Markets: Modelling and Investigation of Development of Capacities]. *Izvestiya Akademii Nauk. Energetika*, 2011, No. 2, P. 57–76 (In Russ.).
17. Rosenthal R. GAMS – A user's guide. GAMS development corporation. Available at: www.gams.com (accessed 26.09.2015).
6. Evgrafov A., Patriksson M. On the existence of solutions to stochastic mathematical programs with equilibrium constraints // *Journal of Optimization Theory and Applications*. 2004. Vol. 121, № 1. P. 65–76.
7. Жуковский В. И., Кудрявцев К. Н. Уравновешивание конфликтов при неопределённости. I. Аналог седловой точки // Математическая теория игр и её приложения. 2013. Т. 5, № 1. С. 27–44.
8. Жуковский В. И., Кудрявцев К. Н. Уравновешивание конфликтов при неопределённости. II. Аналог максимина // Математическая теория игр и её приложения. 2013. Т. 5, № 2. С. 3–45.
9. Zhang D., Xu Y., Wu Y. A two stage stochastic equilibrium model for electricity markets with two way contracts // *Mathematical Methods of Operations Research*. 2010. Vol. 71. P. 1–45.
10. Shapiro A. Stochastic programming with equilibrium constraints // *Journal of Optimization Theory and Applications*. 2006. Vol. 128, № 1. P. 223–243.
11. Kall P., Wallace S. W. Stochastic programming. John Wiley & Sons, 1994. 307 p.
12. Юдин Д. Б. Математические методы управления в условиях неполной информации. М. : Советское радио, 1974. 400 с.
13. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М. : Высш. шк., 2002. 479 с.
14. Долгов С. И., Илькевич Н. И., Рабчук В. И. Управление режимами работы потребителей газа при нарушениях газоснабжения / отв. ред. С. М. Сендеров. Новосибирск : Гео, 2013. 90 с.
15. Илькевич Н. И., Дзюбина Т. В., Калинина Ж. В. Многоуровневое моделирование развития систем газоснабжения. Новосибирск : Наука, 2014. 217 с.
16. Подковальников С. В., Хамисов О. В. Несовершенные электроэнергетические рынки: моделирование и исследование развития генерирующих мощностей // *Известия РАН. Энергетика*. 2011. № 2. С. 57–76.
17. Rosenthal R. GAMS. A user's guide. GAMS development corporation [Электронный ресурс]. URL: www.gams.com (дата обращения: 26.09.2015).

Библиографические ссылки

1. Klassen G., Kryazhimskii A. V., Tarasyev A. M. Multiequilibrium game of timing and competition of gas pipeline projects // *Journal of Optimization Theory and Applications*. 2004, Vol. 120, № 1. P. 147–179.
2. Weber C. Uncertainty in the electric power industry: methods and models for decision support. Springer, 2005. 291 p.
3. Bonnans J. F., Cen Z., Christel T. Energy contract management by stochastic programming technique // *Annals of Operations Research*. 2012. Vol. 200. P. 199–222.
4. Gwinner J., Racity F. Some equilibrium problems under uncertainty and random variational inequalities // *Annals of Operations Research*. 2012. Vol. 200. P. 299–319.
5. Bensoussan A., Frehse J. Stochastic games for N players // *Journal of Optimization Theory and Applications*. 2000. Vol. 105, № 3. P. 534–565.

CAD SYSTEM FOR PERSPECTIVE POWER SUPPLY NETWORK DEVELOPMENT TASK SOLUTION

I. A. Kuzmina

Moscow State Technical University named after N. E. Bauman
5, building 1, 2-ya Baymanskaya Str., Moscow, 105005, Russian Federation
E-mail: kuzminainna@yandex.ru

The process of urban power supply network development is connected with need calculation and accounting a large number of parameters, possible development ways and complexity of their assessment. These circumstances require the introduction of new technologies for solving specified task.

Declaration of author's developed computer-aided design system (CAD system) ELNET for the task solution automation of perspective urban power supply network development is presented in article. Description of models, methods and algorithms based in the CAD system are given.

CAD allows to create, correct, calculate parameters, look through and print models of urban power supply networks. ELNET consists of six connected modules: graphic module, control module (dispatcher), input/output module, solutions module, calculations module, reference data base. System possesses the friendly graphical interface allowing ease using.

In CAD ELNET mathematical basis puts designed by author mathematical model of urban power supply network presentation as directed weighted graph and two methods of solving urban power supply network development task: the reduction method to the set of enclosed global minimization tasks and decomposition method. Both methods suggest dividing a given task into three subtasks of smaller dimension: 1. Subtask of definition the number and locations of new substations. 2. Subtask of definition the connection way of new consumers to network. 3. Subtask of definition the optimum connection way of new substations to the existing network.

The optimization algorithms of subtasks solution are realized by the author. For solving subtask 1 three algorithms are designed and realized: algorithm based on the k-averages method; algorithm realizing the method of dividing clustering; heuristic algorithm. For solving subtask 3 three algorithms are also offered: heuristic algorithm of the reduced enumeration; genetic algorithm; algorithm based on constructing Voronoi diagrams. To solve subtask 3 the genetic algorithm is applied.

Technical solutions represented in the article allow reducing time of design and increasing the quality of design decisions.

Keywords: CAD system, modeling, reduction method, decomposition method, urban power distribution network, perspective power supply network development task.

Вестник СибГАУ
Том 17, № 1. С. 62–66

СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГОРОДСКОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

И. А. Кузьмина

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
Российская Федерация, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1
E-mail: kuzminainna@yandex.ru

Процесс проектирования городских распределительных сетей электроснабжения связан с необходимостью расчета и учета большого числа параметров, возможных вариантов развития и сложностью их оценки. Даные обстоятельства требуют внедрения новых технологий для решения указанной задачи.

Представлено описание разработанной автором системы автоматизированного проектирования (САПР) ELNET, реализующей решение задачи перспективного развития городской распределительной сети электроснабжения. САПР позволяет создавать, корректировать, рассчитывать параметры, просматривать, печатать модели сетей электроснабжения. Структура ELNET состоит из шести взаимосвязанных модулей: графический модуль, модуль управления, модуль расчета, модуль решения, модуль ввода и вывода данных, база данных справочной информации. Система обладает дружественным графическим интерфейсом для легкой работы пользователя.

В основу математического аппарата САПР *ELNET* заложены разработанные автором математическая модель представления сети электроснабжения в виде направленного взвешенного графа и два метода решения задачи перспективного развития городской распределительной сети электроснабжения: метод редукции задачи в совокупности задач меньшей размерности и метод декомпозиции. Оба метода предполагают разделение исходной задачи на подзадачи меньшей размерности: подзадача определения числа и места строительства новых подстанций; подзадача определения варианта подключения новых потребителей к сети электроснабжения; подзадача определения оптимального варианта включения подстанций в существующую структуру сети.

Для решения подзадач автором разработаны оптимизационные алгоритмы. Для решения подзадачи 1 разработаны и реализованы три алгоритма: алгоритм, основанный на методе кластеризации; алгоритм, основанный на методе разделительной кластеризации; эвристический алгоритм. Для подзадачи 2 также предложены три алгоритма: эвристический алгоритм ограниченного перебора; генетический алгоритм; алгоритм, основанный на построении диаграмм Вороного. Для решения подзадачи 3 применяется генетический алгоритм.

Представленные в работе технические решения позволяют снизить время проектирования и повысить качество принимаемых проектных решений.

Ключевые слова: САПР, моделирование, метод редукции, метод декомпозиции, городская распределительная сеть электроснабжения, задача перспективного развития электросети.

Introduction. Urban power distribution network (UPDN) of megalopolis is a difficult system of non-uniform structure. It represents a set of distributive and step-down substations, feeders and distribution lines, current-using equipment. UPDNs cover all city consumers, including industrial enterprises, electric transport etc.

Now UPDNs consist of elements which are tens of thousands and which differ in their purpose and characteristics. Considering modern rates of city development, the economic and reliable UPDN building problem is now especially current. Thus, the process of such networks design is connected with need of accounting and calculating a large number of parameters, possible development ways and complexity of their assessment [1; 2].

Thus, the necessity of introducing new technologies for the specified task solution is obvious [3]. The author has developed the computer-aided design system (CAD system) "ELNET" for the task solution automation of perspective power supply network development (PPSND).

UPDN model. The mathematical PPSND task formulation is represented in the article [4].

UPDNs contain two types of objects united with cable lines (CL, type L): a transformer substation (TS, type T) and a distributive substation (DS, type D). Upon solving the PPSND task a great number of electric power consumers connected to UPDN is set.

The original UPDN with the supplied load (all consumers connected to it) represents the directed graph

$$G = (R, T, L),$$

where **D**, **T**, **L** are the given UPDN set assemblies of **D**, **T** and **L** types respectively. The elements of sets **D**, **T** are the graph points, elements of set **L** correspond to its arcs.

Many of all consumers connected to UPDN define the set $\dot{N} = \dot{N}^{high} \cup \dot{N}^{low}$, where \dot{N}^{high} , \dot{N}^{low} are sets of consumers connected to UPDN at the voltage levels of 10 kV and 0,4 kV respectively.

Objects of each type are characterized by a set of parameters. The vector varied parameters structure is expanded. It contains such characteristics of UPDN

elements as objects geographical coordinates, CL length and section, required power of consumers, etc.

The UPDN fragment model is presented in fig. 1.

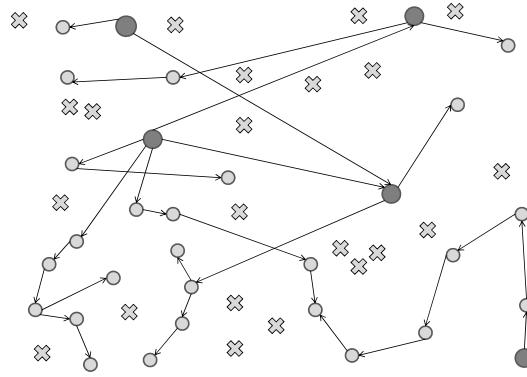


Fig. 1. The UPDN fragment model:

— DS; — TS; — CL; — consumer

UPDN design problem. The PPCND task lies in defining such way of UPDN development, where a high level of power supply reliability and transferred electric power quality will be provided with the smallest costs of construction and operation of its elements.

Defining a way of the UPDN development means:

- to define the number and locations of new electrical power objects (TS, DS); to define the way and parameters of their inclusion into the existing UPDN;
- to define the connection way of new consumers to UPDN.

The vector of the task varied parameters is presented as

$$\mathbf{X} = (X_i, X_{1j}, X_{2j}, (x_k, y_k), X_{iia}^R, X_{iia}^T),$$

where X_i is an unknown number of DS/TS, which a consumer \dot{N}_i will be connected to; X_{1j} , X_{2j} are the numbers of DS/TS, which TS T_j is connected to; (x_k, y_k) are the geographical coordinates of new DS/TS;

$X_{\text{ii}\hat{\alpha}}^R, X_{\text{ii}\hat{\alpha}}^T$ are the numbers of new DS and TS, construction of which should be for connection of all new consumers (set \hat{N}) to UPDN.

The values of the parameters X_i, X_{1j}, X_{2j} are elements of a discrete set of unique numbers DS and TS; the coordinates (x_k, y_k) are chosen out of the final value set of possible new DS/TS construction place. The variables $X_{\text{ii}\hat{\alpha}}^R, X_{\text{ii}\hat{\alpha}}^T$ are integral valued. Thus, the UPDN task belongs to the discrete programming tasks class.

Basic (obligatory) and user (additional) restrictions are imposed upon a number of parameters of UPDN objects of $\mathbf{R}, \mathbf{T}, \mathbf{L}$ types. They are like equalities and inequalities which define basic \mathbf{D}_O and user \mathbf{D}_U areas of admissible varied parameters vector values.

Partial criteria of the UPDN development optimality $\mathbf{Z}(\mathbf{X}) = (Z_1(\mathbf{X}), Z_2(\mathbf{X}), \dots, Z_{|\mathbf{Z}|}(\mathbf{X}))$ are defined. Criteria restrictions are imposed upon the first $|\mathbf{Z}|$. They forming an area of admissible varied parameters \mathbf{D}_Z vector values.

Represent the PPCND task in the form

$$\mathbf{Z}(\mathbf{X}^*) = \min_{\mathbf{X} \in \mathbf{D}} \mathbf{Z}(\mathbf{X}),$$

where \mathbf{x}^* is optimum values of the varied parameters vector components; $\mathbf{D} = \mathbf{D}_X \cap \mathbf{D}_U \cap \mathbf{D}_Z$ is a total set of the vector admissible values.

PPCND task solving. The PPCND task belongs to the class of structural and parametrical synthesis problems. The task also differs in big dimension: thus, for calculation UPDN of a megalopolis district the vector dimension \mathbf{X} can reach 3000–5000. In case each element of the vector takes one or the other possible value, the number of the task solution versions will be $2^{3000} - 2^{5000}$. Thus, the specified task solution with complete enumeration method is not possible and it demands the development of effective approximate methods of its solution [5; 6].

Two methods for solving the PPCND task are developed by author:

- the reduction method to the set of enclosed global minimization tasks (the reduction method) [7];
- the decomposition method [8].

The detailed description of the specified methods is provided in the article [9].

Both methods suggest dividing a given task into three subtasks of smaller dimension:

Subtask 1. The number and locations of new TS and DS definition.

Subtask 2. The connection way of new consumers to UPDN definition.

Subtask 3. The optimum connection way of new TS to the existing UPDN definition.

In the *reduction method* it is the consecutive solution of subtasks 1–3. At that, the solution of each subsequent subtask is executed on the dragged area of admissible varied parameters vector values which are received by fixation of solution values of previous subtasks.

The second method – *a decomposition method* – assumes dividing of the PPCND optimization task into the same three subtasks and the coordination task. The coordination task carries out calculating coordination pa-

ters, defining the subtasks solution sequence and the calculating end moment. We carry out the coordination of subtasks by means of vectors of limiting and stimulating parameters. The two-dimensional vector of limiting coordination parameters is considered in the article. Components of this vector make sense of the minimum numbers of TS, DS which have to be constructed. The vector dimension of stimulating parameters is equal to the number of possible TS, DS construction sites. The vector components of stimulating parameters make sense of “usefulness” of constructing new TS, DS in the specified places.

For the solution of subtasks 1–3 various optimization algorithms and various iteration end conditions can be used.

The following solution algorithms of subtasks 1–3 are realized by author.

Subtask 1. The given data for a subtask is the great number of consumers for whom there are no connection options to UPDN. The result solution of a subtask is many TS and DS, which construction needs to be for connection of all consumers to UPDN.

Algorithm based on the k-averages method. It realizes the clustered *k*-averages method the main idea of which is a task of some given dividing of new consumers into clusters with the subsequent change of cluster centers (supposed DS/TS construction sites) and redistribution of new consumers [10].

Algorithm realizing the method of dividing clustering. The algorithm basis is the hierarchical clustering method which advantage, in comparison with the *k*-averages method, is no need of defining the number of clusters. The main algorithm idea is that at the first solution task stage all new consumers are located in one cluster which consistently divides into subclusters before fulfillment of the dividing end conditions.

Heuristic algorithm. The idea of the approach applied in it is consecutive singling groups out of many new consumers connected to UPDN including the greatest possible number of consumers for whom DS/TS can be constructed [11].

Subtask 2. The given data for a subtask are data on initial UPDN topology and connected consumers, and many TS and DS defined in the course of the solution of subtask 1.

Heuristic algorithm of the reduced enumeration. The basic algorithm principle is to add the first possible connection way of a consumer with sorting in accordance with the decreasing order of connection costs. This algorithm can be referred to the so-called “greedy” algorithms class of solving optimizing tasks.

Genetic Algorithm (GA). We associate one chromosome gene with each connected consumer. The gene value (allele) is the number of DS/TS, which a consumer will be connected to. The chromosome length is equal to the number of connected consumers [12].

Algorithm based on constructing Voronoi diagrams. The algorithm is reduced to consecutive constructing Voronoi diagrams for all TS of UPDN with subsequent connection attempts of all consumers who are in the TS area. At the next stages of constructing Voronoi diagrams TS is excluded, the connection of consumers to them is not possible [13].

Subtask 3. The given data for a subtask is the TS set, constructed in the course of solution of subtask 1. To find a connection way of new TS to UPDN is required.

To solve subtask 3 the genetic algorithm is applied. In it each new TS corresponds to two chromosome genes which define the numbers of TS/DS to which it is necessary to connect a new TS. Beforehand a set of such possible ways is given for each new TS.

CAD system ELNET. ELNET allows to create, correct, look through and print UPDN models. The system also allows to make calculation of parameters of UPDN elements, to find optimum UPDN development ways taking into account the city development prospects. ELNET has a friendly interface for a user and the system interaction and the UPDN models visualization system.

Electrotechnical calculations in ELNET are made by techniques offered in [14; 15] and meet requirements of Rules for electric equipment.

Decomposition and reduction methods are the basis for mathematical ELNET apparatus. Optimizing algorithms (algorithm of limited enumeration, genetic algorithm, parallel threshold clustering algorithm, k-averages clustering algorithm) are developed to solve each subtask. The analysis of their efficiency is carried out.

ELNET consists of six following modules (fig. 2).

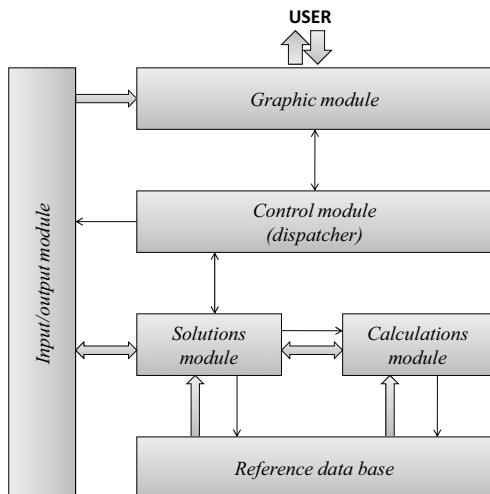


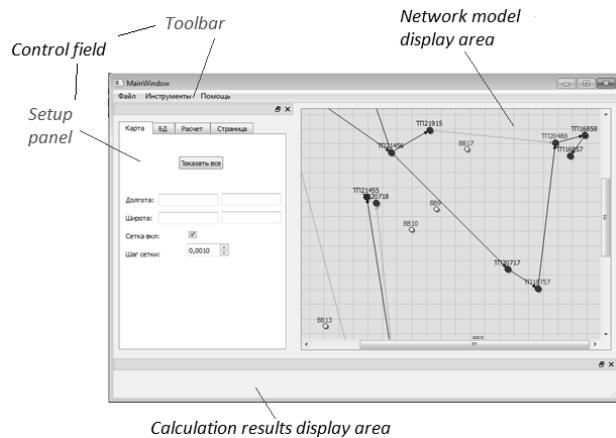
Fig. 2. ELNET modules

The *graphic module* realizes the window interaction “user and system” interface. This module is also responsible for visualization of the UPDN models. The *control module (dispatcher)* is intended for interaction of all system modules among themselves. It processes received orders/requests of modules and coordinates the task solution process by means of producing operating signals. The module is also responsible for maintaining the register of operations and error messages. The *input/output module* carries out functions of reading and temporary storage of the UPDN data.

Besides, after ending the task solution the module forms the final text file. The *solutions module* is the main computing ELNET module which realizes methods and algorithms of the task solution. The *calculations module* is intended for calculating the UPDN parameters, checking fulfillment of restriction conditions, calculating the

objective function value, etc. In this module all calculations which are general for the solution methods and algorithms of subtasks are included. The *reference data base* contains reference data which are necessary for calculating UPDN modes, and parameters of the task solution methods and algorithms.

ELNET possesses the graphic interface allowing to exercise control and setting of necessary values of calculation parameters, and to display results of calculations. The ELNET screen form consists of three main areas: *the control field* consisting of a toolbar and setup panel of calculation parameters; *the network model display area* and *the calculations results display area* (fig. 3).



- methods in planning and control tasks]. Moscow, MAI Publ., 2000, 43 p.
7. Feofanova V. A., Vorotnikov V. I. *Diskretnaya matematika: uchebno-metodicheskoe posobie* [Discrete mathematics. Teaching tutorial]. Nizhniy Tagil, NTI (filial) UrFU Publ., 2013, 256 p.
8. Borodachev S. M. *Teoriya prinyatiya resheniy* [Decision theory]. Ekaterinburg, Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta Publ., 2014, 124 p.
9. Karpenko A. P., Kuz'mina I. A. [Problem-Solving Methods for the Prospective Development of Urban Power Distribution Network]. *Nauka i obrazovanie*. 2014, No. 10 (In Russ.). Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/727891.html> (accessed 14.02.2016). DOI: 10.7463/1014.0727891.
10. Pisaruk N. N. *Issledovanie operatsiy* [Operations research]. Minsk, BGU Publ., 2015, 300 p.
11. Lotov A. V., Pospelova I. I. *Mnogokriterial'nye zadachi prinyatiya resheniy* [Multicriteria decision-making tasks]. Moscow, MAKS Press Publ., 2008, 197 p.
12. Kureychik V. M. *Geneticheskie algoritmy i ikh primenenie* [Genetic algorithms and their application]. Taganrog, Taganrogskiy RTU Publ., 2002, 244 p.
13. Kogan D. I. *Dinamicheskoe programmirovaniye i diskretnaya mnogokriterial'naya optimizatsiya* [Discrete programming and discrete multicriteria optimization]. Nizhniy Novgorod, Izdatel'stvo Nizhegorodskogo universiteta Publ., 2004, 150 p.
14. Karpov F. F. *Raschet gorodskikh raspredeliteľ'nykh elektricheskikh system* [Urban distribution electric systems calculation]. Moscow, Energiya Publ., 1968, 223 p.
15. Karapetyan I. G., Faybisovich D. L., Shapiro I. M. *Spravochnik po proektirovaniyu elektricheskikh setey* [Directory of electric network design]. Ed. D. L. Faybisovicha. Moscow, Izdatel'stvo NTsENAO Publ., 2006, 349 p.
- Библиографические ссылки**
1. Ананичева С. С., Калинкина М. А. Практические задачи электрических сетей : учеб. пособие. Екатеринбург : УрФУ, 2012. 112 с.
 2. Козлов В. А. Городские распределительные электрические сети. Л. : Энергоиздат, 1982. 224 с.
 3. Applied mathematics for restructured electric power systems. Optimization, control, and computational intelligence / J. H. Chow, F. F. Wu, J. A. Momoh (eds). Springer Science, 2005. 342 p.
 4. Карпенко А. П., Кузьмина И. А. Математическая модель распределительной городской сети электроснабжения с учетом ее перспективного развития // Наука и образование : электронное научное издание. 2014. № 05. URL. <http://technomag.bmstu.ru/doc/709781.html>. (дата обращения: 14.02.2016). DOI: 10.7463/0514.0709781.
 5. Горбатов В. А. Фундаментальные основы дискретной математики. Информационная математика. М. : Наука : Физматлит, 2000. 544 с.
 6. Беркульцев М. В. Методы эвристического поиска в задачах планирования и управления : учеб. пособие. М. : МАИ, 2000. 43 с.
 7. Феофанова В. А., Воротников В. И. Дискретная математика : учеб.-метод. пособие. Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2013. 256 с.
 8. Бородачев С. М. Теория принятия решений : учеб. пособие. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. 124 с.
 9. Карпенко А. П., Кузьмина И. А. Методы решения задачи перспективного развития распределительной городской сети энергоснабжения // Наука и образование : электронное научное издание. 2014. № 10. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/727891.html> (дата обращения: 14.02.2016). DOI: 10.7463/1014.0727891.
 10. Писарук Н. Н. Исследование операций. Минск : БГУ, 2015. 300 с.
 11. Лотов А. В., Поспелова И. И. Многокритериальные задачи принятия решений : учеб. пособие. М. : МАКС-Пресс, 2008. 197 с.
 12. Курейчик В. М. Генетические алгоритмы и их применение. Таганрог : Таганрогский РТУ, 2002. 244 с.
 13. Коган Д. И. Динамическое программирование и дискретная многокритериальная оптимизация. Нижний Новгород : Изд-во Нижегород. ун-та, 2004. 150 с.
 14. Карпов Ф. Ф. Расчет городских распределительных электрических систем. М. : Энергия, 1968. 223 с.
 15. Карапетян И. Г., Файбисович Д. Л., Шapiro И. М. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д. Л. Файбисовича. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Изд-во НЦЭНАО, 2006. 349 с.

**ENSEMBLES OF NEURAL NETWORKS
WITH APPLICATION OF MULTI-OBJECTIVE SELF-CONFIGURABLE GENETIC PROGRAMMING**

E. D. Loseva^{*}, L. V. Lipinsky

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: rabota_lena_19@mail.ru

In this article the integrated approach for automatic formation ensembles of neural networks is proposed. The applying multi-criteria "Self-configurable" genetic programming is described. To each new generated network the most efficient ("best") network is added, which by two criteria were estimated on the first stage of the algorithm. Thus a population of neural network ensembles is created. The criterion of effectiveness of new networks is the third criterion – the effectiveness of ensemble decision, which includes in this network ensemble. The final ensemble with selected networks by third criteria is created. Also in this article the approach for formation of ensemble decision using the decisions of an added neural networks – Scheme ED1 is applied. Proposed method on different tasks with different amount of inputs and outputs signals (neurons) in ANN was tested. In the result this method shows high efficiency.

Keywords: forecasting problems, ensembles of artificial neural networks, self-configurable multi-criteria genetic programming.

Вестник СибГАУ
Том 17. № 1. С. 67–72

**АНСАМБЛИ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО
САМОКОНФИГУРИРУЕМОГО ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ**

Е. Д. Лосева^{*}, Л. В. Липинский

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: rabota_lena_19@mail.ru

Рассматривается комплексный подход для автоматизированного проектирования ансамблей нейросетевых моделей. Предлагается применение многокритериального самоконфигурируемого генетического программирования. К каждой новой сгенерированной сети добавляются наиболее эффективные ("лучшие") сети, оцененные по двум критериям на первом этапе алгоритма. Таким образом создается популяция ансамблей. Условием отбора новых сгенерированных сетей является эффективность решения всего ансамбля, в который входит эта сеть, – третий критерий. После окончания эволюционной процедуры в финальный ансамбль попадают сети, отобранные по третьему критерию. Также предложен подход к формированию решения ансамбля на основе решений входящих в него сетей – схема Scheme ED1. Предложенный метод был протестирован на задачах прогнозирования с различным количеством входных и выходных сигналов (нейронов) в сети. Результаты подтверждают высокую эффективность.

Ключевые слова: прогнозирование, ансамбли нейросетевых моделей, самоконфигурируемое генетическое программирование.

Introduction. At the present time, data analysis systems based on the Intelligent Information Technologies (IIT) became more popular in many sectors of human activity. Therefore became more urgent question of the development methods for automatic design and adaptation IIT for specific tasks. Such methods could allow eliminate expensive design IIT and reduce the time, which is required for the development of intelligent systems. One of the most perspective and popular technology is an artificial neural networks (ANN) (fig. 1). The range of tasks which are solved by artificial neural networks is wide [1; 2].

One of them is forecasting task. The relevance of forecasting problems in modern world is the quite high. The quality of their decisions have greatly influence to a decision in various fields (in the sphere of economy, industry, etc.). The approach to improve the efficiency of systems based on the neural networks is the using of neural network ensembles (ENN) [3; 4]. Using ENN is a good way to counteract the networks retraining and to improve their ability to generalize. Important question is design optimal ENN by different criteria of the efficiency with minimum architecture, high precision of the forecasting and the

optimal network parameters [5–7]. To satisfy these requirements in this paper a multi-criteria [8] “Self-configuring” genetic programming was used. Genetic programming (GP) [9] have been successfully used in solving a lot of real tasks. Genetic programming is looking for a solution in the space of trees. The using “Self-configuring” technique allows to find “best” combination of evolutionary operators automatically. It allows to reduce computationally resources and requires to the end users. The description of proposed approach stages (SelfCGP algorithm) below is described.

Formation ANN by genetic programming. For applying GP technique is necessary to encoding ANN in the form of the tree [10; 11]. The tree is a directed graph which consists of nodes and end vertices (leaves). In the leaves is one operator from the multiplicity T {IN₁, IN₂, IN₃, ..., IN_n} – the input neurons; F₁, F₂, ..., F_N – activation functions (neurons)} and in the nodes is one operator from multiplicity $F\{+,<\}$. Signs from multiplicity F are indicators what is necessary to perform during the formation of the ANN. Sign “+” means formation all neurons in one layer and “<” means formation all layers in one ANN [12; 13]. The amount of input and output neurons in ANN consists of the task. Example for encoding ANN in the form of the tree on fig. 2 is shown.

The first stage of SelfCGP algorithm: automated ANN design. The automated design of ANN using the SelfCGP algorithm works as follows:

Step 1. Generation a population of individuals – trees. Each individual is a ANN.

Step 2. An important step is the optimization of the neural network weighting factors. In this research the Backpropagation method was used. The criterion for

stopping the optimization process is the minimization of the prediction error.

Step 3. Setting the equal probabilities for all configuration options for each type of operator (except selection operator). Initial probability for all operators, except crossing, are defined as follows [14]:

$$P_i = \frac{1}{Z_i}, \quad (1)$$

$\forall i = 1, 3$, where Z_i – amount of operators i -th type, P_i – probability for using i -th type of the operator.

Step 4. Choosing operators for recombination (one-point, two-point) and mutation (strong, week). The operator for selection is the elite.

Step 5. Selection parents for recombination.

Step 6. Estimation of each individual in population according to two criteria:

1. The first criteria is the error of the forecasting. The minimum error value can be investigate by minimization of deviation between the reference and calculated (current) output values of ANN. Evaluation is carried out according to the fitness function, which is calculated by the formula (3):

$$E = \frac{\sum_{i=1}^N |y_i^* - \hat{y}_i|}{N} \rightarrow \min, \quad (2)$$

$$\text{Fitl} = \frac{1}{1+E} \rightarrow \max, \quad (3)$$

where N – the amount of output values; y^* – the reference values; \hat{y} – current output values of ANN or of an ensemble.

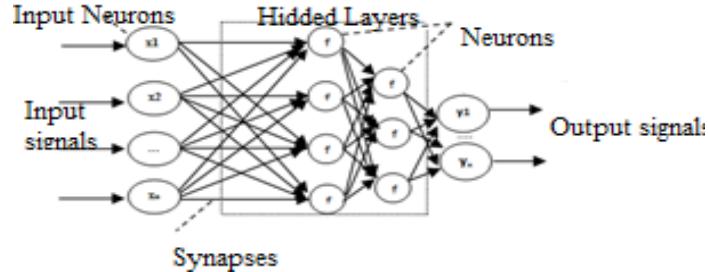


Fig. 1. Type of ANN

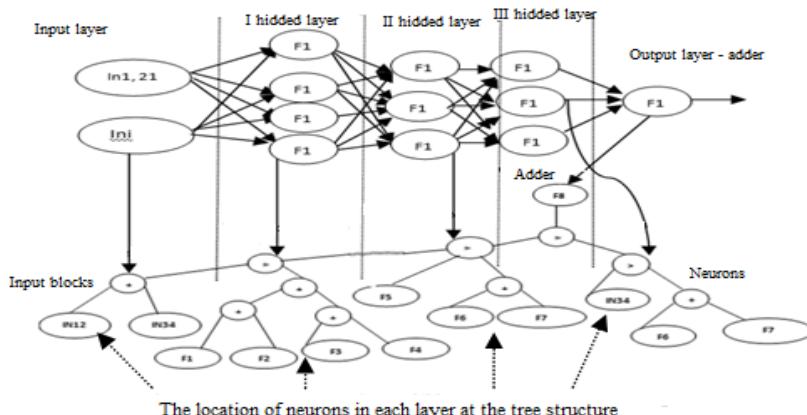


Fig. 2. Encoding ANN into the tree structure

2. The second criteria is complexity of the ANN structure. Evaluation is carried out according to the fitness function, which is equal to (4):

$$\text{Fit2} = n \cdot N_1 + \sum_{i=1}^{L-1} N_i N_{i+1} + N_L \cdot l, \quad (4)$$

where n – amount of input neurons in the first layer; N_i – amount of neurons in the i -th layer; i – number of hided layer; L – the amount of hided layers in neural network; l – the amount of neurons on the last layer.

Selection of trees with the minimal value by two criteria according to the following scheme is realized. The fitness values calculated by the first criterion from minimum to maximum are sorted. The difference between two values through pairwise is looked. Checking the condition for selection one individual from the pair:

- if the difference between two values exceeds the threshold $\Delta n > 50\%$, need to choose an individual whose fitness value is minimum;
- if the threshold $\Delta n \leq 50\%$, need to choose one individual from the pair by the second fitness function with minimum value of complexity.

Step 7. Recombinantion of selected individuals (parents).

Step 8. Mutation of a descendant.

Step 9. Evaluation of a new descendant.

Step 10. Updating the probabilities for operators using the average fitness of offspring obtained by the operator. Check the values of probabilities by these conditions:

$$P_i = \bar{P}_i \mid P_l < \bar{P}_i + \frac{1}{z_l \cdot N} \quad (5)$$

and

$$P_i > \bar{P}_i \mid P_l > \bar{P}_i + \frac{1}{z_l \cdot N} \quad (6)$$

for $\forall k = \overline{1, N}$, $l = \overline{1, 3}$. Further the probabilities will change on:

$$P_l^{\text{new}} = P_l^{\text{old}} \mid P_l^{\text{new}} = \bar{P}_l \mid P_l^{\text{new}} = P_l^{\text{old}} - \frac{1}{z_l \cdot N} \quad (7)$$

where $\bar{P}_l = \frac{3}{10 \cdot z_l}$ for z_l – amount of operators i -th type,

$k = \overline{1, N}$, N – amount of generations.

Choose operator with the highest value of fitness for all individuals on each iteration calculated by this formula (8):

$$\max_i \frac{\sum_i (\text{Fit_1}_k^n + \text{Fit_2}_k^n)}{\sum_i I_k} \quad (8)$$

where $k = \overline{1, N}$, N – amount of generations, Fit_1_{ki} , Fit_2_{ki} – fitness value of n -th individual on k -generation, I – amount of operators i -th type on k -generation.

Step 11. If the algorithm reached the predetermined value of accuracy or exhausted the computational resources – go to step 12, otherwise go to step 2.

Step 12. Selection the “best” individual (ANN). For K “best” ANN described procedure is carried out K times (steps 1–12).

The second stage of SelfCGP algorithm: formation ensembles of ANN. In the second stage of SelfCGP algorithm the selection of effectiveness ANN in the final ensemble (SelfCGP + ENN) is realized. The third criterion is the error of a ensemble decision. The ensemble decision by Scheme ED1 (Scheme for creation an Ensemble Decision 1) is created. The second part of algorithm works as follows:

Step 1. Generation new population of individuals. Each individual is an ensemble. Ensemble with one randomly generated individual and the “best” individuals is formed. The amount of the additional “best” individuals in ensemble may be different, each of them is found by the first stage of algorithm (steps 1–12).

Step 2. The optimization of the neural network weighting factors. In this research Backpropagation method was used. The criterion for stopping the process of selecting the parameters is also the minimization of the prediction error.

Step 3. Setting the equal probabilities for all configuration options for each type of operator (except selection operator). Initial probability for all operators, except crossing, are defined by the formula (1).

Step 4. Choosing operation for recombination (one-point, two-point) and mutation (strong, week). The selection operator is the elite.

Step 5. Estimation new population by third criteria. The third criteria is the precision of an ensemble (individual) forecasting in which the solutions of its individual members are considered. The fitness function is calculated by the formula (3). The Scheme ED1 for creation a ensemble decision below is described:

1. Applying the train inputs for each model in the ensemble. To calculate the deviation between received and reference outputs to search for minimum value between outputs. If the minimum is found, then to determinate number of the model in the ensemble, which was received.

2. Applying the test inputs for each model in ensemble to determinate output values. To calculate the deviation between received and reference outputs to search for the minimum value between them. If the minimum is found, then to determinate number of the point (position) where it was received.

3. Creation new data base. This data base consists of the test values (results) from each models in ensemble. But in this data base are only certain values, which were defined by information about the number of model and the number of point for determination the placement of that value. The number of model is found in step 1, the number of point in step 2 is found.

Step 6. Recombination of two individuals (parents).

Step 7. Mutation of a descendant.

Step 8. Evaluation of a new descendant.

Step 9. Updating the probabilities for operators using the average fitness of offspring obtained by the operator. Check the values of probabilities by the formulas (5), (6). Further the probabilities will change and new probabilities are calculated by the formula (7). Choose operator with the highest value of fitness for all individuals on each iteration by the formula (8).

Step 10. If the algorithm reached the predetermined value of accuracy or exhausted the computational resources – go to step 11, otherwise go to step 2.

Step 11. Selection the most effectiveness K individuals for the final ensemble.

Data bases description. The proposed multi-criteria genetic programming for formation ANN ensembles with “Self-configurable” procedure (SelfCGP + ENN) on two data bases was tested. For the first task in tab. 1 is data set with the figures of the turbine state. The first 11 measurements in the data set – the process parameters that are expected to be related to vibration signals. Next 12 measurements – vibration signals in the different parts of the turbine were measured. The data base has 1000 values.

For the second task the electricity consumption data base of the Siberian Federal Region of the 2012–2014 years was used, with the figures: every month, every day and every hour of the day, payment for electricity consumption, etc. The features available in the database: electricity consumption of the region, of the district, of the city. The data base has 8000 values [15].

Results of the study. The initial settings for optimization procedure by the evolutionary algorithm are following: the amount neurons is 8; the maximum amount of layers – 8. Each data bases were divided into two parts. There are train and test values in proportion 80 % / 20 % accordingly. Each result is the minimum error value after 20 runs for each type of initial settings.

The error of ensemble forecasting in the percentage ratio by the formula (9) are converted:

$$\text{Error} = \frac{E}{(\hat{y}^{\max} - \hat{y}^{\min})} \cdot 100\%, \quad (9)$$

where E is a value, which by formula (2) was calculated; expression $(\hat{y}^{\max} - \hat{y}^{\min})$ is a deference between maximum and minimum values of an ensemble decision (output values).

The final ensemble consists of the tree “best” neural network model. The results of the forecasting precision (error) in tab. 2, 3 with different amount of “best” ANN and individuals for both task accordantly are represented.

Table 1
Data of the turbine state*

A				L	a			m
pp _{1.1}				pp _{1.11}	vp _{1.1}			vp _{1.12}
pp _{1400.1}				pp _{1400.11}	vp _{1400.1}			vp _{1400.12}

* $pp_{i,j}$ – j -th process parameter in the i -th data set ($i = 1, \dots, 1000; j = 1, \dots, 11$), $vp_{i,j}$ – j -th vibration signal in the i -th data set ($i = 1, \dots, 1000; j = 1, \dots, 12$).

Table 2
Minimum error values for the first task with different amount of additional “best” ANN-individuals on the second stage (step 1) of SelfCGP + ENN algorithm were calculated

Amount of the additional “best” ANN-individuals	Error, %	Amount of output neurons in ANN											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1.5	5.4	9.2	6.2	10	1.2	1.4	2.2	3.3	3.2	2.9	2.4	
2	2.6	5.7	8.3	6.7	9.7	1.4	1.1	2.5	2.6	2.6	2.39	2.6	
3	1.8	5.4	8.4	5.8	11	0.9	2.2	2.2	2.1	3.7	3.2	3.1	
4	2.4	5.4	8.1	6.5	10	1	1.1	2.8	2.7	3.1	3.83	2.9	
5	2.9	6	8.1	6.6	10	1.4	1.2	2.6	3.7	2.9	3	2.6	

Table 3
Minimum error values for the second task with different amount of additional “best” ANN-individuals on the second stage (step 1) of SelfCGP + ENN algorithm and with different amount of individuals were calculated

		Amount of individuals			80	160	240
		Amount of additional ANN-individuals : 1					
The average value of ANN models complexity in ensemble		Number of Layers			5	6	8
		Number of Neurons			7	7	5
Error, %							2.19
		Amount of additional ANN-individuals : 2			2.41		
The average value of ANN models complexity in ensemble		Number of Layers			6	6	7
		Number of Neurons			6	5	6
Error, %							3.46
		Amount of additional ANN-individuals : 3			3.7		
The average value of ANN models complexity in ensemble		Number of Layers			4	5	5
		Number of Neurons			7	8	6
Error, %							2.44

Amount of individuals		80	160	240
Amount of additional ANN-individuals : 4				
The average value of ANN models complexity in ensemble	Number of Layers	6	5	7
	Number of Neurons	6	5	4
Error, %		2.53	1.88	2.68
Amount of additional ANN-individuals : 5				
The average value of ANN models complexity in ensemble	Number of Layers	6	7	7
	Number of Neurons	7	5	5
Error, %		4.04	1.95	3.24

The algorithm with Visual Studio C# program was realized and on a laptop with 1 terabyte of memory was tested with the four-core processor Intel Core i5-2410 (2.10 GHz).

Conclusion. The results of statistical studies show that offers a comprehensive approach for the design of neural network ensembles is demonstrated high efficiency for all used test tasks. In the result can conclude that the proposed method is not less effective than the widely used method based on the genetic algorithm. The advantage of the proposed method is reducing the cost of the solution by automatically choosing evolutionary operators, also find compact neural networks structure with height precision: the average modeling error in the range 1–6 % for the first task with 12 outputs, and in the rage 2–5 % for the second task with one output. According to the results the greatest deviation is in the fifth exit for the first task (tab. 2). It means that the result directly depends on the level of variation in the inputs data sets. In the fifth output the variation value is sufficiently high. After testing notice, that increasing number of inputs and outputs decrease the speed of the data processing, also necessary to optimize more parameters and increasing the number of iterations. But the positive dynamic is the reduction of complexity of neural network models: the reduction is in average for neurons – 30 % and for layers – 20 % if to compare with the initially sets, also the precision rates for two tasks are satisfactory in average are about 6 %. The proposed approach can effectively automatically generate ensembles of neural networks. Therefore, this approach may be used to improve the efficiency to solve complex applications tasks.

Acknowledgment. Research is performed with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the federal R&D programme (project RFMEFI57414X0037).

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федеральной R&D-программы (проект RFMEFI57414X0037).

References

- Anderson D., McNeill G. Artificial neural networks technology. DACS report, 1992, P. 1–34.
- Angeline P. J. Adaptive and self-adaptive evolutionary computations. Palaniswami M. and Attikiouzel Y. (Eds.) *Computational Intelligence: A Dynamic Systems Perspective*. IEEE Press, 1995, P. 152–163.
- Yu J. J. Q., Lam A. Y. S., Li V. O. K. Evolutionary Artificial Neural Network Based on Chemical Reaction Optimization. *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'2011)*, 2011, P. 12–16.
- Albert Lam, Victor O. K. Li, James J. Q. Yu. Real-coded chemical reaction optimization. *Evolutionary Computation*, 2012, Vol. 16, Iss. 3, P. 339–353.
- J. J. Q. Yu., Victor O. K. Li. A social spider algorithm for global optimization. *Applied Soft Computing*, 2015, Vol. 30, P. 614–627.
- Holland J. H. Adaptation in Natural and Artificial System. University of Michigan Press, 1975, P. 18–25.
- Izeboudjen N., Larbes C., Farah A. A new classification approach for neural networks hardware: from standards chips to embedded systems on chip. *Artificial Intelligence Review*, 2014. Vol. 41, Iss. 4, P. 491–534.
- Ashish G., Satchidananda D. Evolutionary Algorithm for Multi-Criterion Optimization: A Survey. *International Journal of Computing & Information Science*, 2004, Vol. 2, No. 1, P. 43–45.
- Koza J. R. Genetic Programming. On the Programming of Computers by Means of Natural Selection, 1992, MIT Press, P. 109–120.
- Huang J.-J., Tzeng G.-H., Ong Ch.-Sh. Two-stage genetic programming (2SGP) for the credit scoring model. *Applied Mathematics and Computation*, 2006, P. 1039–1053.
- O'Neill M., Vanneschi L., Gustafson S., Banzhaf W. Open issues in genetic programming. In: *Genetic Programming and Evolvable Machines*, 2010, P. 339–363.
- Semenkin E. S., Lipinsky L. V. [Application of the genetic programming algorithm in problems of design automation of intelligent information technologies]. *Vestnik SibGAU*. 2006, No. 3 (10), P. 22–26 (In Russ.).
- Loseva E. D. [Ensembles of neural network models using multi-criteria self-configuring genetic programming]. *Materialy XI Mezhdunar. nauch. konf. "Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki"* [Proceedings of XI Intern. Scientific. Conf. "Actual problems of aviation and cosmonautics"]. Krasnoyarsk, 2015, P. 340–343 (In Russ.).
- Land M. W. S. Evolutionary Algorithms with Local Search for Combinatorial Optimization. PhD thesis, Citeseer. A thesis investigation memetic algorithms in combinatorial optimization. 1998, P. 259–315.
- A. Asuncion, D. Newman. 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> (accessed 10.11.2015).

Библиографические ссылки

1. Anderson D., McNeill G. Artificial neural networks technology : DACS report, 1992. P. 1–34.
2. Angeline P. J. Adaptive and self-adaptive evolutionary computations / M. Palaniswami and Y. Attikiouzel (eds.) // Computational Intelligence: A Dynamic Systems Perspective. IEEE Press, 1995. P. 152–163.
3. Yu J. J. Q., Lam A. Y. S., Li V. O. K. Evolutionary Artificial Neural Network Based on Chemical Reaction Optimization // IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'2011), 2011. P. 12–16.
4. Lam A., Li V. O. K., Yu J. J. Q. Real-coded chemical reaction optimization // Evolutionary Computation, 2012. Vol. 16, iss. 3. P. 339–353.
5. Yu J. J. Q., Li V. O. K. A social spider algorithm for global optimization // Applied Soft Computing, 2015. Vol. 30. P. 614–627.
6. Holland J. H. Adaptation in Natural and Artificial System // University of Michigan Press, 1975. P. 18–25.
7. Izeboudjen N., Larbes C., Farah A. A new classification approach for neural networks hardware: from standards chips to embedded systems on chip // Artificial Intelligence Review. 2014. Vol. 41, iss. 4, P. 491–534.
8. Ashish G., Satchidanada D. Evolutionary Algorithm for Multi-Criterion Optimization: A Survey // International Journal of Computing & Information Science. 2004. Vol. 2, No. 1. P. 43–45.
9. Koza J. R. Genetic Programming // On the Programming of Computers by Means of Natural Selection. MIT Press, 1992. P. 109–120.
10. Huang J.-J., Tzeng G.-H., Ong Ch.-Sh. Two-stage genetic programming (2SGP) for the credit scoring model // Applied Mathematics and Computation. 2006. P. 1039–1053.
11. Open issues in genetic programming / M. O'Neill [et al.] // Genetic Programming and Evolvable Machines. 2010. P. 339–363.
12. Семенкин Е. С. Липинский Л. В. Применение алгоритма генетического программирования в задачах автоматизации проектирования интеллектуальных информационных технологий // Вестник СибГАУ. 2006. № 3 (10). С. 22–26.
13. Лосева Е. Д. Ансамбли нейросетевых моделей с применением многокритериального самоконфигурируемого эволюционного алгоритма // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : материалы XI Междунар. науч. конф. (6–12 апр. 2015, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2015. С. 340–343.
14. Land M. W. S. Evolutionary Algorithms with Local Search for Combinatorial Optimization : PhD thesis, Citeseer. A thesis investigation memetic algorithms in combinatorial optimization. 1998. P. 259–315.
15. 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> (дата обращения: 10.11.2015).

© Loseva E. D., Lipinsky L. V., 2016

**ПРЕДЕЛЬНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ТЕРМОУПРУГИХ ПЛОСКИХ КОНСТРУКЦИЙ
С КРИВОЛИНЕЙНЫМ АРМИРОВАНИЕМ**

Ю. В. Немировский¹, Н. А. Федорова^{2*}

¹Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН
Российская Федерация, 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

²Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26
*E-mail: feodorova.natalia@mail.ru

Представлена разработка нового научно-методологического подхода в создании плоских авиационных конструкций путем армирования семействами криволинейных волокон. Математическое моделирование выполнено на основе структурной модели композита в рамках плоской неоднородной линейной задачи термоупругости в криволинейной системе координат. Получена разрешающая система дифференциальных уравнений. На ее основе ставится как прямая, так и обратная задача армированной среды. Сформулированы краевые условия в криволинейной системе координат. В осесимметрической постановке задачи получена разрешающая система обыкновенных дифференциальных уравнений относительно радиального и окружного перемещений. Эта система является системой дифференциальных уравнений второго порядка, не разрешенных относительно старшей производной. Построен эффективный численный метод, учитывающий особенности разрешающей системы для армированной среды. В рамках прямой задачи в условиях осесимметрической деформации плоской конструкции рассмотрены комбинации двух семейств криволинейных траекторий. В качестве примера таких семейств приведены семейства логарифмических спиралей и им изогональных траекторий, семейство спиралей Архимеда и семейство траекторий «спицы велоколеса», семейство логарифмических спиралей и семейство «спицы велоколеса». Рассмотрены эффективные и рациональные структуры армирования. Интенсивность армирования рассмотрена при наложении дополнительных условий постоянства сечений волокон, что соответствует условиям технологического процесса. Введена интегральная характеристика эффективности армирования – расход арматуры. Проанализированы свойства расхода арматуры в зависимости от начальных стадий технологического процесса для различных криволинейных траекторий армирования двумя семействами криволинейных волокон. Поставлена обратная задача для симметрической относительно срединной поверхности пластины. Пластина состоит из прослоек связующего и прослоек арматуры. Прослойки тонкие, в пластине реализуется плоское напряженное состояние. Температура постоянная по толщине пластины. Прослойки связующего выполнены из изотропного материала, на них наложено дополнительное условие равной трещиностойкости.

Ключевые слова: армирование, структурная модель, криволинейные траектории, термоупругость, трещиностойкость, предельные деформации.

Vestnik SibGAU
Vol. 17, No. 1, P. 73–78

**BREAKING STRAINS OF PLANAR THERMOELASTIC CONSTRUCTIONS REINFORCED
BY CURVILINEAR STRUCTURES**

Y. V. Nemirovsky¹, N. A. Feodorova^{2*}

¹Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS
4/1, Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

²Siberian Federal University
26, Kirenskogo Str., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation
*E-mail: feodorova.natalia@mail.ru

This paper describes a new methodological approach to development of planar aeronautical constructions reinforced by curvilinear fibers sets. The structural model of composite in terms of the planar non-homogeneous thermoelasticity problem in the case of curvilinear coordinates is used to simulate the problem. The resolving system of differential equations is obtained. The direct problem and the inverse problem of a material reinforcement are stated on the basis of this system. The boundary conditions are defined for curvilinear coordinates. The resolving system of differential equations with radial and circular movement's variables is obtained for an axisymmetric problem. This

system is a second-order differential equations system, highest derivatives of which are not isolated. The effective numerical method which takes into account the factors of the resolving system for a reinforced material is designed. Different mixed configurations of two sets of curvilinear trajectories are considered for the direct problem when a planar construction is under conditions of axisymmetric strain. The following examples are described: the logarithmic spiral trajectories set and the set of trajectories isogonal to it (to logarithmic spiral), the Archimedean spiral trajectories set and the “wheel spokes” trajectories set, the logarithmic spiral trajectories set and the “wheel spokes” trajectories set. Effective reinforcement structures and reasonable reinforcement structures are studied. The reinforcement power is considered with subject to additional conditions of fibers cross-sections constancy. It corresponds to the industrial process conditions. The reinforcement effectiveness integral characteristic is defined. It is called an “armature spending”. Its properties are studied for different initial states of an industrial process and for different curvilinear trajectories of reinforcement by two curvilinear fibers sets. The inverse problem for a plate which is symmetric with respect to its median surface is stated. A plate consists of a binding material layer and an armature layer. Layers are thin. A plate has a plain stress condition. The temperature is constant across a plate cross-section. A binding material layer is isotropic and equal cracking resistant.

Keywords: reinforcement, structural model, curvilinear trajectories, thermoelastic, cracking resistance, breaking strains.

Введение. Современные волокнистые композиты являются неоднородными анизотропными материалами. Упругость и неупругость волокнистых композитов определяется типом арматуры (стекло-, боро-, угле- и органоволокна) и матриц (полимерных, углеродных, металлических, керамических), степенью их взаимодействия в композите, а также углом нагружения относительно направлений армирования. Композиты обладают двумя уровнями неоднородности – микронеоднородностью (монослой, составленный из волокон и связующего) и макронеоднородностью (слоистая структура, составленная из монослоев, с произвольной укладкой по толщине пакета). Отсюда два направления в механике композитов: микро- и макромеханика. Сочетанию микро- и макроструктур композита в задаче оптимизации посвящена недавняя работа коллектива зарубежных авторов [1]. Для зарубежной литературы характерно наличие большого количества работ по композитам, описывающих гиперупругость при условии конечных деформаций, например [2; 3]. Структурно-неоднородная среда по своему физико-механическому поведению значительно богаче однородного материала. Разнообразие возможных ситуаций в процессе деформирования и разрушения композитов делает изучение этих материалов привлекательным для специалистов из разных областей механики твердого тела. Например, в волокнистых композитах на уровне армирующих элементов всегда имеются микродефекты – трещины, обусловленные не только несовершенством технологии, но и отступлением от идеализированной модели материала. Центральным моментом в механике волокнистых композитов является существенный учет структуры материала на уровне армирующих элементов – обстоятельство, не характерное для классической механики твердого тела. На уровне армирующих элементов создаются механические свойства материала; управляя укладкой волокон, можно в определенных пределах управлять полями сопротивления материала, «подстраивая» их под действующие усилия. Общий подход построения механики волокнистых композитов представлен в монографии [4].

В настоящее время возможности существенного прироста прочностных характеристик сталей, алюми-

ниевых, титановых и магниевых сплавов практически исчерпаны, и поэтому для значительного улучшения технических параметров в объектах ответственного назначения необходимо использовать разнообразный спектр современных композитных материалов, сочетающих высокую удельную прочность и жесткость с другими цennыми качествами: высокой технологичностью изготовления конструкций из них, повышенной стойкостью к агрессивным средам.

В современной аэрокосмической промышленности широко используются тонкостенные элементы из волокнистых композитных материалов. Волокнистое армирование позволяет применять новые принципы проектирования и изготовления изделий, основанные на том, что материал и изделие создаются одновременно в рамках единого технологического процесса. В результате получается изделие с новыми уникальными эксплуатационными качествами. До недавнего времени армирование осуществлялось преимущественно прямолинейными волокнами. Такие структуры армирования не могут быть эффективны для конструкций с большими градиентами полей напряжений и деформаций в зоне отверстий и переходных элементов, часто встречающихся при создании реальных объектов. В этом случае необходимо создавать конструкции со специальными криволинейными структурами армирования, согласованными с реальными требованиями эксплуатации соответствующих изделий.

Постановка задачи. В работах [5; 6] сформулирована плоская задача армированной среды в криволинейных ортогональных координатах (ξ, η) , которая включает уравнения равновесия, обобщенный закон Дюамеля–Неймана в условиях термоупругого анизотропного деформирования [7–9], соотношения для напряжений в волокне на основе структурной модели [10]. Пусть армирование выполнено k семействами волокон, φ_m – углы армирования m -м семейством волокон ($m = 1, \dots, k$), являются непрерывными функциями координат, ε_m – деформация в волокне, ω_m – интенсивность армирования m -м семейством волокон. Деформации в волокне определим по структурной модели [10]

$$\varepsilon_{11} l_{m1}^2 + \varepsilon_{22} l_{m2}^2 + \varepsilon_{12} l_{m1} l_{m2} = \varepsilon_m^0, \quad (1)$$

где $l_{m1} = \cos \varphi_m$, $l_{m2} = \sin \varphi_m$, α_m^a – коэффициент линейного температурного расширения материала m -го семейства волокон; T – заданная постоянная температура. Напряжение в волокне σ_m находим по формуле

$$\sigma_m = E_m (\varepsilon_{11} \cos^2 \varphi_m + \varepsilon_{22} \sin^2 \varphi_m + \varepsilon_{12} \cos \varphi_m \sin \varphi_m) + \sigma_m^T, \quad (2)$$

где E_m – модуль Юнга материала m -го семейства волокон; $\sigma_m^T = E_m \alpha_m^a T$. Связь напряжений σ_{ij} и деформаций ε_{ij} для неоднородного армированного материала запишем в виде $\sigma_{ij} = a \sigma_{ij}^c + \sum_{m=1}^k \sigma_m \omega_m l_{mi} l_{mj}$,

где напряжения в связующем σ_{ij}^c определим по формулам с учетом поля температур [7]:

$$\begin{aligned} \sigma_{ii}^c &= \frac{E}{(1-v^2)} (\varepsilon_{ii} + v \varepsilon_{jj} - \alpha^c (1+v) T), \\ \sigma_{ij}^c &= \frac{E}{(1+v)} \varepsilon_{ij}, \quad j = 3-i, \quad i = 1, 2, \end{aligned}$$

где E, v, α^c – соответственно модуль Юнга, коэффициент Пуассона и коэффициент линейного температурного расширения связующего материала;

$a = 1 - \sum_{m=1}^k \omega_m$ – удельная интенсивность прослоек

связующего между армирующими слоями. Напряжения с учетом структурных характеристик имеют вид [5; 6]

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= a_{11} \varepsilon_{11} + a_{12} \varepsilon_{22} + a_{12} \varepsilon_{12} + a_{14}, \\ \sigma_{22} &= a_{12} \varepsilon_{11} + a_{22} \varepsilon_{22} + a_{23} \varepsilon_{12} + a_{24}, \\ \sigma_{12} &= a_{13} \varepsilon_{11} + a_{23} \varepsilon_{22} + a_{33} \varepsilon_{12} + a_{34}. \end{aligned} \quad (3)$$

Приведем коэффициенты в (3) a_{ij} , $i = \overline{1, 3}$, $j = \overline{1, 4}$, учитывающие все структурные характеристики и влияние поля температур:

$$\begin{aligned} a_{11} &= m_1 + \sum_{m=1}^m E_m \omega_m \cos^4 \varphi_m, \\ a_{12} &= v m_1 + \sum_{m=1}^m E_m \omega_m \sin^2 \varphi_m \cos^2 \varphi_m, \\ a_{13} &= \sum_{m=1}^m E_m \omega_m \cos^3 \varphi_m \sin \varphi_m, \\ a_{22} &= m_1 + \sum_{m=1}^m E_m \omega_m \sin^4 \varphi_m, \\ a_{23} &= \sum_{m=1}^m E_m \omega_m \cos \varphi_m \sin^3 \varphi_m, \\ a_{33} &= m_2 + \sum_{m=1}^m E_m \omega_m \sin^2 \varphi_m \cos^2 \varphi_m, \\ a_{14} &= -m_1 L^T + \sigma_m^T \omega_m \cos^2 \varphi_m, \\ a_{24} &= -m_1 L^T + \sigma_m^T \omega_m \sin^2 \varphi_m, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} a_{34} &= -m_1 L^T + \sigma_m^T \omega_m \sin \varphi_m \cos \varphi_m, \\ m_1 &= a \frac{E}{1-v^2}, \quad m_2 = a \frac{E}{1+v}, \\ L^T &= \alpha^c (1+v) T. \end{aligned}$$

При наложении дополнительных условий постоянства сечений волокон, что соответствует условиям технологического процесса, интенсивность армирования ω_m удовлетворяет следующим соотношениям [11]

$$\frac{\partial}{\partial \xi} (H_2 \omega_m \cos \varphi_m) + \frac{\partial}{\partial \eta} (H_1 \omega_m \sin \varphi_m) = 0. \quad (5)$$

Интенсивность ω_m определяется из (5) после вычисления углов армирования при задании уравнений конкретных траекторий армирования и начальных условий выхода арматуры. В работе [12] построены изогональные траектории к данным семействам плоских кривых, что расширяет многообразие непрерывных криволинейных траекторий.

В рамках прямой задачи (известна структура армирования) замкнутая разрешающая система формулируется относительно компонент тензора деформации, поставлена краевая задача в криволинейных координатах [5; 6]. Коэффициенты системы и краевых условий содержат все структурные характеристики композита: заданные углы армирования, интенсивность армирования, механические характеристики материалов связующего и арматуры. В случае осесимметрической задачи (концентрическое кольцо) армирование проводится одним, двумя и тремя семействами волокон, представляющих собой алгебраические спирали и им изогональные траектории [12]. Разрешающая система формулируется в перемещениях и приводит к краевой задаче для системы обыкновенных дифференциальных уравнений относительно радиального и окружного перемещений. Особенность полученной системы состоит в том, что она является системой, неразрешенной относительно старшей производной. На основе монографии [13] для такой системы разработан новый эффективный численный метод, учитывающий особенности армированной среды и уменьшающий ошибки численного счета [14]. Такой подход позволяет решать задачи о криволинейно армированных вращающихся дисках, являющихся элементами конструкций ответственного назначения [15].

Анализ признака «расход арматуры». Для анализа эффективности конструкции вводится характеристика армирования – расход арматуры [11]. Обозначим ее символом B . Для армирования кольцевой пластины двумя семействами волокон в полярной системе координат расход арматуры определяется по формуле

$$B = \int_{R_1}^{R_2} R (\omega_1(R) + \omega_2(R)) dR,$$

где R – линейный размер пластины, $R \in [R_1, R_2]$; ω_1 – интенсивность армирования первым семейством

волокон; ω_2 – интенсивность армирования вторым семейством волокон. Проводится анализ зависимости B от начальных стадий технологического процесса – начальных интенсивностей армирования двумя семействами армирующих волокон для различных структур армирования.

Интенсивности армирования для данных структур найдены в аналитическом виде как решение задачи Коши дифференциальных уравнений, представляющих условия постоянства сечений волокон (5). Они определяются по следующим формулам для армирования семейством логарифмических спиралей и семейством «спицы велоколеса»:

$$\omega_1 = \frac{\omega_{10} \sqrt{R_l}}{\sqrt{R}},$$

$$\omega_2 = \frac{\omega_{20} \sqrt{R} \left(R_l^2 - (R_l \sin \theta_0)^2 \right)^{\frac{1}{4}}}{\sqrt{R} \left(R^2 - (R_l \sin \theta_0)^2 \right)^{\frac{1}{4}}}.$$

Для армирования вдоль траекторий семейства спиралей Архимеда интенсивность имеет вид

$$\omega_3 = \frac{\omega_{30} \sqrt{R_l^2 + R^2 \tan^2 \phi_0}}{R \sqrt{1 + \tan^2 \phi_0}},$$

для траекторий, изогональных к семейству логарифмических спиралей, интенсивность армирования задается формулой

$\omega_4 = \frac{\omega_{40} \sqrt{R_l}}{\sqrt{R}}$, где $\omega_{10}, \omega_{20}, \omega_{30}, \omega_{40}$ – начальные интенсивности армирования семействами волокон; θ_0, ϕ_0 – начальные углы выхода арматуры.

На рисунке в осях интенсивностей армирования ω_1 , ω_2 показано влияние выбранных начальных условий технологического процесса (в соответствии с таблицей) на признак B «расход арматуры» для различных криволинейных структур армирования.

Развиваемый подход в рамках единой вычислительной схемы позволяет управлять свойствами волокнистого композита, создавать эффективные и рациональные проекты для плоских конструкций как элементов конструкций ответственного назначения.

Сформулированная плоская задача армированной среды в криволинейных ортогональных координатах позволяет решать и обратную задачу по определению эффективной рациональной структуры, если к ней добавить требования равнодеформируемости волокон или равнотрециностойкости в связующем по критерию Баландина [16].

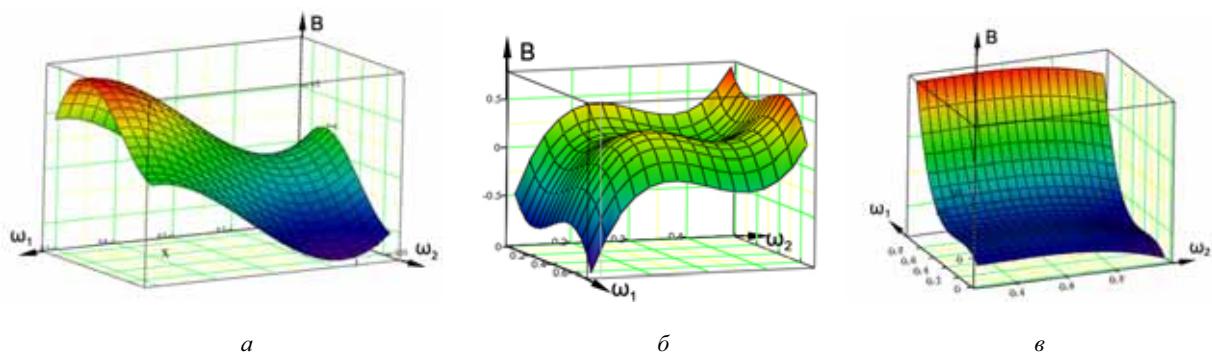
Постановка задачи об армированной пластине с равной трещиностойкостью связующего. Рассматривается пластина, полученная из набора прослоек связующего и прослоек арматуры, симметричных относительно срединной поверхности. Прослойки тонкие, поэтому реализуется плоское напряженное состояние. Пусть температура $T = \text{const}$ постоянная по толщине пластины.

Запишем полные деформации $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{12}$ в декартовой системе координат как сумму механических и тепловых деформаций:

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{11}^{\text{mech}} + \alpha^c T, \quad \varepsilon_{22} = \varepsilon_{22}^{\text{mech}} + \alpha^c T, \quad \varepsilon_{12} = \varepsilon_{12}^{\text{mech}} + \alpha^c T.$$

Параметры технологического процесса

ω_{01} – начальная интенсивность армирования первого семейства волокон	ω_{02} – начальная интенсивность армирования второго семейства волокон	θ_0 – начальный угол выхода семейства «спицы велоколеса»
0,3	0,3	$\pi/4$
0,05	0,376	$\pi/12$
0,1	0,318	$5\pi/4$
0,51	0,18	$7\pi/4$



Расход арматуры B (ось аппликат) для: a – структуры армирования «семейство логарифмических спиралей» и «спицы велоколеса»; b – структуры «семейство спиралей Архимеда» и «спицы велоколеса»; c – семейства логарифмических спиралей и им изогональных траекторий

Потенциальная энергия в прослойках изотропного связующего равна

$$W = \sigma_{11}^c \varepsilon_{11}^{\text{mech}} + \sigma_{22}^c \varepsilon_{22}^{\text{mech}} + 2\sigma_{12}^c \varepsilon_{12}^{\text{mech}},$$

где напряжения в связующем заданы соотношениями

$$\begin{aligned}\sigma_{11}^c &= d_{11} \varepsilon_{11}^{\text{mech}} + d_{12} \varepsilon_{22}^{\text{mech}} = \\ &= d_{11} \varepsilon_{11} + d_{12} \varepsilon_{22} - (d_{11} + d_{12}) \alpha^c T, \\ \sigma_{22}^c &= d_{11} \varepsilon_{22}^{\text{mech}} + d_{12} \varepsilon_{11}^{\text{mech}} = \\ &= d_{12} \varepsilon_{11} + d_{11} \varepsilon_{22} - (d_{11} + d_{12}) \alpha^c T, \\ \sigma_{12}^c &= d_{13} \varepsilon_{12}.\end{aligned}\quad (6)$$

С учетом (6) потенциальная энергия запишется как

$$\begin{aligned}W &= b_{11} \varepsilon_{11}^2 + b_{12} \varepsilon_{22}^2 + b_{13} \varepsilon_{12}^2 + b_{14} \varepsilon_{11} \varepsilon_{22} + \\ &+ b_{15} \varepsilon_{11} + b_{16} \varepsilon_{22} + b_{17} = W_c = \text{const.}\end{aligned}\quad (7)$$

Коэффициенты в (7) для изотропного связующего имеют вид

$$\begin{aligned}b_{11} &= b_{12} = \frac{E}{1-v^2}, \quad b_{13} = \frac{E}{2(1+v)}, \\ b_{14} &= \frac{2vE}{1-v^2}, \quad b_{15} = -\frac{2\alpha^c T v E}{1-v^2}, \\ b_{16} &= -\frac{2E\alpha^c T}{1-v^2}, \quad b_{17} = \frac{2(\alpha^c T)^2 E}{1-v}.\end{aligned}$$

Условие совместности деформаций в декартовой системе координат имеет вид

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{11}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{22}}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \varepsilon_{12}}{\partial x \partial y}. \quad (8)$$

Пусть $2h$ – толщина пластины, δ_1 – толщина армирующего слоя первого направления φ_1 с интенсивностью армирования ω_1 , δ_2 – толщина армирующего слоя второго направления φ_2 с интенсивностью армирования ω_2 . Тогда усилия запишем в виде

$$\begin{aligned}N_{11} &= 2(h - \delta_1 - \delta_2) \sigma_{11}^c + 2\delta_1 [(1 - \omega_1) \sigma_{11}^c + \omega_1 \sigma_1^a] \times \\ &\times \cos^2 \varphi_1 + 2\delta_2 [(1 - \omega_2) \sigma_{11}^c + \omega_2 \sigma_2^a] \cos^2 \varphi_2, \\ N_{22} &= 2(h - \delta_1 - \delta_2) \sigma_{22}^c + 2\delta_1 [(1 - \omega_1) \sigma_{22}^c + \omega_1 \sigma_1^a] \times \\ &\times \sin^2 \varphi_1 + 2\delta_2 [(1 - \omega_2) \sigma_{22}^c + \omega_2 \sigma_2^a] \sin^2 \varphi_2, \\ N_{12} &= 2(h - \delta_1 - \delta_2) \sigma_{12}^c + 2\delta_1 [(1 - \omega_1) \sigma_{12}^c + \omega_1 \sigma_1^a] \times \\ &\times \sin \varphi_1 \cos \varphi_1 + 2\delta_2 [(1 - \omega_2) \sigma_{12}^c + \omega_2 \sigma_2^a] \sin \varphi_2 \cos \varphi_2,\end{aligned}$$

где σ_1^a, σ_2^a – напряжения в волокнах арматуры первого и второго семейства соответственно. Их зависимость от температуры задается в виде

$$\sigma_1^a = E_1 (\varepsilon_1 - \alpha_1^a T), \quad \sigma_2^a = E_2 (\varepsilon_2 - \alpha_2^a T),$$

где деформации в волокнах определяются по формуле (1). Уравнения равновесия в усилиях запишутся как

$$\frac{\partial N_{11}}{\partial x} + \frac{\partial N_{12}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial N_{12}}{\partial x} + \frac{\partial N_{22}}{\partial y} = 0. \quad (9)$$

Вводится условие постоянства сечений волокон (5) в декартовой системе координат, а именно:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial x} (\omega_1 \cos \varphi_1) + \frac{\partial}{\partial y} (\omega_1 \sin \varphi_1) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial x} (\omega_2 \cos \varphi_2) + \frac{\partial}{\partial y} (\omega_2 \sin \varphi_2) &= 0.\end{aligned}\quad (10)$$

Совокупность уравнений (7)–(10) позволяет решить задачу о нахождении направлений армирующих слоев рассматриваемой пластины в условиях термоупругого деформирования, т. е. решить обратную задачу с дополнительным условием равной трещиностойкости связующего. При введении начальных условий на интенсивности армирования и краевых условий на внешнем контуре получаем замкнутую систему по определению траекторий армирования.

Заключение. Развиваемый подход в рамках единой вычислительной схемы позволяет управлять свойствами волокнистого композита, создавать эффективные и рациональные проекты для плоских конструкций как элементов конструкций ответственного назначения.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке грантом Российской фонда фундаментальных исследований № 14-01-90400 Укр_a.

Acknowledgments. The work was performed with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (grant №14-01-90400 Ucr_a).

Библиографические ссылки

1. Multi-scale design of composite materials and structures for maximum natural frequencies / Zhi Hao Zuoa [et al.] // Materials & Design. 2013. Vol. 51. P. 1023–1034.
2. Azimuthal shear of a transversely isotropic elastic solid / F. Kassianides [et al.] // Math. Mech. Solids. 2008. Vol. 13. P. 690–724.
3. Jog C. S. The equation of equilibrium in orthogonal curvilinear reference Coordinates // Journal of Elasticity. 2011. Vol. 104. P. 385–395.
4. Vasiliev V. V., Morozov E. V. Advanced Mechanics of Composite Materials. Elsevier, Oxford, 2007. 505 p.
5. Немировский Ю. В., Федорова Н. А. Математическое моделирование плоских конструкций из армированных волокнистых материалов : монография / СФУ. Красноярск, 2010. 136 с.
6. Немировский Ю. В., Федорова Н. А. Исследование рациональных структур криволинейного армирования в полярной системе координат // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. физ.-мат. наук. 2013. № 1(30). С. 233–244.
7. Коваленко А. Д. Введение в термоупругость. Киев : Наук. думка, 1965. 204 с.
8. Modeling of thermomechanical behavior of layered plates at technological thermal radiation / A. Gachkevich [et al.] // Manufacturing processes. Actual problems. Vol. 2. Modelling and optimization of manufacturing processes / Ed. by: M. Gajek, O. Hachkevych, A. Stanik-Besler. Opole : OWPO, 2013. С. 221–234.
9. Немировский Ю. В., Терлецкий Р., Федорова Н. А. Предельные деформации термоупругих плоских

конструкций с криволинейным армированием // Решетневские чтения : материалы XIX Междунар. науч.-прак. конф. (10–14 нояб. 2015, г. Красноярск). В 2 ч. Ч. 2. / под. общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2015. С. 130–131.

10. Nemirovsky Yu. V. On the elastic behavior of the reinforced layer // Int. J. Mech. Sci. 1970. Vol. 12. P. 898–903.

11. Бушманов С. Б., Немировский Ю. В. Оптимальное армирование пластин при плоском напряженном состоянии // Прикл. механика и техн. физика. 1983. № 5. С. 158–165.

12. Федорова Н. А. Моделирование изогонально армированных кольцевых пластин в полярной системе координат // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. «Математика и физика». 2011. № 4(3). С. 400–405.

13. Бабенко К. И. Основы численного анализа. М. : Наука, 1986. 740 с.

14. Федорова Н. А. Построение эффективного численного метода решения осесимметрической задачи армированной среды // Численные методы решения задач теории упругости и пластичности : тезисы докладов XXIV Всерос. конф. (2–4 июня 2015, г. Омск) / под ред. ак. В. М. Фомина. Новосибирск, 2015. С. 200–204.

15. Немировский Ю. В., Федорова Н. А. Предельное деформирование дисков газовых и гидротурбин при различных структурах армирования // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56, № 7/3. С. 191–196.

16. Немировский Ю. В., Резников Б. С. Прочность элементов конструкций из композитных материалов. Новосибирск : Наука, 1986. 165 с.

References

- Zhi Hao Zuoa, Xiaodong Huang, Jian Hua Rongb, Yi Min Xie. Multi-scale design of composite materials and structures for maximum natural frequencies. *Materials & Design*, 2013, Vol. 51, P. 1023–1034.
- Kassianides F., Ogden R. W., Merodio J., Pence T. J. Azimuthal shear of a transversely isotropic elastic solid. *Math. Mech. Solids*, 2008, Vol. 13, P. 690–724.
- Jog C. S. The equation of equilibrium in orthogonal curvilinear reference Coordinates. *Journal of Elasticity*, 2011, Vol. 104, P. 385–395.
- Vasiliev V. V., Morozov E. V. Advanced Mechanics of Composite Materials. Elsevier, Oxford, Great Britain, 2007, 505 p.
- Nemirovskiy Yu. V., Feodorova N. A. *Matematicheskoe modelirovanie ploskikh konstruktsii iz armovann'ykh voloknist'ykh materialov*. [Mathematical modeling of the plane constructions from reinforced fibrous materials]. Krasnoyarsk, Sib. Fed. Univ. Publ., 2010, 136 p. (in Russ.).
- Nemirovskiy Yu. V., Feodorova N. A. [Study of curvilinear reinforcement rational structures in polar

coordinate system]. *Vestn. Samar. Gos. Techn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki*. 2013, No 1 (30), P. 233–244 (In Russ.).

7. Kovalenko A. D. *Vvedenie v termouprugost*. [Introduction to thermoelasticity]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1965, 204 p. (In Russ.).

8. Gachkevich A., Kushnir R., Nemirovsky Yu., Terletsky R., Tury O. Modeling of thermomechanical behavior of layered plates at technological thermal radiation. *Manufacturing processes. Actual problems – 2013, vol. 2. Modeling and optimization of manufacturing processes* Ed. by: M. Gajek, O. Hachkevych, A. Stanik-Besler / *Studia i monografie*, z. 365. Glava 17. Opole : OWPO, 2013, P. 221–234.

9. Nemirovsky Yu. V., Terletsky R., Feodorova N. A. [Breaking strains of planar thermoelastic constructions reinforced by curvilinear structures] *Reshetnevskie chteniya : materialy XIX Mezhdunar. nauch.-prak. Konf. (10–14 noyab. 2015, g. Krasnoyarsk)* [Reshetnev Readings: proceedings of VII Intern. scientific-practical Conf. (Nov 10–14, 2015, Krasnoyarsk)]. 2015, Krasnoyarsk, SibSAU Publ. Ch. 2. P. 130–131 (In Russ.).

10. Nemirovsky Yu. V. On the elastic behavior of the reinforced layer. *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 12, 1970, P. 898–903.

11. Bushmanov S. B., Nemirovskij Ju. V. [Optimum reinforcing of plates at a flat tension]. *Prikl. mekhanika i tekhn. fizika*. 1983, No. 5, P. 158–165 (In Russ.).

12. Feodorova N. A. [Modeling for Reinforced with Isogonal Trajectories Ring-Shaped Lames in Polar Coordinate System]. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics&Physics*, 2011, 4(3), P. 400–405 (In Russ.).

13. Babenko K. I. *Osnovy chislennogo analiza*. [Bases of the numerical analysis]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 740 p.

14. Feodorova N. A. [Creation of an effective numerical method of the solution of an osesimmetrichesky problem of the reinforced environment]. *Chislennye metody resheniya zadach teorii uprugosti i plastichnosti : Tezisy dokladov XXIV Vserossiyskoy konferentsii. Omsk, 2–4 iyunya, 2015. Pod redaktsiey akademika V. M. Fomina*. [Numerical methods for solving problems of the theory of elasticity and plasticity: Abstracts of XXIV All-Russian Conference. Omsk, June 2–4, 2015]. Novosibirsk, 2015, P. 200–204 (In Russ.).

15. Nemirovskiy Yu. V., Feodorova N. A. [The limit deformation disks of gas and water turbines at various reinforcement structures]. *Izvestia vuzov. Phisics*, 2013, Vol. 56, No 7/3, P. 191–196 (In Russ.).

16. Nemirovskiy Yu. V., Reznikov B. S. *Prochnost' elementov konstruktsiy iz kompozitnykh materialov* [Strength of elements of designs from composite materials]. 1986, Novosibirsk, Nauka Publ., 165 p. (In Russ.).

A MATHEMATICAL MODEL OF OIL PRICE ASSESSMENT

K. V. Safonov

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

The article deals with the development of the mathematical model of oil price assessment. The methodological foundation is determined for developing the mathematical model: two axioms stating the unique properties of oil as a commodity. The first one claims that oil is a commodity being determined at auctions and is not related to its value as a measure of abstract labor invested, the second axiom states that the markdown in oil price will not cause the increase in the demand for it, as the demand is determined only by the economy state of the demander. Among the factors of oil pricing an imbalance of oil supply and demand in the world market is chosen to be the dominant factor. The mathematical model is represented in two models. The first one assumes that for any excess of supply over demand, the price of oil tends to zero, i. e. for a sufficiently large number of auctions it becomes lower than any predefined level. The second theorem states that in the case of the excess of demand over supply oil price tends to infinity (a finite number of sessions exceeds any predefined level) in case of the dominance of imbalance. The most likely forecast resulting from the hypothesis that the developed mathematical model is correct is the trend of the price decrease reaching its extremely low level and a further transition into a long-term period characterized by the price increase trend.

Keywords: the price of oil, a mathematical model, the unique properties of the oil trade, the dominant factor in pricing, supply and demand imbalance.

Вестник СибГАУ
Том 17, № 1. С. 79–83

О МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ЦЕНЫ НА НЕФТЬ

К. В. Сафонов

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

Разработана математическая модель формирования цены на нефть. Для построения математической модели определены методологические основания: две аксиомы, устанавливающие специфические свойства нефти как товара. Первая утверждает, что нефть является товаром, цена которого определяется на аукционах и не связана с его стоимостью как мерой вложенного абстрактного труда, вторая аксиома утверждает, что снижение цены на нефть не вызывает повышения спроса на неё, поскольку спрос определяется лишь состоянием экономики покупателя. Среди факторов ценообразования нефти выбран первостепенный, доминирующий фактор – дисбаланс предложения и спроса на нефть на мировом рынке. Математическая модель представлена в двух теоремах. Первая утверждает, что при любом превышении предложения над спросом цена нефти стремится к нулю, т. е. за достаточно большое количество аукционов становится ниже любого заданного уровня. Вторая теорема утверждает, что при условии превышения спроса над предложением цена нефти стремится к бесконечности (за конечное число сессий превысит любой заданный уровень) при условии доминирования дисбаланса. Наиболее вероятным прогнозом, вытекающим из гипотезы о том, что построенная математическая модель верна, является тренд на снижение цены до предельного, экстремально низкого значения, а затем переход к длительному периоду, который характеризуется трендом роста цены.

Ключевые слова: цена на нефть, математическая модель, уникальные товарные свойства нефти, доминирующий фактор ценообразования, дисбаланс предложения и спроса.

Introduction. In the middle of 2014 the process of a markdown in oil price commenced. It became in the focus of public attention as the value of oil prices for the economies of oil-producing countries is very large [1–10]. When estimating, experts talk about a “fair” price level at which the markdown may stop. Initially the levels of \$90, \$80 and \$60 per Brent oil barrel were mentioned, gradually \$50 and \$40 were spoken of, currently a possibility of \$30 and even lower prices are predicted.

The forecasts of upcoming price increase or at least its pegging given by media are positively received by the society. Meanwhile, the markdown is running on, which actualizes the search of a reasonable and, finally, well-thought-out model of oil price forming describing the current state of affairs from the middle of 2014 to the present day. The feasibility of such models will allow to hope that the forecasting subsequent upon these models is likely to come true.

Needless to say, the public are aware of the range of factors currently encouraging the markdown. The following factors are unanimously claimed to work in such a way: excess of oil supply over demand on the world market, the change in values of the US dollar due to the actions of The Federal Reserve System of the USA, different steps taken by OPEC members, current oil reserves information, the number of drilling rigs in the USA, weather forecasts, etc.

Nevertheless, the lack of holistic comprehension of oil price forming process model in the media is acknowledged. In fact, under the conditions of progressing markdown factors, it is desirable to understand what the reasons, frequently mentioned by the experts, for upcoming price increase to any “fair” level are.

At least judging by the information presented in the media, it makes sense to speak about the fact that the contribution of each markdown factor is not differentiated enough; its importance is not fairly appreciated.

As a result, the majority of people interested in oil price as a factor affecting social policy of oil-producing countries expect positive course of events in the nearest future and the issue of excess of oil supply over demand seems to them quite solvable. Many people, for example, think that if oil supply exceeds demand by 5 %, the price will soon consequently reduce by 5 % and, as a result, a new “fair” price making 95 % of the previous one will be set which will eliminate the problem.

Of course, it is not so. Anticipating, we should note that 5 % excess of supply over demand will lead to longtime sequential multiple-stage markdown. As a result, at least theoretically, it may make 5 % of the starting price, so the reduction may make 95 % – the price will be decreased by 20 times! This is, as we will ensure, the mechanism of oil price forming.

Coming back to the feasibility of forecasting, we state that one of the ways of adequate understanding of current state of affairs is to develop a mathematical model of oil price forming.

The mathematical model should reasonably describe the markdown since the middle of 2014, explain its causes and forecast further price forming. Naturally, the model actuality should be viewed approximately, as a trend.

The aim of this article is developing and analysis of the mathematical model of oil price forming.

Developing the mathematical model of oil price forming. It should be noted that *mathematical model method* is a general-purpose and powerful instrument of human perception, especially efficacious in the cases when experiment conduction is impossible. Mathematical model method allows to study a phenomenon basing on the development and analysis of its mathematical model – an approximate description in mathematical parlance [11].

Mathematical model development implies a certain simplification of a complex phenomenon, its particular idealization basing on the identification of major factors which characterize the evolvement of the phenomenon and on neglecting minor, less important factors [12–15].

Neglecting minor factors allows developing the mathematical model basing on major dominant factors and hereafter it is sufficient to study the model thoroughly. As a result, the model response is determined approximately, as a trend fixed by major factors; the trend presumes inconspicuous movements caused by the influence of minor factors.

Mathematical modeling normally includes the following range of stages:

- Development of the mathematical model of the phenomenon based on its simplification, identification of dominant factors which cause this phenomenon;
- Exploration of the model by means of mathematical methods, gaining the information which describes the further evolvement of the phenomenon;
- Comparing of the theoretically forecast model response with what will actually occur;
- Specification and correcting of the mathematical model in case there is a difference between theoretical and practical aspects;
- Exploration of the specified model, description of its response;
- Repeated correcting of the mathematical model basing on the comparison of theory and practice etc.

It should be realized that mathematical model development is to be relied on solid methodological foundation, well-proven facts and information. In our case such a foundation can be represented by the unique properties of oil as a commodity which make it different from many other commodities. It seems reasonable to associate oil price behavior with its specific commodity properties as many other commodity prices, unlike oil price, do not show sustained drop.

What are the unique properties of such a commodity as oil, or, to be more precise, the specific properties of its price forming which can be used as a methodological foundation of the prospective mathematical model?

In fact, these commodity properties of oil are well-known, however, it is essential to see their true value. We suggest using these properties as the following prime postulates which act as the axioms describing oil price forming principles.

The following two statements are suggested as such axioms.

Axiom 1. Oil is a commodity which price is determined at auction sellings on several fixed venues and is not directly related to its cost as a measure of abstract

labor invested and to the market price of other commodities which, unlike oil price, are determined by millions of market transactions.

The essence of axiom 1 seems to be well-known. We pay attention to the fact that it underlines the weak connection of a forming oil price with its actual cost which is determined by average production expenses. Thus, the possibility of a considerable gap between the price and the cost, both downward and upward, is postulated.

Axiom 2. Oil price markdown does not trigger increase in demand, as it is determined by the economy state of a demander; increase in demand is possible only at a low price for oil reservation purposes, however, the extra demand exists only provided that oil price is low and reduces as soon as the price rises.

The content of Axiom 2 is also well-known. We will note that this property of oil differs from many other commodities, cheapening of which leads to expansion of consumption.

The emphasis is laid on the fact that these statements are empiric basing on the experience of human activity related to oil extraction and marketing, they have been proved through practice over decades, they are axioms from the logical point of view and require no further proof.

The aggregate of these two simple axioms is almost sufficient for understanding the main trends in price forming. The missing link for developing the mathematical model of oil price forming is, as it was mentioned before, the identification of major and minor price-forming factors.

In our opinion, *the major foremost factor of oil price change is the imbalance of supply and demand; the value of this factors significantly prevails over all the other ones, making it dominant.*

In case market oil supply exceeds demand, this very factor becomes the basic one leading to the markdown; in case supply is lower than demand, the main trend shows price increase.

Relying on Axioms 1 and 2 and considering the imbalance of supply and demand to be dominant, we obtain the mathematical model of oil price forming by two basic theorems.

The first one corresponds to the current state of affairs of exceeding supply over demand, namely, the following theorem describing the main trend in price forming is fair:

Theorem 1. If oil market supply exceeds demand for any arbitrarily small value $\Delta_1 > 0$, realized by market participants, in the process of repeated auction selling oil price tends to zero, i. e. in finite number of steps it becomes lower than any predefined level.

In case demand exceeds supply, price forming is described by the following theorem.

Theorem 2. If oil market demand exceeds supply for any arbitrarily small value $\Delta_2 > 0$, realized by market participants, in the process of repeated auction selling oil price tends to infinity, i. e. in finite number of steps it will exceed any predefined level becoming nonproportionally high in relation to the cost of other commodities.

Naturally, these theorems are provable. The proof of theorem 1. As supply exceeds demand, the auction

participants are forced to agree on the price lowering by a certain value, for example, by \$0.5 in order to sell their oil volumes. According to axiom 1, both demanders and suppliers, determining oil price at the next session of auction selling, will see that, according to Axiom 2, the demand does not increase, which still means $\Delta_1 > 0$, leading suppliers to the necessity of reducing the price by \$0.5. As a result of the iterative process, in finite number of steps the oil price will arbitrarily tend to zero.

The prove to theorem 2. If supply is lower than demand, the demanders at auction selling agree on a certain price increase, say, at \$0.5 in order to purchase required amounts of oil. In compliance with axiom 1, both demanders and suppliers, determining oil price at the next session of auction selling, will see that the demand does not reduce, which still means $\Delta_2 > 0$, leading demanders to the necessity of agreeing on a \$0.5 price increase again. As a result of repeating auctions, in a finite number of trading sessions oil price may exceed, at least theoretically, any predefined level.

We should underline the fact that, firstly, oil price is determined by the results of auctions that is why these results depend mainly on supply and demand balance. For example, if milk price were determined in the same way, it would differ from the one we see in shops, it could take on surprising values.

Secondly, the theorems say about the supply and demand im/balance value “realized by market participants”. We imply that market participants realize and weigh all the aggregate of factors affecting the price including oil reserves information, the number of drilling rigs in the USA, Chinese economy state information, geopolitical events, weather forecasts, etc. Evaluation of excess supply over demand is conducted with regard to all the minor factors and definitely includes emotional component.

Analysis of the developed mathematical model. We will show what conclusions can be drawn when analyzing the developed mathematical model. Relating to the current state of events, the price forming mechanism described by theorem 1 results in the following statements.

Firstly, it is not correct to speak about, as it occurs sometimes, oil price slump; the price lowers quite smoothly, without leaps, which proves once again that the main reason is quite explainable and is the excess of supply over demand.

Secondly, there is no a priori certain fair price. Being launched due to certain conditions (excess of supply over demand), price reduction process cannot cease on its own accord while the condition is fulfilled. The cease can occur only when supply and demand are balanced and the price formed under such a condition can be considered fair.

Thirdly, the current market situation is characterized by a significant steady excess of supply over demand. As it becomes clear, there is no use expecting the price to stop as a result of imbalance elimination. As the result of decrease process the price may reach an extremely low level and stop just right after it because further decrease is impossible. In practice this level may be about \$10 (for oil price it is a “physical” zero, further decrease bears

no sense). To some extent, it would be the fair price corresponding to the situation. Reaching this level may occur in a relatively short period of time, for example, within half-year.

When experts say that the fair price is \$40 or \$50, they surreptitiously compare the price with minimal production expenses, i. e. with the cost which, as we see, has nothing to do with oil price.

Fourthly, price decrease process can be controlled only by decreasing oil supply on the world market.

Fifthly, the most important conclusion is related to the answer to the key question: what will happen when the price reaches “zero level”, but supply still exceeds demand?

Theorem 1 cannot be applied in this case as the price can no longer decrease. There is also no reason to forecast a small price bounce and further retrieval to the zero level. It seems that such a situation should be described within a framework of a special mathematical model which is beyond the scope of this article.

Anyway, logical and practical way out of the situation of reaching a rock bottom price level may be to acknowledge one of the scenarios: either supply stops exceeding demand, or supply excess ceases being a dominant factor, which has been mentioned above, and another factor becomes dominant.

In the first case, when supply reduces, the conditions of theorem 2 will start acting, according to which the price will start increasing unrestrictedly.

In the second case other dominant factors will appear. Basing on the hypothesis that this mathematical model is correct, market participants are very likely to change the behavior. Indeed, black marketers play an important role making profit on oil price changes. The situation in which they are not able to move down will lead to their necessity to gain profit from the realization of price increase sustained trend. Thus, in both cases the commence of unrestricted price increase process is most likely to happen. According to the developed theory and the standing practice it can be forecast that the maximum markdown and moving to increase period is possible in the period from six months to one year.

The increase period duration, as it can be assumed, will be sufficient enough for the price to reach a high level stage by stage.

Sixthly, the represented mathematical model allows to derive a range of conclusions, for example, that longtime pricing at the level of approximately \$50 under the condition of imbalance is impossible for a long period of time, say, one year. At the same time it should be noted that the average price for this period can be quite high due to the fact that a significant markdown can be compensated by a considerable increase.

Conclusion. This article presents and works out the problem of developing the mathematical model of oil price forming.

The methodological foundation is determined for the development of such a mathematical model. The two axioms stating the unique properties of oil as a commodity are chosen as the basis. The first axiom says that oil is the commodity which price is determined at auctions on 2–3 world venues and is not directly related

to its cost as a measure of abstract labor invested and the prices of other commodities which are determined as a result of a great number of market transactions.

The weak connection of the forming oil price with its actual cost which is objectively determined by average market production expenses postulates the possibility of a considerable gap between the price and the cost, both downward and upward.

The second axiom states that the markdown in oil prices involves no demand increase for it, as the demand is determined by the economy state of a demander; market demand increase is possible at a lower price as a part of demanders can purchase oil for reservation purposes, however, extra demand exists only under condition of a low price and it vanishes if the price increases. This commodity property of oil is essential as it differs oil from the majority of commodities, cheapening of which leads to a significant increase of consumption.

These statements are empirical basing on the long-term experience of oil extracting and marketing and are axiomatic from the logical point of view.

Among the factors that determine oil price the imbalance of supply and demand on the world market is chosen as a major dominant factor.

Neglecting multiple minor factors allows to develop the mathematical model basing on the mentioned dominant factor and to analyze it. As a result, the mathematical model response is described approximately, presuming inconspicuous movements which are generated by the influence of minor factors.

The mathematical model is presented in two theorems. The essence of the first one is that oil price becomes lower than any predefined level in a considerable number of auctions under every excess of supply over demand.

The second theory claims that oil price will exceed any predefined level in a finite number of trading sessions under the condition of exceeding demand over supply.

The developed mathematical model, as it must be, provides a certain simplification, idealization of oil price forming process. Nevertheless, it is simple, it has a clear reasoning and is practically confirmed: it is the only model to adequately describe the current state of events on the oil market.

The most likely forecast resulting from the developed mathematical model is the decrease of the price reaching its extremely low level and a further transition into a long-term multiple-stage period of its increase.

Of course, if the oil supply will be limited and become lower than its demand, price markdown will cease and, according to theorem 2, the price will be increasing.

References

1. *Neft' podorozhala na 3 % v posledniy den' 2015 goda* [Oil rose by 3% in the last day of 2015] (In Russ.). Available at: <http://www.vestifinance.ru/articles/66055> (accessed 02.01.2016).
2. *SMI: stoimost'バレルya nefti prevysit v 2016 godu 50 dollarov* [Media: the price of a barrel of oil will exceed \$50 in 2016] (In Russ.). Available at: <http://www.banki.ru/news/lenta/?id=8564375&r1=rss&r2=common&r3=news> (accessed 02.01.2016).

3. *Barrel' Brent opustilsya do \$36,6* [A barrel of Brent fell to \$36,6] (In Russ.). Available at: <http://www.vedomosti.ru/business/news/2015/12/31/62299-barrel-brent-opustilsya-do-366/> (accessed 02.01.2016).

4. *Brent i WTI poteryali v tsene posle dannykh o roste zapasov v SShA* [Brent and WTI lost value after data on growth of stocks in the United States] (In Russ.). Available at: <http://www.vedomosti.ru/economics/news/2015/12/30/622986-brent-wti> (accessed 02.01. 2016).

5. *Mirovye tseny na neft' torguyutsya raznopravlenno* [Global oil prices traded mixed] (In Russ.). Available at: http://www.gazeta.ru/business/news/2015/12/31/n_8080025.shtml (accessed 02.01.2016).

6. *Tseny na neft' uskorili padenie: zapasy rastut, spros snizhaetsya, prognozy ne obnadezhivayut* [Oil prices accelerated their decline: stocks are rising, demand is slowing, the forecasts are not encouraging] (In Russ.). Available at: <http://www.newsru.com/finance/30dec2015/oilafternoon.html> (accessed 02.01.2016).

7. *Retsessiya, urezanie raskhodov, revolyutsiya? Kak nizkie tseny na neft' skazyvayutsya na neftyanykh derzhavakh* [The recession, cuts in expenditures, the revolution? How low oil prices affect oil powers] (In Russ.). Available at: <http://inopressa.ru/article/30Dec2015/guardian/oil.html> (accessed 02.01.2016).

8. *Esli tseny na neft' sorta Brent dostignut \$30 za barrel', para dollar/rubl' protestiruet uroven' 78* [If the price of Brent crude oil reached \$30 per barrel, the dollar/ruble will test the level of 78] (In Russ.). Available at: <http://www.finam.ru/analysis/marketnews90CFF> (accessed 02.01.2016).

9. *Siriya, Turtsiya, OPEK. Samye krutye momenty padeniya i rosta tseny nefti v 2015 g* [Syria, Turkey, OPEC. The coolest moments of the rise and fall of oil prices in 2015] (In Russ.). Available at: URL: <http://neftegaz.ru/news/view/144907> (accessed 02.01.2016).

10. *Sberbank CIB zayavil o nepredskazuemosti ekonomicheskoy dinamiki pri nefti nizhe \$25* [Sberbank CIB announced the unpredictability of the economic dynamics in oil below \$25] (In Russ.). Available at: <http://www.vedomosti.ru/finance/news/2015/12/30/622949-sberbank-cib> (accessed 02.01.2016).

11. *Matematicheskaya entsiklopediya*. [Mathematical encyclopedia]. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1982, Vol. 3, 574 p. (In Russ.).

12. Samarskiy A. A., Mikhaylov A. P. *Matematicheskoe modelirovanie: Idei. Metody. Primery*. [Mathematical modeling: Ideas. Methods. Examples]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 2001, 320 p. (In Russ.).

13. Abramov A. P., Ivanilov Yu. P. *Fizika i matematicheskaya ekonomika* [Physics and mathematical Economics]. Moscow, Znanie Publ., 1991, 32 p. (In Russ.).

14. Lotov A. V. *Vvedenie v ekonomiko-matematicheskoe modelirovanie* [Introduction to economic-mathematical modeling]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 392 p. (In Russ.).

15. Kantorovich L. V., Gorstko A. B. *Optimal'nye resheniya v ekonomike* [Optimal Solutions in Economics]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 229 p. (In Russ.).

Библиографические ссылки

1. Нефть подорожала на 3 % в последний день 2015 года [Электронный ресурс]. URL: <http://www.vestifinance.ru/articles/66055> (дата обращения: 02.01.2016).

2. СМИ: стоимость барреля нефти превысит в 2016 году 50 долларов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.banki.ru/news/lenta/?id=8564375&r1=rss&r2=common&r3=news> (дата обращения: 02.01.2016).

3. Баррель Brent опустился до \$36,6 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.vedomosti.ru/business/news/2015/12/31/622999-barrel-brent-opustilsya-do-366> (дата обращения: 02.01.2016).

4. Brent и WTI потеряли в цене после данных о росте запасов в США [Электронный ресурс]. URL: <http://www.vedomosti.ru/economics/news/2015/12/30/622986-brent-wti> (дата обращения: 02.01.2016).

5. Мировые цены на нефть торгуются разнонаправленно [Электронный ресурс]. URL: http://www.gazeta.ru/business/news/2015/12/31/n_8080025.html (дата обращения: 02.01.2016).

6. Цены на нефть ускорили падение: запасы расстут, спрос снижается, прогнозы не обнадеживают [Электронный ресурс]. URL: <http://www.newsru.com/finance/30dec2015/oilafternoon.html> (дата обращения: 02.01.2016).

7. Рецессия, урезание расходов, революция? Как низкие цены на нефть сказываются на нефтяных державах [Электронный ресурс]. URL: <http://inopressa.ru/article/30Dec2015/guardian/oil.html> (дата обращения: 02.01.2016).

8. Если цены на нефть сорта Brent достигнут \$30 за баррель, пара доллар/рубль протестирует уровень 78 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.finam.ru/analysis/marketnews90CFF> (дата обращения: 02.01.2016).

9. Сирия, Турция, ОПЕК. Самые крутые моменты падения и роста цены нефти в 2015 г. [Электронный ресурс]. URL: <http://neftegaz.ru/news/view/144907> (дата обращения: 02.01.2016).

10. Sberbank CIB заявил о непредсказуемости экономической динамики при нефти ниже \$25 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.vedomosti.ru/finance/news/2015/12/30/622949-sberbank-cib> (дата обращения: 02.01.2016).

11. Математическая энциклопедия. Т. 3. М. : Советская энциклопедия. 1982. С. 574.

12. Самарский А. А., Михайлов А. П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. 2-е изд. М. : Физматгиз, 2001. 320 с.

13. Абрамов А. П., Иванилов Ю. П. Физика и математическая экономика. М. : Знание, 1991. 32 с.

14. Лотов А. В. Введение в экономико-математическое моделирование. М. : Наука, 1984. 392 с.

15. Канторович Л. В., Горстко А. Б. Оптимальные решения в экономике. М. : Наука, 1979. 229 с.

HUMAN-HUMAN TASK-ORIENTED CONVERSATIONS CORPUS FOR INTERACTION QUALITY MODELING

A. V. Spirina^{1,2*}, M. Yu. Sidorov², R. B. Sergienko², E. S. Semenkin¹, W. Minker²

¹ Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

²Ulm University
43, Albert-Einstein-Allee, Ulm, 89081, Germany

*E-mail: s_nastia@mail.ru

Speech is the main modality for human communication. It can tell a lot about its owner: their emotions, intelligence, age, psychological portrait and others properties. Such information can be useful in different fields: in call centres for improvement in the quality of service, in designing Spoken Dialogue Systems for better adaptation of a system to users' behaviour, in the automatization of some processes for analysing people's psychological state in a situation with a high level of responsibility, for example, in a space programme. One such characteristic is the Interaction Quality. The Interaction Quality is a quality metric, which is used in the field of Spoken Dialogue Systems to evaluate the quality of human-computer interaction. As well as in Spoken Dialogue Systems, the Interaction Quality can be applied for estimating the quality of human-human conversations. As with any investigation in the field of speech analytics, for modelling the Interaction Quality for human-human conversations a specific corpus of task-oriented dialogues is required. Although there is a large number of speech corpora, for some tasks, as, for example, for Interaction Quality modelling, it is still difficult to find appropriate specific corpora. That is why we decided to generate our own corpus based on dialogues between the customers and agents of one company. In this paper we describe the current state of this corpus. It contains 53 dialogues, corresponding to 1165 exchanges. It includes audio features, paralinguistic information and experts' labels. We plan to extend this corpus both in the feature set and in the observations.

Keywords: interaction quality, human-human conversation, speech analysis, speech corpus.

Вестник СибГАУ
Том 17, № 1. С. 84–90

КОРПУС ЗАДАЧЕОРИЕНТИРОВАННЫХ ДИАЛОГОВ ТИПА «ЧЕЛОВЕК–ЧЕЛОВЕК» ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ВЗАЙМОДЕЙСТВИЯ

А. В. Спирина^{1,2*}, М. Ю. Сидоров², Р. Б. Сергиенко², Е. С. Семенкин¹, В. Минкер²

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

²Университет города Ульма
Германия, 89081, г. Ульм, аллея им. Альберта Эйнштейна, 43

*E-mail: s_nastia@mail.ru

Речь является основным способом коммуникации для человека. Она может многое рассказать о своем владельце: эмоции, уровень интеллекта, возраст, психологический портрет и не только. Такая информация может быть полезна в различных областях: в колл-центрах для улучшения качества обслуживания, при проектировании речевых диалоговых систем для лучшей адаптации системы к поведению пользователя, в автоматизации некоторых процессов анализа психологического состояния людей в ситуации с высоким уровнем ответственности, например, в космических программах. Одной из таких характеристик является Interaction Quality. Interaction Quality – это метрика качества, которая применяется в области проектирования речевых диалоговых систем для оценки качества взаимодействия между компьютером и человеком. Как и в речевых диалоговых системах, Interaction Quality может применяться для оценки качества диалога между людьми. Как и для любого исследования из области речевой аналитики, при моделировании Interaction Quality для диалогов между людьми требуется речевой корпус задачеориентированных диалогов типа «человек–человек». Несмотря на то, что существует большое количество речевых корпусов, для некоторых задач, таких как, например, моделирование Interaction Quality, все еще трудно найти подходящий речевой корпус. Именно поэтому мы решили создать собственный речевой корпус на основе диалогов между клиентами и агентами одной компании. Дается описание версии этого корпуса на текущий момент времени. Он содержит 53 диалога,

которым соответствуют 1165 обменов репликами. Данный корпус включает в себя аудиохарактеристики, парalingвистическую информацию и оценки экспертов. В дальнейшем мы планируем расширить этот корпус путем увеличения количества характеристик и количества наблюдений.

Ключевые слова: качество взаимодействия, диалог типа «человек–человек», речевая аналитика, речевой корпус.

1. Introduction

Speech analytics is applied to extract different information from speech data. Human speech can tell a lot about a person: their emotions, intelligence, age, psychological portrait and other properties. On the dialogue level it can determine for example cooperativeness between speakers, the involvement of each speaker in the dialogue and the topic of the discussion.

Speech analytics is useful for call centres in such tasks as estimating customer satisfaction and detecting problems in the agent's work. Moreover, such characteristics as customer satisfaction, emotions, Interaction Quality (IQ) and others are important for designing Spoken Dialogue Systems (SDS) for better adaptation of such systems to user behaviour through the dialogue. Besides, these characteristics can be used for the automatic assessing of relationships between people using speech. It is especially it is important for different space programmes, where the crew members spend a lot of time in a small space inside the space station.

The IQ is a quality metric, which is used in the field of SDS to evaluate the quality of human-computer (HC) interaction. The IQ metric was proposed by Schmitt et al. in [1]. This metric can be useful not only for measuring the quality of the interaction between humans and computers, but for human-human (HH) dialogues as well. The model of the IQ for HH task-oriented conversations can help then make SDS more flexible, more human-like and friendlier.

As for each investigation in the field of speech analytics, for modelling the IQ for HH conversations a specific corpus of task-oriented dialogues is required. Such a corpus can be developed based on calls from call centers offering support, information or help services. It is difficult to get access to such a database of calls as these calls contain the private information of speakers.

This is why we tried to develop the speech corpus based on a call database. This corpus consists of the calls between company workers and customers. In this paper we present a first overview on this corpus.

This paper is organized as follows. A brief description of related work (existing HH task-oriented conversation corpora) is presented in Section 2. Section 3 gives information about the developed HH task-oriented conversation corpus for the IQ modelling for HH dialogues. Section 4 introduces a description of manually annotated variables in the corpus and presents a comparison of the rules for annotating the IQ for HC and HH task-oriented spoken dialogues. In section 5 we describe future work for extending this corpus both in terms of variables and observations. Finally we present our conclusion in Section 6.

2. Related work: existing corpora

Such organisations as ERLA (European Language Resources Association) [2] and LDC (Linguistic Data Con-

sortium) [3] offer huge corpora databases for different purposes in the field of speech analytics such as:

- emotion recognition;
- speech recognition;
- language identification;
- speaker identification;
- speaker segmentation;
- speaker verification;
- topic detection and others.

Although there is a huge number of corpora, some researchers are forced to develop specific corpora for their research.

DECODA is a call centre human-human spoken conversation corpus consisting of dialogues from the call centre of the Paris public transport authority. It consists of 1514 dialogues, corresponding to about 74 hours of speech [4].

The corpus described in [5; 6] consists of 213 manually transcribed conversations of a help desk call centre in the banking domain. Unfortunately it includes text data without audio files.

Another example of a task-oriented corpus is described in [7]. The EDF (French power supply company) CallSurf corpus consists of almost 5800 calls (620 hours) between customers and operators of an EDF Pro call centre.

There are many other corpora, which are described in different papers, but some of them are difficult to find or to get access to. Some existing corpora in the field of HH task-oriented conversations are not appropriate for our task of IQ modelling for different reasons and some of them are not accessible.

The main reasons, which forced us to design our own corpus are as follows:

- such corpora as DECODA and CallSurf are in French, which makes the labelling process difficult without knowing French;
- some corpora, such as the corpus described in [5; 6], do not include audio files, which leads to a loss in information enclosed in audio features;
- some corpora, unfortunately, are not accessible to the public because the content is private information.

3. Corpus description

The current state of the corpus consists of 53 task-oriented dialogues in English between the customers and agents of one company, corresponding to about 87 minutes of signal. The raw audio data was presented in mono audio format. The average duration of a dialogue is 99.051 seconds. The distribution of dialogue duration is presented in fig. 1.

First of all it was required to perform speaker diarization. Speaker diarization consists of speaker segmentation and speaker clustering, in other words, it helps to understand who speaks in each speech fragment. We tried

to implement such open-source diarization toolkits as LIUM [8] and SHoUT [9]. Unfortunately, the results of diarization were not suitable for us, because we needed diarization without errors. That is why the diarization was performed manually with the help of the Audacity computer software application, a free open source, cross-platform software for recording and editing sounds [10]. Then the audio files were split by FFmpeg, a free software project, which includes libraries for working with multimedia data [11]. Thus 1791 audio-file fragments, which contain the speech of customers or agents or each overlapping, were extracted. In this stage such information as gender, type of speaker (customer, agent) and overlapping speech was extracted manually, although it could be done automatically, but with some error.

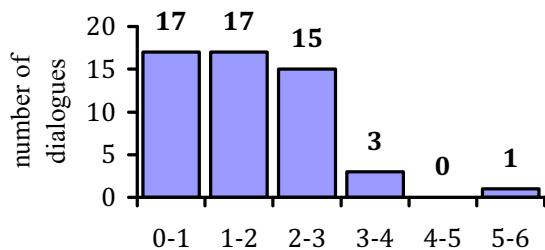


Fig. 1. Distribution of the dialogues by their duration

In the next stage all these fragments were manually joined into exchanges. Each exchange consists of the turns of a customer and an agent. All fragment concatenations can be divided into three groups: sequential, chain and mixed.

For example, we can have such a scheme of a dialogue: ACACAC, where A is the agent's turn and C is the customer's turn. The sequential type of concatenation will look like this: AC-AC-AC. If we speak about the chain type of concatenation, it will be like this: AC-CA-AC-CA-AC. An example of the mixed type of concatenation can be like this: AC-CA-CA-AC.

To concatenate turns into exchanges we applied the mixed type. Thus we retrieved 1165 exchanges.

For extracting features for the IQ modelling for HH conversation we used the three different parameter levels described in [12]. This approach consists of the three levels:

- exchange level, containing information about the current exchange;
- window level, containing information about the last n exchanges;
- dialogue level, containing information from the beginning of the dialogue up to the current exchange.

The scheme of the three different parameter levels is depicted in fig. 2.

On the exchange level there are four blocks of features:

- features, describing an exchange on the whole;
- features, describing the speech of the agent in this exchange;
- features, describing the speech of the customer in this exchange;
- features, describing overlapping speech in this exchange.

The list of the features on the exchange level is presented in tab. 1.

The list of the features on the window level and dialogue level is the same and is presented in tab. 2. The difference remains only in the number of exchanges in the computation.

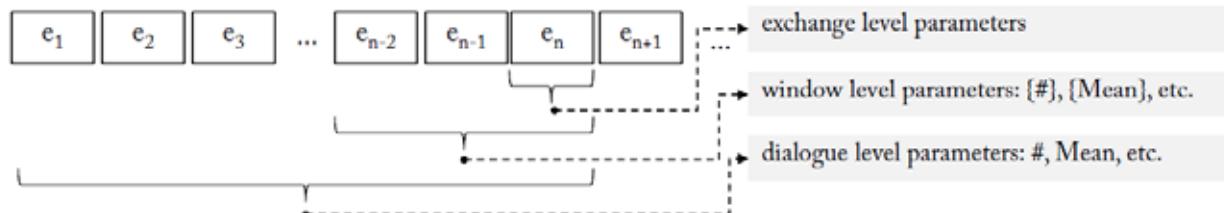


Fig. 2. This figure from [12] represents three parameter levels

Table 1

Features on the exchange level

Feature	Description
Features, describing an exchange on the whole	
Agent_speech	Is there an agent's speech in the exchange?
Customer_speech	Is there a customer's speech in the exchange?
Overlapping	Is there overlapping speech in the exchange?
{#} overlapping exchange	Number of overlapping speech moments in the exchange
Start_time	The time elapsed from the beginning of the dialogue before the start of the exchange
First_speaker	Who starts the exchange?
Duration	Duration of the exchange
First_exchange	Is the exchange first in the dialogue?
Pause_duration	Total duration of the pauses between a customer's and agent's speech in the exchange
{%} pause_duration	The percentage of the total pauses duration in the exchange

Feature	Description
Type_of_turns_concatenation	$\begin{cases} 1, & \text{if the previous exchange intersect the current exchange by the time} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$
Pause_before_duration	Duration of the pause between the current and previous exchanges
Features, describing agent speech/customer speech/overlapping speech	
Audio features	All audio features were extracted by OpenSMILE (Speech & Music Interpretation by Large Space Extraction), an open source features extraction utility for automatic speech, music, paralinguistic recognition research [13]. For extracting features we have applied the openSMILE configuration <code>emo_IS09.conf</code> . It contains 384 features, as a result of applying statistical functionals to 16 low-level descriptor contours
Split_duration	Duration of the agent's/customer's/overlapping speech in the exchange
Split_overlapping	Is there overlapping speech in the speech of an agent or customer
Start_time_split	The time elapsed from the beginning of the dialogue before the start of the agent's/customer's/overlapping speech
{%} duration	The percentage of agent's/customer's/overlapping speech duration in the exchange
Gender	Gender of the agent and customer

Table 2
Features on window/exchange level

Feature	Description
Total_duration	Total duration of exchanges
Mean_duration	Mean duration of exchange
A_duration, C_duration, O_duration	Total duration of the agent's/customer's/overlapping speech
Pauses_duration	Total duration of the pauses between customer's and agent's speech in the exchanges
A_mean_duration, C_mean_duration, O_mean_duration	Mean duration of the agent's/customer's/overlapping speech
Pause_mean_duration	Mean duration of the pause between customer's and agent's speech in the exchanges
A_percent_duration, C_percent_duration, O_percent_duration	The percentage of the agent's/customer's/overlapping speech duration
Pauses_percent_duration	Percentage of the pause duration between customer's and agent's speech
#A_start_dialogue, #C_start_dialogue, #O_start_dialogue	Number of exchanges where the first speech is agent's/customer's/overlapping speech
#overlapping	Number of the fragments with overlapping speech
Mean_num_overlapping	Mean number of the overlaps
Pauses_between_exchanges_duration	Total duration of pauses between exchanges

The manually annotated variables, such as emotions and the IQ will be discussed in the next section.

4. Annotation (Target variables)

The corpus has been manually annotated with a number of target variables, such as emotions and IQ score.

Emotions. Three sets of emotion categories were selected from [14]. The first set consists of: angry (1), sad (2), neutral (3) and happy (4). The second set includes such emotions as anxiety (1), anger (2), sadness (3), disgust (4), boredom (5), neutral (6) and happiness (7). The third set contains fear (1), anger (2), sadness (3), disgust (4), neutral (5), surprise (6) and happiness (7). All audio fragments were annotated by one expert rater. The distribution of the emotion labels for each set is presented in fig. 3.

For emotion labelling a web form was designed. This form is presented in fig. 4.

The web form depicted above has also been used to join split audio fragments into an exchange. For visualizing diarization results we used Flotr2, a library for drawing HTML5 charts and graphs [15].

IQ labels. For IQ score annotation we used adopted rater guidelines from [1]. Due to the fact that for HC interaction IQ labelling always starts with "5" and for HH conversations it can lead to a loss of useful information, we add the scale of IQ changes, which mirror the value of the change between the previous and current exchange. The rater guidelines both for the absolute scale and for the scale of changes is described in tab. 3.

All exchanges were annotated with IQ scores by one expert rater. For IQ labelling we designed the web form depicted in fig. 5.

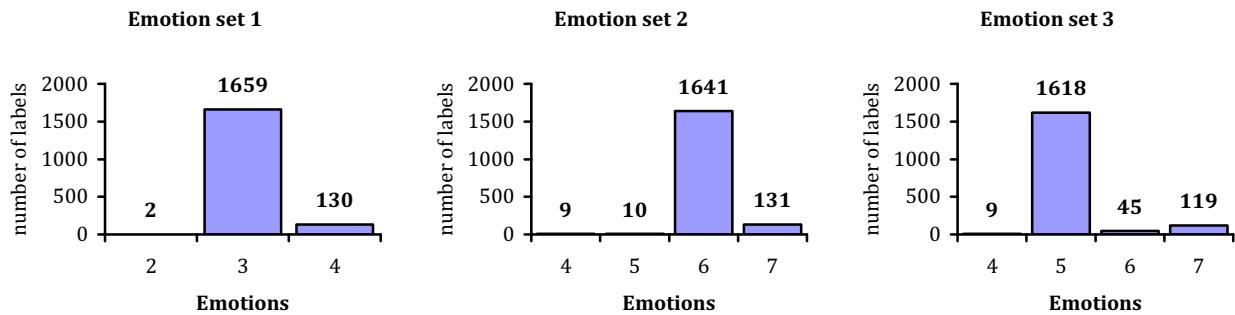


Fig. 3. Distributions of the emotion label for three sets of emotions

Fig. 4. The web form for emotion annotation and manually joining agent/customer turns into an exchange

Table 3

Rater guidelines for annotating the IQ in the absolute scale and in the scale of changes

No	The absolute scale	The scale of changes
1	The rater should try to assess the interaction on the whole as objectively as possible, but pay more attention to the customer point of view in the interaction	
2	An exchange consists of the agent and the customer turns	
3	The IQ score is defined on a 5-point scale with “1=bad”, “2=poor”, “3=fair”, “4=good” and “5=excellent”	The IQ score is defined on a 6-point scale with “-2”, “-1”, “0”, “1”, “2” and “abs 1”. The first five points of the scale reflect changes in the IQ from the previous exchange to the current exchange. “abs 1” means “1=bad” in the absolute scale
4	The IQ is to be rated for each exchange in the dialogue. The history of the dialogue should be kept in mind when assigning the score. For example, a dialogue that has proceeded fairly poorly for a long time should require some time to recover	
5	A dialogue always starts with an IQ score of “5”	A dialogue always starts with an IQ score of “0”
6	In general, the score from one exchange to the following exchange is increased or decreased by one point at the most	
7	Exceptions, where the score can be decreased by two points are e. g. hot anger or sudden frustration. The rater’s perception is decisive here	

No	The absolute scale	The scale of changes
8	Also, if the dialogue obviously collapses due to agent or customer behaviour, the score can be set to "1" immediately. An example therefore is a reasonable frustrated sudden hang-up	Also, if the dialogue obviously collapses due to agent or customer behaviour, the score can be set to "abs 1" immediately. An example therefore is a reasonable frustrated sudden hang-up
9	Anger does not need to influence the score, but can. The rater should try to figure out whether anger was caused by the dialogue behaviour or not	
10	In the case of a customer realizing that he should adapt his dialogue strategy to obtain the desired result or information and succeeded that way, the IQ score can be raised up to two points per turn. In other words, the customer realizes that he caused the poor IQ by himself	
11	If a dialogue consists of several independent queries, the quality of each query is to be rated independently. The former dialogue history should not be considered when a new query begins. However, the score provided for the first exchange should be equal to the last label of the previous query	
12	If a dialogue proceeds fairly poorly for a long time, the rater should consider increasing the score more slowly if the dialogue starts to recover. Also, in general, he should observe the remaining dialogue more critically	
13	If a constantly low-quality dialogue finishes with a reasonable result, the IQ can be increased	

The screenshot shows a web-based application for dialogue annotation. On the left, there's a sidebar with a tree view of files for 'Agent1_123' and 'Agent2_103'. The main area displays a list of 14 dialogue exchanges with their timestamps (e.g., [00:933-03:820], [02:449-04:447]). Each entry has a play button and a timestamp. To the right of the list is a 'WRITE INTO FILE' button. On the far right, there's a panel titled 'INTERACTION QUALITY (IQ) rules 1' containing 10 numbered rules, such as 'The rater should try to assess the interaction in the whole as objectively as possible, but pay more attention to the customer's point of view in the interaction.' and 'Exceptions, where the score can be decreased by two points are e.g. hot anger or sudden frustration. The rater's perception is decisive here.'

Fig. 5. The web form for annotating the IQ in absolute scale and scale of changes by the expert rater

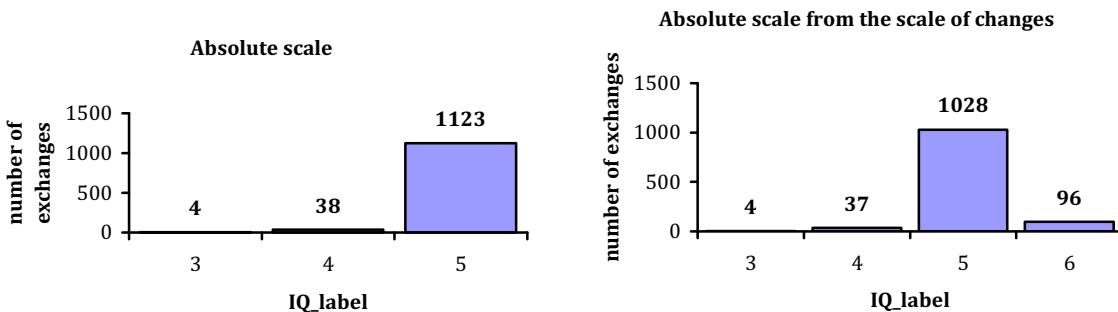


Fig. 6. Distributions of the IQ score

Then we converted the scale of changes into the absolute scale. The distributions of IQ score for both scale (absolute scale and absolute scale, converted from the scale of changes) are presented in fig. 6.

5. Future work

We plan to extend this corpus both in the feature set and in observations. The feature set will be extended, for example, by adding some audio features, such as schim-

mer, jitter, formants and others, computed in openSMILE or PRAAT [16], by adding manually annotated features as task completion. Moreover, we plan to apply automatic speech recognition software to our audio files.

The use of two scales (absolute scale and scale of changes) has revealed that applying the method of IQ estimation starting with "5" for HH conversations can lead to a possible loss of information in the modelling process. An example of such a situation is depicted in fig. 7.

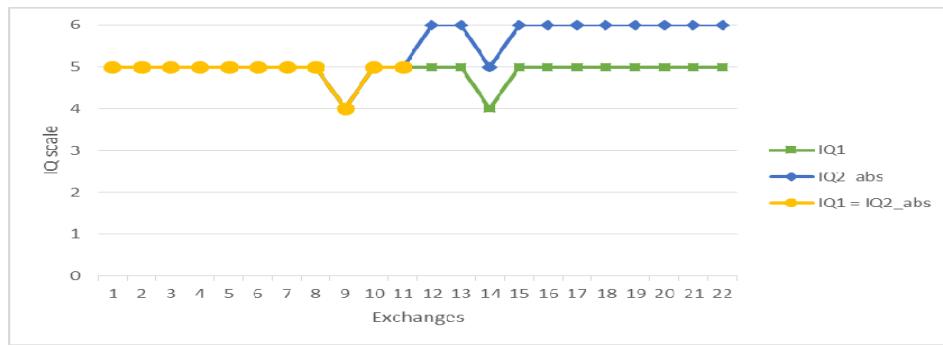


Fig. 7. An example of possible loss of information due to IQ estimations starting with “5”

In HH task-oriented conversations, for example, in call centres, there are a number of reasons why the dialogue cannot start with the IQ label “5”: the great waiting time, customer claims against the company with customers’ aggressive behaviour due to which the IQ initially cannot be good.

Moreover, in the form presented above the IQ is a very subjective estimation. That is why we plan to change the rater guidelines for the IQ annotation: describe all possible situations in each category of the IQ and transitions from one category to another. It helps to decrease subjectivity in the assessment of the IQ. Also for decreasing subjectivity we plan to increase the number of expert raters.

6. Conclusion

Although there are a large number of speech corpora, for some tasks from speech analysis, such as the IQ modelling for HH task-oriented conversations, it is still difficult to find appropriate specific corpora. In this paper we described the current version of the corpus for the IQ modelling for HH task-oriented conversations. In spite of some drawbacks it can be useful for investigations.

Extension of this corpus helps to design a more accurate model for the IQ, which in turn can help to improve the quality of service in the call centres, to make SDS friendlier, more flexible and more human-like, and to automatize some processes of analysing the psychological state of people in a situation with a high level of responsibility, for example, in different space programmes.

Acknowledgment. This work was partly supported by the DAAD (German Academic Exchange Service) within the program “Research Grants – One-Year Grants”.

Благодарности. Работа частично выполнялась в рамках программы «Научно-исследовательские стипендии – Годовые стипендии», финансируемой Немецкой службой академических обменов (DAAD).

References

- Schmitt A., Schatz B., Minker W. Modeling and predicting quality in spoken human-computer interaction. *Proceedings of the SIGDIAL 2011 Conference. Association for Computational Linguistics*, 2011, P. 173–184.
- European Language Resources Association. Available at: <http://elra.info/Language-Resources-LRs.html> (accessed 03.10.2015).
- Linguistic Data Consortium. Available at: <https://catalog.ldc.upenn.edu/> (accessed 03.10.2015).
- Bechet F., Maza B., Bigouroux N., Bazillon T., El-Bèze M., R. De Mori, Arbillot E. DECODA: a call-center human-human spoken conversation corpus. *International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC)*, 2012, P. 1343–1347.
- Vincenzo Pallotta, Rodolfo Delmonte, Lammert Vrieling, David Walker. Interaction Mining: the new frontier of Call Center Analytics. *CEUR Workshop Proceedings*, 2011, P. 1–12.
- Rafaelli A., Ziklik L., Doucet L. The Impact of Call Center Employees’ Customer Orientation Behaviors on Service Quality. *Journal of Service Research*, 2008, Vol. 10, No. 3, P. 239–255.
- Lavalley R., Clavel C., Bellot P., El-Bèze M. Combining text categorization and dialog modeling for speaker role identification on call center conversations. *INTERSPEECH*, 2010, P. 3062–3065.
- Meignier S., Merlin T., LIUM SpkDiarization: An Open Source Toolkit For Diarization. *Proceedings of CMU SPUD Workshop*, 2010.
- Shout. Available at: <http://shout-toolkit.sourceforge.net/> (accessed 03.10.2015).
- Audacity. Available at: <http://audacityteam.org/> (accessed 03.10.2015).
- FFmpeg. Available at: <https://www.ffmpeg.org/> (accessed 03.10.2015).
- Schmitt A., Ultes S., Minker W. A Parameterized and Annotated Corpus of the CMU Let’s Go Bus Information System. *International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC)*, 2012, P. 3369–3373.
- Eyben F., Weninger F., Gross F., Schuller B. Recent Developments in openSMILE, the Munich Open-Source Multimedia Feature Extractor. *Proceedings of ACM Multimedia (MM)*, 2013, P. 835–838.
- M. Sidorov, A. Schmitt and E. Semenkin. Automated Recognition of Paralinguistic Signals in Spoken Dialogue Systems: Ways of Improvement. *Journal of Siberian Federal University, Mathematics and Physics*, 2015, Vol. 8, No. 2, P. 208–216.
- Flotr2. Available at: <http://www.humblesoftware.com/flotr2/> (accessed 03.10.2015).
- Praat: doing phonetics by computer. Available at: <http://www.fon.hum.uva.nl/praat/> (accessed 03.10.2015).

LOCAL SEARCH IN BILINEAR TWO-PERSON GAME

O. V. Khamisov*, I. M. Minarchenko

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS
130, Lermontov Str., Irkutsk, 664033, Russian Federation
*E-mail: khamisov@isem.irk.ru

We consider an approach that allows reducing Nash equilibrium problem to a minimax problem for rather wide class of games using the so-called Nikaido–Isoda function. One can reformulate minimax problem as an optimization problem with nonconvex and implicitly defined objective function in general case. In other words, the set of Nash equilibria of the game is coincide with the set of global solutions of derived optimization problem. In present paper we investigate such an approach as applied to bilinear two-person game with quadratic loss functions and independent strategy spaces in view of an assumption that loss functions are strictly convex with respect to own players' variables. In this case we suggest to replace “inner” optimization problem in minimax problem by Lagrange dual one. Such a way leads to presentation of the objective function as a difference of two convex functions (d.c-decomposition of the objective function). The very function in d.c-decomposition, that forms concave part, is defined implicitly as well as the objective function. We propose a method for linearization of concave term. That allows using the well-known local search method for d.c-functions, where the next iteration point is a solution of convex optimization problem with the objective function, which gained from initial objective by linearization of concave term in d.c-decomposition. Since the concerned problem is nonconvex, we offer to use local search in combination with multistart. The results of computational experiment are provided in the paper.

Keywords: Nash equilibrium, Nikaido–Isoda function, d.c-decomposition.

Вестник СибГАУ
Том 17, № 1. С. 91–96

ЛОКАЛЬНЫЙ ПОИСК В БИЛИНЕЙНОЙ ИГРЕ ДВУХ ЛИЦ

О. В. Хамисов*, И. М. Минарченко

Институт систем энергетики имени Л. А. Мелентьева СО РАН
Российская Федерация, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130
*E-mail: khamisov@isem.irk.ru

Рассматривается подход, позволяющий с помощью функции Никайдо–Исада свести задачу поиска равновесия по Нэшу к минимаксной задаче для достаточно широкого класса игр. При этом минимаксная задача может быть записана как задача оптимизации с, вообще говоря, невыпуклой и неявно заданной целевой функцией. Таким образом, множество равновесий по Нэшу исходной игры совпадает с множеством глобальных решений полученной задачи оптимизации. Для билинейной игры двух лиц с квадратичными функциями потерь и независимыми множествами стратегий делается предположение о строгой выпуклости функций потерь по собственным переменным игроков, и затем в минимаксной задаче «внутренняя» экстремальная выпуклая задача заменяется двойственной по Лагранжу задачей. Таким образом, целевая функция представляется в виде разности двух выпуклых функций (d.c-разложение целевой функции), одна из которых, образующая вогнутую часть, по-прежнему задана неявно. Предлагается способ линеаризации вогнутого слагаемого и, на основе этого, применение известного итеративного метода локального поиска для d.c-функций. В данном методе локального поиска очередная точка выбирается как решение выпуклой задачи оптимизации, в которой целевая функция получается из исходной целевой функции путём линеаризации вогнутого слагаемого в d.c-разложении. В силу невыпуклости рассматриваемой нами задачи, предлагается использовать локальный поиск в сочетании с мультистартом. В завершение представлены результаты численного эксперимента.

Ключевые слова: равновесие по Нэшу, функция Никайдо–Исада, d.c-разложение.

Introduction. In present paper we consider bilinear games in the sense of the definition given in [1]. It means that we investigate bilinear games with loss functions, which are quadratic with respect to own players' vari-

ables. Bilinear games represent a rather wide class, which includes in particular mixed extension of bimatrix games as well as of polymatrix games (see for details and more examples [2]). A lot of investigations were devoted

to computing mixed Nash equilibrium in bimatrix games and related topics (see, for example [3]). Another approach can be found in [4]. In [5] one can find method for solving mixed extension of finite games with three players. Research in [2] is devoted to existence and constructing of polynomial time algorithms for bilinear games with fixed rank of the sum of player's payoff (loss) matrices. In what follows we assume that the loss function of each player is strictly convex with respect to its strategy. Hence, by the well-known facts from game theory there exists a solution of the game. However, even under these assumptions we have a very difficult computational problem. The bimatrix game is a particular case of the game considered in our paper. In [6] it was shown that bimatrix game could have an exponential number of equilibrium points.

Problem statement. Let us consider bilinear two-person game [1]

$$\left. \begin{array}{l} F_1(x_1, x_2) = x_1^T (C_1 x_2 + d_1) + \\ + \frac{1}{2} x_1^T B_1 x_1 \rightarrow \min_{x_1}, \quad x_1 \in X^1, \\ F_2(x_1, x_2) = x_2^T (C_2 x_1 + d_2) + \\ + \frac{1}{2} x_2^T B_2 x_2 \rightarrow \min_{x_2}, \quad x_2 \in X^2, \end{array} \right\} \quad (1)$$

where X^1 and X^2 are non-empty, compact, convex sets of form

$$\begin{aligned} X^1 &= \left\{ x_1 \in R^{m_1} \mid A_1 x_1 \leq b_1 \right\}, \\ X^2 &= \left\{ x_2 \in R^{m_2} \mid A_2 x_2 \leq b_2 \right\}. \end{aligned}$$

Here $d_1 \in R^{m_1}$, $d_2 \in R^{m_2}$, $b_1 \in R^{q_1}$, $b_2 \in R^{q_2}$ and matrices C_1 , C_2 , B_1 , B_2 , A_1 , A_2 have sizes $m_1 \times m_2$, $m_2 \times m_1$, $m_1 \times m_1$, $m_2 \times m_2$, $q_1 \times m_1$, $q_2 \times m_2$ respectively. Without loss of generality, we suppose B_1 and B_2 to be symmetric matrices. R is a set of real numbers. In contrast to the game statement in [2], we add quadratic part to the each loss function and do not make any assumptions about rank of matrices in bilinear part.

Reduction and algorithm. Consider a function

$$\Phi(x_1, x_2, y_1, y_2) = F_1(x_1, y_2) + F_2(y_1, x_2)$$

and denote $x = (x_1, x_2)$, $y = (y_1, y_2)$. Let us introduce the Nikaido–Isoda function [7; 8]

$$\Psi(x, y) = \Phi(y, y) - \Phi(x, y),$$

which is real-valued function defined on the Cartesian product $X \times X$, where $X = X^1 \times X^2$.

Theorem [6]. The point $\hat{y} \in X$ is a Nash equilibrium in the game (1) if and only if

$$\hat{y} \in \operatorname{Arg} \min_{y \in X} \max_{x \in X} \Psi(x, y) \quad \text{and} \quad \max_{x \in X} \Psi(x, \hat{y}) = 0.$$

From theorem equivalent optimization problem for Nash equilibrium problem (1) immediately follows:

$$P(y) = \max_{x \in X} \Psi(x, y) \rightarrow \min_{y \in X}. \quad (2)$$

The function P is nonconvex in general case; therefore, search of equilibrium in original game is reduced to search of a global minimum of P . Problem (2) was introduced in [9] and [10] for mixed extension of bimatrix games and then used, for example, in [2; 3]. In [4] the statement (2) is used for computing equilibrium points as well. Reduction of polymatrix games to optimization problem of form (2) was discussed in [11]. In these papers the inner problem in (2) (maximization Ψ in x) can be solved analytically, i. e. we can get an explicit form of the function P .

Another example of equilibrium problems, which admit reducing to optimization problem with explicit objective function, represents the so-called potential games [12]. In this case we also obtain an explicit global optimization problem. Investigations of potential equilibrium problems in the frame of the Cournot model with nonconvexities were performed in [13; 14]. In [15] it was pointed out that in the general case one can use auxiliary support nonlinear functions, which always are available in explicit forms. Within such approach implicit problem (2) is approximated by a sequence of auxiliary (still nonconvex) explicit problems. More detailed description of nonconvex optimization with nonlinear support functions is given in [16].

Note that equivalence of reduction of game (1) to problem (2) is correct only for games, where each player's strategy set is independent of other players' choices. In games with coupled strategy sets, Nash equilibria might exist, which are not solutions for (2) (see example 7 in [8]). However, such kind of games is not in the scope of our present examination.

By definition, $P(y) \geq 0$ for any $y \in X$. Hence, if inequality

$$\min_{y \in X} P(y) > 0$$

holds, it means that game (1) has no Nash equilibrium points. On the other hand, the set of global minimizers for P , where P equals to zero, coincides with the set of Nash equilibria for (1).

Denote

$$\begin{aligned} C &= \begin{pmatrix} 0 & C_1 \\ C_2 & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} B_1 & 0 \\ 0 & B_2 \end{pmatrix}, d = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \end{pmatrix}, \\ A &= \begin{pmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_2 \end{pmatrix}, b = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Then problem (2) for the game (1) has the form

$$\begin{aligned} P(y) &= y^T (Cy + d) + \frac{1}{2} y^T B y + \\ &+ \max_{x \in X} \left[-x^T (Cy + d) - \frac{1}{2} x^T B x \right] \rightarrow \min_{y \in X}, \end{aligned} \quad (3)$$

where $X = \{x \in R^m \mid Ax \leq b\}$ and $m = m_1 + m_2$.

Now we claim for strict convexity of players' loss functions F_1 and F_2 on X^1 and X^2 respectively. It is equivalent to the condition that matrices B_1 and B_2 are positive definite. From positive definiteness of B_1 and B_2 immediately follows positive definiteness of matrix B . In other words, our assumption implies strict concavity of “inner” maximization problem in (3):

$$\varphi(x) = -x^T(Cy + d) - \frac{1}{2}x^T Bx \rightarrow \max_{x \in X}$$

for some fixed $y \in X$.

Moreover, taking into account non-emptiness, compactness, and convexity of strategy spaces X^1 and X^2 one can conclude that equilibrium point of game (1) always exists due to Kakutani's fixed point theorem. It means that $\min_{y \in X} P(y) = 0$.

Since φ is strictly concave function and set X is defined by linear constraints, we have

$$\max_{x \in X} \varphi(x) = \min_{\lambda \geq 0} \max_{x \in R^m} L(x, \lambda) \quad \text{for any } y \in X,$$

where $\lambda \in R^q$ is a vector of Lagrange multipliers, $q = q_1 + q_2$, and

$$L(x, \lambda) = -x^T(Cy + d) - \frac{1}{2}x^T Bx - \lambda^T(Ax - b)$$

is Lagrange function. Obviously, L attains its maximum over R^m in the point, where the first derivative with respect to variable x equals to zero. Then in view of non-singularity of matrix B , which is ensured by its positive definiteness, we have $x^* = -B^{-1}(Cy + d + A^T\lambda)$ such as

$$\max_{x \in X} \varphi(x) = \min_{\lambda \geq 0} L(x^*, \lambda) \quad \text{for any } y \in X. \quad (4)$$

Executing substitution, we get:

$$\begin{aligned} L(x^*, \lambda) &= \frac{1}{2}(Cy + d)^T B^{-1}(Cy + d) + \\ &+ (Cy + d)^T B^{-1}A^T\lambda + \frac{1}{2}\lambda^T AB^{-1}A^T\lambda + \lambda^T b. \end{aligned} \quad (5)$$

Then equalities (4) and (5) imply

$$\begin{aligned} \max_{x \in X} \varphi(x) &= \frac{1}{2}(Cy + d)^T B^{-1}(Cy + d) + \\ &+ \min_{\lambda \geq 0} \left[(Cy + d)^T B^{-1}A^T\lambda + \frac{1}{2}\lambda^T AB^{-1}A^T\lambda + \lambda^T b \right] \quad (6) \\ &\forall y \in X. \end{aligned}$$

With respect to (6) the problem (3) may be rewritten as

$$P(y) = g(y) - h(y) \rightarrow \min_{y \in X}, \quad (7)$$

where

$$\left. \begin{aligned} g(y) &= y^T \left(C + \frac{1}{2}B + \frac{1}{2}C^T B^{-1}C \right) y + \\ &+ y^T \left(C^T B^{-1}d + d \right) + \frac{1}{2}d^T B^{-1}d, \\ h(y) &= -\min_{\lambda \geq 0} \psi(y, \lambda), \\ \psi(y, \lambda) &= \lambda^T AB^{-1}Cy + \frac{1}{2}\lambda^T AB^{-1}A^T\lambda + \\ &+ \lambda^T(b + AB^{-1}d). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Next, we formulate the statement that allows us to proceed to numerical method for solving (7).

Statement. Functions g and h are convex.

Proof. Using the symmetry of matrix B and denoting $z = (B + C)y$, quadratic part of g can be easily represented as

$$\begin{aligned} y^T \left(C + \frac{1}{2}B + \frac{1}{2}C^T B^{-1}C \right) y &= \\ = \frac{1}{2}y^T(B + C)^T B^{-1}(B + C)y &= \frac{1}{2}z^T B^{-1}z. \end{aligned}$$

Since B is positive definite, then $z^T B^{-1}z > 0$ for any non-zero z and $z(y)^T B^{-1}z(y) \geq 0$ for any y . Hence, g is convex. Function ψ is linear with respect to y then h is convex too.

Thus, we represent P as a difference of two convex functions (d.c.-decomposition). Our further suggestion is to use for solving problem (7) the well-known iterative local search d.c. algorithm [17]. Its main idea is a linearization of concave term of objective in current iteration point and solving derived convex optimization problem. In such a way, original nonconvex problem reduces to series of convex problems. Next, we describe the steps of that algorithm as it applies to (7). The main difficulty lies in implicit definiteness of objective function. However, we can realize linearization of concave implicit term using the fact that ψ is linear with respect to variable y . In this case, linearization naturally arises.

Algorithm.

Step 0. Set $k = 0$. Choose numbers $\varepsilon_1 > 0$, $\varepsilon_2 > 0$ and initial point $y^k \in X$.

Step 1. Get λ^{k+1} as a solution of convex minimization problem:

$$\lambda^{k+1} = \arg \min_{\lambda \geq 0} \psi(y^k, \lambda).$$

Step 2. Get y^{k+1} as a solution of convex linearized problem:

$$y^{k+1} = \arg \min_{y \in X} [g(y) + \psi(y, \lambda^{k+1})].$$

Step 3. If $P(y^{k+1}) < \varepsilon_1$ then STOP: y^{k+1} is a global solution for (7) and is a Nash equilibrium for (1). Else if $\|y^{k+1} - y^k\| < \varepsilon_2$ then STOP: y^{k+1} is a local solution and is not an equilibrium for (1). Otherwise, set $k = k + 1$ and go to the step 1.

Next, we place a simple numerical example with demonstration of algorithm's iterations.

Illustrative example. Let us consider example of bilinear game with scalar variables of each player, and loss functions $F_1(x_1, x_2) = 5x_1x_2 + 0.5x_1^2$, and $F_2(x_1, x_2) = -6x_1x_2 + 0.5x_2^2$. Strategy sets are similar for each player, and represent closed intervals $X^1 = X^2 = [-10, 10]$. Therefore, parameters of the problem are as follows:

$$\begin{aligned} C &= \begin{pmatrix} 0 & 5 \\ -6 & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \\ d &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix}^T, \\ b &= (10 \ 10 \ 10 \ 10)^T. \end{aligned}$$

Substitution to (8) gives us $g(y) = 18.5y_1^2 + 13y_2^2 - y_1y_2$, and

$$\begin{aligned} \psi(y, \lambda) = & \lambda^T \begin{pmatrix} 0 & 5 \\ 0 & -5 \\ -6 & 0 \\ 6 & 0 \end{pmatrix} y + \\ & + \frac{1}{2} \lambda^T \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \lambda + \lambda^T \begin{pmatrix} 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Following the steps of the algorithm from initial point $y^0 = (10, 10)$, we obtain results, which are placed to the tab. 1. Here k denotes a number of iteration, λ^* is a vector of Lagrange multipliers that solves optimization problem on the step 1 of the algorithm, (y_1, y_2) is a current iteration point that solves problem on the step 2, and P is an objective value for (7) in current iteration point. It is easy to see, that the algorithm finishes its work in equilibrium point $y^* = (0, 0)$.

Computational experiment. In the final part of our paper, we present computational results based on randomly generated problems. For all the problems we set the following general presumptions: players have the same number of variables, i. e. $m_1 = m_2 = m/2$, and set X has the form

$$X = \left\{ x \in R^m \mid -10 \leq x_i \leq 10, i = 1, \dots, m \right\}.$$

Also we set $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 10^{-4}$. Local search algorithm was joined with multistart with randomly generated initial points from X . Program was composed in GAMS [18]. Quadratic convex optimization problems on steps 1 and 2

were handled by CPLEX solver. Also note, that steps 1 and 2 of the algorithm were parallelized by standard GAMS grid facilities with respect to multistart. Experiment was conducted on the PC with AMD FX-8350 4.00 GHz CPU.

Results are gathered in the tab. 2, where every row corresponds to a single particular problem. Notation in the tab. 1 is as follows: MS – number of algorithm's starts; I_{aver} – average number of iterations for single algorithm's start; NE – number of starts gained Nash equilibria (where objective P equals to zero); LOC – number of starts, which gives “non-equilibrium” local minima (where objective P has strictly positive value); NE_{uniqu} – number of unique Nash equilibria obtained by the multistart; LOC_{uniqu} – number of unique “non-equilibrium” local minima obtained by the multistart; Time – overall time spent for all starts for one problem (h:min:sec).

Conclusions. Present paper gives an approach for finding Nash equilibria in bilinear two-person game with strictly convex players' losses using versatile Nikaido–Isoda function and local search based on d.c.-decomposition of objective function. Moreover, it is not difficult to see that such an approach can be generalized to games with an arbitrary number of players (see also [2; 7]).

Computational experiment with several random problems shows that proposed local search algorithm in combination with multistart allows finding more than one unique equilibrium point. The time of computation considerably depends on the given problem's parameters as well as on chosen initial point. At this time, the algorithm is capable to handle only small dimension games and it is in need of further improving. Finally should be noted that, of course, there is no guarantee that local search necessarily gain at least one equilibrium. The task of such a kind needs global search techniques.

Table 1
Iterations of the algorithm

k	λ^*	(y_1, y_2)	P
1	(0, 40.00, 50.00, 0)	(8.32, 8.01)	900.05
2	(0, 30.06, 39.95, 0)	(6.64, 6.04)	700.30
3	(0, 20.18, 29.85, 0)	(4.95, 4.07)	500.72
4	(0, 10.36, 19.70, 0)	(3.25, 2.12)	301.29
5	(0, 0.59, 9.51, 0)	(1.55, 0.17)	101.99
6	(0, 0, 0, 0)	(0.00, 0.00)	0.00

Table 2
Computational results

m	MS	I_{aver}	NE	LOC	NE_{uniqu}	LOC_{uniqu}	Time
2	20	1	20	0	1	—	0:00:02
2	40	2	40	0	1	—	0:00:08
4	10	14	10	0	1	—	0:00:40
4	10	4	10	0	1	—	0:00:05
4	20	8	20	0	1	—	0:00:19
4	40	18	36	4	1	2	0:01:24
6	10	18	10	0	1	—	0:00:30
6	10	864	10	0	2	—	0:31:58
6	10	102	10	0	3	—	0:03:50
6	10	6	9	1	1	1	0:00:14
6	20	214	20	0	1	—	0:08:34
8	5	425	5	0	3	—	0:10:48
8	10	522	6	4	3	3	0:04:23
8	10	266	2	8	1	2	0:02:55

End tab. 2

<i>m</i>	MS	Laver	NE	LOC	NE _{uniq}	LOC _{uniq}	Time
8	10	814	10	0	1	—	0:07:04
10	5	188	1	4	1	2	0:04:32
10	10	391	7	3	4	2	0:15:13
10	10	3521	2	8	1	3	1:29:08
12	5	1090	3	2	1	2	0:41:47
12	10	1053	5	5	2	5	0:44:12
14	5	4088	1	4	1	2	2:05:48
16	5	516	3	2	3	2	0:11:20
18	10	1293	2	8	2	6	0:48:43
20	15	3013	13	2	3	1	1:11:01

Acknowledgements. This work was supported by the RFBR (grant № 15-07-08986).

Благодарности. Работа поддержана грантом РФФИ № 15-07-08986.

References

1. Antipin A. S. *Gradientnyy i ekstragradientnyy podkhody v bilineynom ravnovesnom programmirovaniy* [Gradient and extragradient approaches in bilinear equilibrium programming]. Moscow, VTs im. A. A. Dorodnitsyna RAN Publ., 2002, 130 p.
2. Garg J., Jiang A. X., Mehta R. Bilinear Games: Polynomial Time Algorithms for Rank Based Subclasses. *Lecture Notes in Computer Science. Internet and Network Economics*, 2011, Vol. 7090, P. 399–407. DOI: 10.1007/978-3-642-25510-6_35.
3. Strekalovskiy A. S., Orlov A. V. *Bimatrixchnye igry i bilineynoe programmirovaniye* [Bimatrix games and bilinear programming]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007, 224 p.
4. Gol'shteyn E. G., Malkov U. Kh., Sokolov N. A. [A Numerical Method for Solving Bimatrix Games]. *Ekonomika i matematicheskie metody*, 2013, Vol. 49, No. 4, P. 94–104 (In Russ.).
5. Gol'shteyn E. G. [An Approximate Method for Solving Finite Three-Person Games]. *Ekonomika i matematicheskie metody*, 2014, Vol. 50, No. 1, P. 110–116 (In Russ.).
6. Quint T., Shubik M. A Theorem on the Number of Nash Equilibria in a Bimatrix Game. *International Journal of Game Theory*, 1997, Vol. 26, P. 353–359. DOI: 10.1007/BF01263276.
7. Nikaidô H., Isoda K. Note on Noncooperative Convex Games. *Pacific Journal of Mathematics*, 1955, Vol. 5, No. 5, P. 807–815. DOI: 10.2140/pjm.1955.5.807.
8. Flåm S. D., Ruszczyński A. Finding Normalized Equilibrium in Convex-Concave Games. *International Game Theory Review*, 2008, Vol. 10, No. 1, P. 37–51. DOI: 10.1142/S0219198908001765.
9. Mills H. Equilibrium Points in Finite Games. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 1960, Vol. 8, No. 2, P. 397–402. DOI: 10.1137/0108026.
10. Mangasarian O. L. Equilibrium points of bimatrix games. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 1964, Vol. 12, P. 778–780. DOI: 10.1137/0112064.
11. Strekalovskii A. S., Enkhbat R. Polymatrix Games and Optimization Problems. *Automation and Remote Control*, 2014, Vol. 75, No. 4, P. 632–645. DOI: 10.1134/S0005117914040043.
12. Monderer D., Shapley L. S. Potential Games. *Games and Economic Behavior*, 1996, Vol. 14, No. 1, P. 124–143. DOI: 10.1006/game.1996.0044.
13. Minarchenko I. M. [Numerical search for equilibrium in the Cournot model with S-shaped cost functions]. *Diskretnyy analiz i issledovanie operatsiy*, 2014, Vol. 21, No. 5, P. 40–53 (In Russ.).
14. Minarchenko I. M. [Use of branch and bound method for search of an equilibrium in potential Cournot model]. *Izvestiya IGU Seriya matematika*, 2014, Vol. 10, P. 62–75 (In Russ.).
15. Khamisov O. V. A global optimization approach to solving equilibrium programming problems. *Series on Computers and Operations Research*, 2003, Vol. 1. Optimization and Optimal Control, P. 155–164.
16. Khamisov O. V. [Nonconvex optimization with nonlinear support functions]. *Trudy IMM UrO RAN*, 2013, Vol. 19, No. 2, P. 295–306 (In Russ.).
17. Pham D. T., Le T. H. A. Convex Analysis Approach to D.C. Programming: Theory, Algorithms and Applications. *Acta Mathematica Vietnamica*, 1997, Vol. 22, No. 1, P. 289–355.
18. Rosenthal R. E. GAMS – A user's guide. Available at: <http://www.gams.com/help/topic/gams.doc/user-guides/GAMSUsersGuide.pdf> (accessed 16.02.2016).

Библиографические ссылки

1. Антипин А. С. Градиентный и экстраградиентный подходы в билинейном равновесном программировании. М. : ВЦ им. А. А. Дородницына РАН, 2002. 130 с.
2. Garg J., Jiang A. X., Mehta R. Bilinear games: Polynomial time algorithms for rank based subclasses // *Lecture Notes in Computer Science. Internet and Network Economics*. 2011. Vol. 7090. P. 399–407.
3. Стрекаловский А. С., Орлов А. В. Биматричные игры и билинейное программирование. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. 224 с.
4. Гольштейн Е. Г., Малков У. Х., Соколов Н. А. Об одном численном методе решения биматричных игр // Экономика и математические методы. 2013. Т. 49, № 4. С. 94–104.
5. Гольштейн Е. Г. Приближённый метод решения конечной игры трёх лиц // Экономика и математические методы, 2014. Т. 50, № 1. С. 110–116.
6. Quint T., Shubik M. A Theorem on the number of Nash equilibria in a bimatrix game // *International Journal of Game Theory*. 1997. Vol. 26. P. 353–359.

7. Nikaidô H., Isoda K. Note on noncooperative convex games // Pacific Journal of Mathematics. 1955. Vol. 5, № 5. P. 807–815.
8. Flåm S. D., Ruszczyński A. Finding normalized equilibrium in convex-concave games // International Game Theory Review. 2008. Vol. 10, № 1. P. 37–51.
9. Mills H. Equilibrium points in finite games // Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. 1960. Vol. 8, № 2. P. 397–402.
10. Mangasarian O. L. Equilibrium points of bimatrix games // Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. 1964. Vol. 12. P. 778–780.
11. Strekalovskii A. S., Enkhbat R. Polymatrix games and optimization problems // Automation and Remote Control. 2014. Vol. 75, № 4. P. 632–645.
12. Monderer D., Shapley L. S. Potential games // Games and Economic Behavior. 1996. № 14. P. 124–143.
13. Минарченко И. М. Численный поиск равновесия в модели Курно с S-образными функциями издержек // Дискретный анализ и исследование операций. 2014. Т. 21, № 5. С. 40–53.
14. Минарченко И. М. Применение метода ветвей и границ для поиска равновесия в потенциальной модели Курно // Известия Иркутского государственного университета. Сер. «Математика». 2014. Т. 10. С. 62–75.
15. Khamisov O. V. A global optimization approach to solving equilibrium programming problems // Series on Computers and Operations Research. Vol. 1. Optimization and Optimal Control. 2003. P. 155–164.
16. Хамисов О. В. Невыпуклая оптимизация с нелинейными опорными функциями // Труды ИММ УрО РАН. 2013. Т. 19, № 2. С. 295–306.
17. Pham D. T., Le T. H. A. Convex analysis approach to d.c-programming: Theory, algorithms and applications // Acta Mathematica Vietnamica. 1997. Vol. 22, № 1. P. 289–355.
18. Rosenthal R. E. GAMS – A user’s guide [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gams.com/help/topic/gams.doc/userguides/GAMSUsersGuide.pdf> (дата обращения: 16.02.2016).

© Khamisov O. V., Minarchenko I. M., 2016

CONSIDERATION OF OPTIMAL CONTROL OF STRICTLY HIERARCHICAL MANPOWER SYSTEM

A. Škraba^{1*}, V. V. Stanovov², A. Žnidaršič¹, Č. Rozman³, D. Kofjač¹

¹University of Maribor, Cybernetics & Decision Support Systems Laboratory, Faculty of Organizational Sciences
Kidričeva cesta 55a, SI-4000, Kranj, Slovenia

²Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

³University of Maribor, Faculty of Agriculture and Life Sciences
Pivola 10, SI-2311, Hoče, Slovenia

*E-mail: andrej.skraba@fov.uni-mb.si

The paper describes the problem of finding an optimal control strategy for the manpower control system. The equilibrium condition for the strict hierarchical manpower system control is stated which enables development of optimal strategy algorithm for one state example. Based on the equilibrium condition, the novel approach to the determination of optimal control in such system is described. Optimal tracking algorithm is described by example, which is implemented in MathematicaTM. The tracking algorithm is able to find the optimal values of the transition coefficients, so that the system achieves the desired value in one step. For the case when the desired value is not achievable in one step due to the boundary conditions, additional two algorithms are considered which bring state values to the desired ones in several steps. Two variants of the algorithm are considered, when the desired value is lower or greater than the initial value.

Keywords: manpower system, equilibrium condition.

Вестник СибГАУ
Том 17, № 1. С. 97–102

РАССМОТРЕНИЕ СТРАТЕГИИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ СТРОГО ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКИМИ РЕСУРСАМИ

А. Шкраба^{1*}, В. В. Становов², А. Жнидаршич¹, Ч. Розман³, Д. Кофьяч¹

¹Мариборский университет, Лаборатория кибернетики и систем поддержки принятия решений,
факультет организационных наук
Словения, SI-4000, Крань, ул. Кидричева, 55а

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

³Мариборский университет, факультет агрокультуры и наук о жизни
Словения, SI-2311, Хоче, Пивола, 10
*E-mail: andrej.skraba@fov.uni-mb.si

Рассматривается задача определения оптимальной стратегии для системы управления человеческими ресурсами. Формулируется условие равновесия для строго иерархической системы управления человеческими ресурсами, позволяющее реализовать алгоритм поиска оптимальной стратегии для случая с одним рангом. На основании этого условия равновесия описывается новый подход для определения оптимального управления в подобных системах. Оптимальный отслеживающий алгоритм управления описан примером, реализованным в среде MathematicaTM. Отслеживающий алгоритм способен найти оптимальные значения коэффициентов перехода, так что система достигает желаемого значения за один шаг. Для случая, когда желаемое значение недостижимо за один шаг из-за граничных условий, рассматриваются два дополнительных алгоритма, которые приводят значения рангов к желаемым за несколько шагов. Рассмотрены два варианта алгоритма, когда желаемое значение меньше или больше, чем начальное значение.

Ключевые слова: система управления человеческими ресурсами, условие равновесия.

Introduction. Planning the human resource management process affects the whole organizational structure. The common way of addressing such kind of problems is us-

ing modeling and simulation methods, which have shown promising results. In our work the System Dynamics Methodology [1; 2] was used. In [3] the resource assignment

language has been proposed, providing automatic answers to the problem of resource management at a given time period. In [4] the problem of workspace scheduling, taking into consideration employee's preferences for retail stores was considered, and the mixed integer programming model was successfully used to solve this problem. The stochastic modeling has also been applied to determine the most appropriate promotion time in [5]. This research also considered the survival rates in different classes, varying the class sizes and considering the main goal the main goal to be the time until the next promotion. However, the main obstacles which appear during the restructuring process appear to be the organization barriers, which were considered in [6]. This research shows that the technological factors have less importance than the organizational ones.

In our previous research in the field of hierarchical manpower system control [7; 8] the system was defined as $\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{Ax}(k) + \mathbf{Bu}(k)$ [7] which is convenient for the simulation examination [9]. State vector \mathbf{x} represents the number of men in particular rank whereas matrix of coefficients \mathbf{A} represents promotion factors r and wastage factors f which are combined. Recruitment as the input to the system is represented by the $\mathbf{Bu}(k)$ term in the discrete state space.

Approaches with the evolutionary and biologically inspired algorithms [10–13] have been promising however, understanding of the procedure of how to determine optimal solution [14] might contribute to development of more efficient heuristic algorithms. When considering such system in terms of optimality the “curse of complexity” soon arises. By careful examination of optimal solution determination algorithm, several propositions can be included in optimal trajectory heuristic search.

Methodology consideration. Strict hierarchical manpower system represents a delay chain where elements depend on previous states. Structure of the system can be best represented graphically as in fig. 1. The system in our case consists of eight state elements which are interconnected with flows (Rates). First rate element on the left side of fig. 1 represents recruitment and is the only input to the system. From each state the fluctuations are possible, i. e. the case that a person leaves the system (wastage). Between the ranks the promotions are represented with the flows. In the last element on the right side of fig. 1 the retirement is represented by the last flow element. Each transition is determined by the parameter, whether parameter of fluctuation or parameter of promotion or retirement.

For the system in fig. 1 the equilibrium condition is dependent on the Lower and Upper parameter Boundary which can be stated as:

$$r_{n_{LB}} + f_{n_{LB}} \leq \frac{R_0}{X_n^*} \leq r_{n_{UB}} + f_{n_{UB}}, \quad (1)$$

where $r_{n_{LB}}$ is Lower Boundary for coefficient of promotion for rank n ; $f_{n_{LB}}$ is Lower Boundary for coefficient of fluctuation for rank n ; R_0 is Recruitment; X_n^* is desired value of state n ; $r_{n_{UB}}$ is Upper Boundary for coefficient of promotion for rank n ; $f_{n_{UB}}$ is Upper Boundary for coefficient of fluctuation for rank n .

Eq. (1) is mandatory condition if one would like to achieve equilibrium in all states i.e. that the desired values for all states are achieved and structure is constant, $\dot{\mathbf{X}} = 0$.

The Recruitment R_0 should be therefore bonded by the interval:

$$X_n^*(r_{n_{LB}} + f_{n_{LB}}) \leq R_0 \leq X_n^*(r_{n_{UB}} + f_{n_{UB}}) \quad (2)$$

or stated differently:

$$[R_{0_{LB}}, R_{0_{UB}}] \in [X_n^*(r_{n_{LB}} + f_{n_{LB}}), X_n^*(r_{n_{UB}} + f_{n_{UB}})]. \quad (3)$$

The equilibrium conditions determine, whether the system could be put into the stable condition at the end of transition. If there is no sufficient recruitment available and the boundary conditions are too stiff, the desired values in particular states could not be achieved. The interval stated by Eq. (3) should be considered at the policy design.

Development of Algorithm and Results. When developing the optimal solution algorithm the backward computation approach of Bellman dynamic programming was applied. The algorithm was developed on the tracking example for one state element. In our case, the initial value on the state element was set to 4 then peaks to 14 and settles back again at approximate value of 4. If the system should behave optimally the difference between the desired and actual values should always be 0. By that consideration we compute the solutions for the transition coefficient r from the final time to the initial time 0. At the determination of the optimal strategy we consider, that the recruitment should be put as low as possible. The backward computation is performed by the following equation:

$$X_n^*(k+1) = X_n^*(k) + \Delta t[R_0(k) - r_1(k)X_n^*(k) - f_1(k)X_n^*(k)].$$

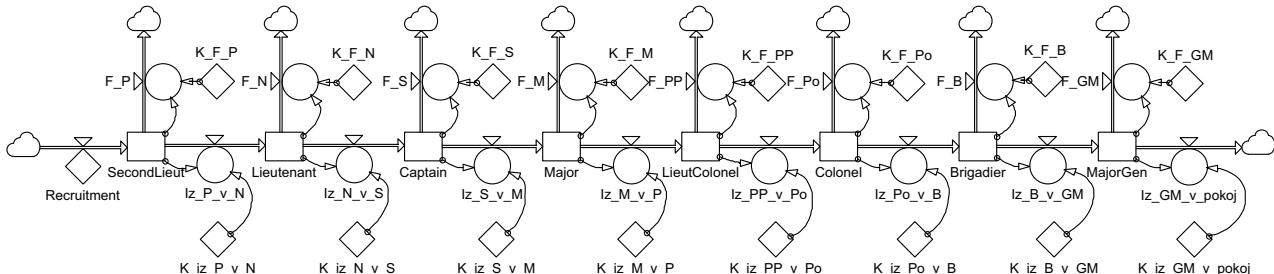


Fig. 1. Example of strict hierarchical system of eight ranks

In the next frame the developed algorithm is shown which provides optimal solution. There are several differ-

ent optimal solutions since the criterion is zero deviation between desired and actual trajectory:

```

Lz={4,11,13,14,13,11,10,9,8,6,4} Vector of desired values
R0LB={1,1,1,1,1,1,1,1,1,1} LowerBoundary Recruitment vector
R0UB={10,10,10,10,10,10,10,10,10,10} UpperBoundary Recruitment vector
r1LB={0,0,0,0,0,0,0,0,0,0} LowerBoundary Transition coefficient vector
r1UB={0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5} UB Transition coefficient v.
f1LB={0.05,0.05,0.05,0.05,0.05,0.05,0.05,0.05,0.05,0.05} LB fluctuation v.
f1UB={0.15,0.15,0.15,0.15,0.15,0.15,0.15,0.15,0.15,0.15} UB fluctuation v.
t={0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10} Time vector

Do[
  a=Lz[[ii+1]]; In optimum values of state equal desired values
  b=Lz[[ii]]; We take two adjacent points
  R=R0LB[[ii]]; Recruitment is set to lowest possible value, i.e. LB
  f1=f1UB[[ii]]; Fluctuation is set to maximum possible value, i.e. UB
  H=Solve[a□b+R-r1*b-f1*b,{r1}];   Solve in order to get transition coeff.
                                         Here we use two adjacent time points
  xx=H[[All,1,2]]; Get values
  While[
    Until r==xx[[1]] less than 0, i.e. negative, we increase recruitment for 1
    (R++) until we reach positive value
    xx[[1]]<0,
    R++; Increase recruitment for 1
    H=Solve[a□b+R-r1*b-f1*b,{r1}]; Another solution of the system
    xx=H[[All,1,2]]; Extract the value
  ];
  AppendTo[R0,R]; Gather the results
  AppendTo[S,xx] Extract values
  ,
  {ii,10,1,-1} Perform backward computation
]

```

However, if one considers that the input to the system, i. e. recruitment should be kept as low as possible, promotions should be kept as low as possible too and the fluctuations should be kept as high as possible, the unique, optimal solution is determined by the algorithm in tracking mode. This means, that the trajectory is changing in time.

Fig. 2 shows the results of the response of the system when optimal algorithm is applied as described. The rectangles represent the desired values of the state and the diamonds represent the actual values. In our case, the difference for all time points was 0.

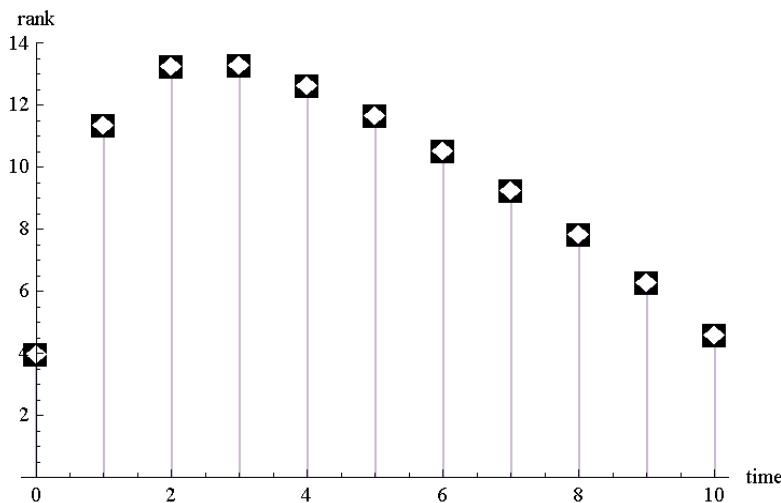


Fig. 2. Tracking the desired value – optimal solution example,
error equals zero (square – desired, diamond – response)

If the tracking case, the backward computation yields optimal solution. However, in the case, that the system state is too far from the desired value, the system cannot be in optimal state, i. e. the deviation is not 0. For the case, where the desired value is higher than the current state the algorithm was developed which is printed out in

the next frame. If the needed value of recruitment is higher than upper boundary value for recruitment, we set the recruitment value to the upper boundary and proceed to the next step. Notice, that in this case, the solution goes forward in time:

```

Do[
  a=Lz[[ii+1]]; Next value as desired value
  b=L[[ii]]; Initial value as the state value (L)

  r=r1LB[[ii]]; Transitions are set to LowerBoundary LB
  f1=f1LB[[ii]]; Fluctuation is set to the lowest possible value i.e. LB
  CC=a-b+r*b+f1*b; Calculation of needed recruitment
  If [CC> R0UB[[ii]], If the needed value of recruitment is higher than R0UB[i]
    we set R0 on UpperBoundary UB
  L[[ii+1]]=L[[ii]]+1*(R0UB[[ii]]-r*b-f1*b); Calculation of state
  AppendTo[R0,R0UB[[ii]]]; Adding to recruitment result vector
  AppendTo[rr,r]; Adding transition coefficients r
  AppendTo[ff,f1] Adding fluctuation coefficients f
  ,
  L[[ii+1]]=L[[ii]]+1*(CC-r*b-f1*b) ; On other case, calculated CC is used for
  R0, i.e. input recruitment
  AppendTo[R0,CC]; Collecting Recruitment data
  AppendTo[rr,r]; Collecting transition coefficients data
  AppendTo[ff,f1] Collecting fluctuation coefficients data
]

{ii,1,10,1} Computing from time 1 onward
]

```

Fig. 3 shows the results of the response of the system when described optimal algorithm is applied. The rectangles represent the desired values of the state and the diamonds represent the actual values. In our case, the differ-

ence for all time points is not 0. At the first part of the response, the difference between actual and desired state is significant. This is due to the boundaries of the parameters which do not allow to approach the goal faster.

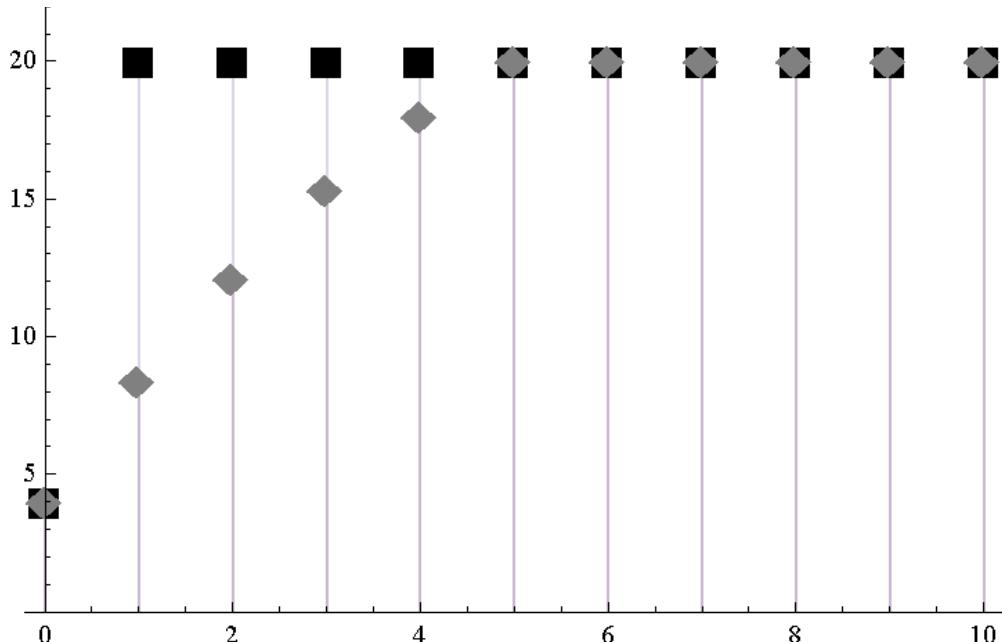


Fig. 3. Tracking the desired value which is higher than initial state
(square – desired, diamond – response)

The algorithm for the case, where the desired value is below the initial state value is shown in the next frame. In the loop, we calculate the needed value for recruitment R and if calculated recruitment is lower than the boundary

value for recruitment in particular step, we set recruitment equal to LB (i. e. we cannot go lower than the state LowerBoundary for the parameter):

```

Do [
    a=Lz[[ii+1]]; Value in next time step equals to desired value
    b=L[[ii]]; Initial value is taken out of state vector
    r=r1UB[[ii]]; Transition coefficient is set to LB
    f1=f1UB[[ii]]; Fluctuation coefficient is set to the lowest value i.e. UB
    CC=a-b+r*b+f1*b; Calculate the needed value for recruitment R0
    If [CC< R0LB[[ii]]], If we indicate, that the recruitment must be lower than
        LB then we set R0 equal to LB
    L[[ii+1]]=L[[ii]]+1*(R0LB[[ii]]-r*b-f1*b); Calcualte the next state value
    AppendTo[R0,R0LB[[ii]]]; Collect the results for recruitment
    AppendTo[rr,r]; Collect the results for transition coefficients
    AppendTo[ff,f1] Collect the results for fluctuation coefficients
    '
    L[[ii+1]]=L[[ii]]+1*(CC-r*b-f1*b) ; In other case, we use previously
        computed value CC for R0 (recruitment)
    AppendTo[R0,CC]; Collecting Recruitment data
    AppendTo[rr,r]; Colleccting transition coefficients data
    AppendTo[ff,f1] Collecting fluctuation coefficients data
]
{ii,1,10,1} Computing from time 1 onward
]

```

Fig. 4 shows the results of the response of the system when above, optimal algorithm is applied. The rectangles represent the desired values of the state and the diamonds represent the actual values. In our case, the difference for all time points is not 0. At the first part of the response,

the difference between actual and desired state is also significant. This is, again, due to the boundaries of the parameters which do not allow to approach the goal faster.

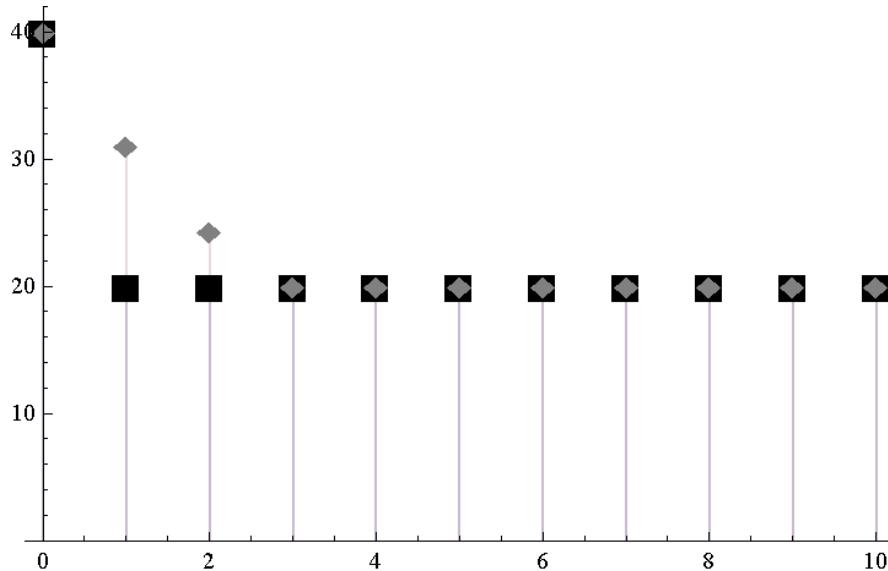


Fig. 4. Tracking the desired value which is lower than initial state
(square – desired, diamond – response)

In case if there are two ranks, the system becomes more complex, and another algorithm for finding the optimal strategy should be developed. The problem here is

that for two states, there can be 9 different variants of initial situations, i. e. for each of the states there can be 3 different situations, when the desired value is greater,

equal or less than the initial value, resulting in 9 different variants. For larger number of states the number of variants increases exponentially.

The most important feature of the system with the number of states larger than 2 is that the states become depended on each other, i. e. to optimize the value in state 2 we must change the output from state 1, which also changes the value in state 1.

Conclusion. Knowing the system optimal solution [15] is important for the development of heuristic algorithms and might contribute to the more efficient algorithm design. In our case, we have successfully developed optimal control algorithm for one state element case. The approach of backward computation was appropriate for the optimal strategy determination. In the case of the desired values which are not achievable in one step or fall outside the system reach due to the parameter limitations, the development of algorithm is more challenging. In further development the combinatorial approach should be considered in connection to the interval limitations of parameters.

Acknowledgement. This work is financed by Slovenian Research Agency ARRS, bilateral project No.: BI-RU/14-15-047 “Manpower control strategy determination with self-adapted evolutionary and biologically inspired algorithms”.

Благодарности. Данная работа финансируется словенским исследовательским агентством ARRS. Двусторонний проект № BI-RU/14-15-047 «Определение стратегии управления человеческими ресурсами при помощи самонастраивающихся эволюционных и бионических алгоритмов».

References

1. Škraba A., Kljajić M., & Kljajić, M. B. The role of information feedback in the management group decision-making process applying system dynamics models. *Group Decision and Negotiation*, 2007, No. 16(1), P. 77–95, DOI: 10.1007/s10726-006-9035-9.
2. Borštnar M. K., Kljajić M., Škraba A., Kofjač D., Rajkovič V. The relevance of facilitation in group decision making supported by a simulation model. *System Dynamics Review*, 2011, No. 27(3), P. 270–293, DOI: 10.1002/sdr.460.
3. Cabanillas C., Resinas M., del-Río-Ortega A., Cortés A. R. Specification and automated design-time analysis of the business process human resource perspective. *Information Systems*, 2015, No. 52, P. 55–82, DOI: 10.1016/j.is.2015.03.002.
4. Lin D., Yue T., Ganggang N., Yongqing X., Xin S., Changrui R., Zongying Z. Scheduling Workforce for Retail Stores with Employee Preferences. In 2015 IEEE International Conference on Service Operations And Logistics, And Informatics (SOLI), (15–17 November 2015). 2015, P. 37–42. Piscataway, NJ, USA: IEEE.
5. Gupta A., Ghosal A. A manpower planning model based on length of service under varying class sizes. *OPSEARCH*, 2014, No. 51(4), P. 615–623, DOI: 10.1007/s12597-013-0162-1.
6. Babaei M., Zahra G., Soudabeh A. Challenges of Enterprise Resource Planning implementation in Iran large organizations. *Information Systems*, 2015, No. 54, P. 15–27, DOI: 10.1016/j.is.2015.05.003.
7. Škraba A., Kljajić M., Papler P., Kofjač D., Obed M. Determination of recruitment and transition strategies. *Kybernetes*. 2011, Vol. 40, No. 9/10, P. 1503–1522.
8. Škraba A., Kofjač D., Žnidaršič A., Rozman Č., Maletić M. Application of finite automata with genetic algorithms in JavaScript for determination of manpower system control. In: 3rd International Workshop on Mathematical Models and their Applications, November 19–21, 2014, Krasnoyarsk, IWMMA'2014.
9. Kljajić M., Bernik I., Škraba A., Simulation Approach to Decision Assessment in Enterprises, *Simulation, (Simulation Councils Inc.)* 2000, P. 199–210.
10. Semenkin E., Semenkina M. Stochastic Models and Optimization Algorithms for Decision Support in Spacecraft Control Systems Preliminary Design. *Informatics in Control, Automation and Robotics, Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2014, Vol. 283, P. 51–65.
11. Akhmedova S., Semenkin E. Co-operation of biology related algorithms, 2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation. 2013, P. 2207–2214.
12. Škraba A., Kofjač D., Žnidaršič A., Maletić M., Rozman Č., Semenkin E. S., Semenkina M. E., Stanovov V. V. Application of Self-Configuring genetic algorithm for human resource management. *Journal of Siberian Federal University – Mathematics and Physics*. 2015, No. 8(1), P. 94–103.
13. Škraba A., Kofjač D., Žnidaršič A., Rozman Č., Maletić M. Application of finite automata with genetic algorithms in JavaScript for determination of manpower system control. *Vestnik SibGAU*. 2015, Vol. 16, No. 1, P. 153–158 (In Russ.).
14. Mehlman A. An approach to optimal recruitment and transition strategies for manpower systems using dynamic programming, *Journal of Operational Research Society*, 1980, Vol. 31, No. 11, P. 1009–1015.
15. Reeves G. R., Reid R. C. A. military reserve manpower planning model. *Computers & Operations Research*, 1999, Vol. 26, P. 1231–1242.

**НЕЛИНЕЙНАЯ ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ДЛЯ ОДНОЙ СИСТЕМЫ С ПАРАБОЛИЧЕСКИМ УРАВНЕНИЕМ
ПРИ НАЛИЧИИ НЕСКОЛЬКИХ ПОДВИЖНЫХ ИСТОЧНИКОВ**

Т. К. Юлдашев

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

Во многих задачах нелинейного оптимального управления процессом теплопередачи часто приходится учитывать вспомогательные элементы, без которых невозможно управлять исследуемым процессом. Эти элементы обычно имеют сосредоточенные параметры. Поведение таких систем в общем случае описывается совокупностью нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений и параболических уравнений при начальных и граничных условиях. Изучены вопросы аналитического и приближенного решения подвижной точечной задачи нелинейного оптимального управления для одной системы с параболическим и обыкновенным дифференциальными уравнениями при наличии нескольких подвижных источников. При этом параболическое уравнение рассмотрено с начально-нелокальными условиями, а обыкновенное дифференциальное уравнение – с начальным условием. Отличительной чертой данной работы является то, что задание нелокальных граничных условий относительно второй переменной в параболическом уравнении упрощает процедуру применения метода Фурье разделения переменных. Функционал качества имеет нелинейный вид и дополнительно зависит от квадрата решения обыкновенного дифференциального уравнения. Сначала доказано, что функция состояния принадлежит классу соболевских функций. На основе принципа максимума сформулированы необходимые условия нелинейной оптимальности управления. Определение оптимальной управляющей функции сведено к сложному функционально-интегральному уравнению, решение которого состоит из решения отдельно взятых двух уравнений: нелинейных функциональных уравнений и нелинейных интегральных уравнений. При доказательстве однозначной разрешимости интегральных уравнений применен метод последовательных приближений в сочетании его с методом сжимающих отображений. В качестве итераций взят итерационный процесс Пикара. Получена формула для приближенного вычисления подвижного нелинейного оптимального управления и оценка для допускаемой погрешности по оптимальному управлению. Приведены формулы для приближенного вычисления нелинейного оптимального процесса и минимального значения функционала качества. Полученные результаты могут найти дальнейшее применение в развитии математической теории нелинейного оптимального управления системами с распределенными параметрами при наличии подвижных источников.

Ключевые слова: параболическое уравнение, подвижная точечная задача, необходимые условия оптимальности управления, нелинейность управления, минимизация функционала.

Vestnik SibGAU
Vol. 17, No. 1, P. 103–109

**A NONLINEAR PROBLEM OF OPTIMAL CONTROL
FOR A SYSTEM WITH PARABOLIC EQUATION IF THERE ARE SEVERAL
DOT MOBILE SOURCES**

Т. К. Юлдашев

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

In studying many problems of nonlinear optimal control often we have to take into account the auxiliary elements, without which it is impossible to control the studying process. These elements have usually lumped parameters. The behavior of such systems is generally described by a set of nonlinear ordinary differential equations and parabolic equations with initial value and boundary value conditions. It is studied the questions of analytical and approximation solving the nonlinear dot mobile point problem of nonlinear optimal control for a system with parabolic and ordinary differential equations in the case of presence of several dot mobile sources. At that time, the parabolic equation is considered with initial-nonlocal conditions, while ordinary differential equation is considered with initial

value condition. A distinctive feature of this work is that nonlocal boundary conditions with respect to the second variable in the parabolic equation is simplified the application of the Fourier method of separation of variables. Functional of quality has nonlinear type and it additionally depends from the square of solution of the given ordinary differential equation. First, it is proved that the function of the state belongs to the class of Sobolev functions. On the base of maximum principle it is formulated the necessary conditions for nonlinear optimal control. Determination of the optimal control function is reduced to the complex functional-integral equation, the solving process of which is composed of solutions of two different equations: nonlinear functional equations and nonlinear integral equations. In the proof of the one-valued solvability of integral equations the method of successive approximations in combination it with the method of compressing mapping is applied. As iterations the Picard iterative process is taken. The formula for approximation calculating the dot mobile nonlinear optimal control and the estimate for the permissible error with respect to optimal control are obtained. The formulas for approximation calculating the nonlinear optimal process and the minimum value of the functional of quality are given. The results obtained in this work can find further application in the development of the mathematical theory of nonlinear optimal control of distributed parameter systems in the presence of mobile sources.

Keywords: Parabolic equation, dot mobile point problem, necessary conditions for optimal control, nonlinearity of control, functional minimization.

Введение. Математическое моделирование многих процессов, происходящих в реальном мире, приводит к изучению прямых и обратных задач для уравнений в частных производных, не имеющих аналогов в классической математической физике. Теория смешанных задач для уравнений в частных производных в силу ее прикладной важности в настоящее время является одним из важнейших разделов теории дифференциальных уравнений в частных производных.

Одним из классов качественно новых задач для дифференциальных уравнений в частных производных являются нелокальные задачи. Нелокальные задачи в виде интегральных условий встречаются при математическом моделировании явлений различной природы, в случае, когда граница области протекания процесса недоступна для непосредственных измерений. Примером могут служить задачи, возникающие при исследовании диффузии частиц в турбулентной плазме, процессов распространения тепла, процесса влагопереноса в капиллярно-пористых средах.

С другой стороны, теория оптимального управления для систем с распределенными параметрами получила бурное развитие. К системам с распределенными параметрами относятся задачи аэрогазодинамики, химических реакций, диффузии, фильтрации, процессов горения, нагрева и т. д. [1–7].

Разрабатываются эффективные численные методы и программные средства для решения задач динамики и управления. При приближенном решении задач оптимального управления системами с распределенными параметрами используется широкий спектр разных методов (см. [8–15]).

Одним из направлений теории оптимального управления системами с распределенными параметрами является разработка методов решения задач оптимального управления при наличии подвижных источников [16]. Во многих задачах нелинейного оптимального управления процессом теплопередачи часто приходится учитывать вспомогательные элементы, без которых невозможно управлять процессом. Эти элементы обычно имеют сосредоточенные параметры. Поведение таких систем в общем случае описывается совокупностью нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений и параболических уравнений при начальных и граничных условиях.

В данной работе рассматриваются вопросы аналитического и приближенного решения нелинейной задачи оптимального управления для одной системы с параболическим и обыкновенным дифференциальными уравнениями при смешанных и начальном условиях и с квадратичным критерием оптимальности. При этом предполагается существование нескольких подвижных точечных источников.

Постановка задачи. Рассмотрим в области D нелинейную задачу управления процессом распространения тепла по стержню конечной длины

$$\frac{\partial u(t, x)}{\partial t} = \frac{\partial^2 u(t, x)}{\partial x^2} + \sum_{k=1}^m \delta(x - \sigma_k(t)) f_k(t, p_k(t)) \quad (1)$$

при начальном

$$u(t, x)|_{t=0} = \varphi(x) \quad (2)$$

и нелокальных условиях

$$u(t, x)|_{x=0} = 0, \quad \int_0^l u(t, y) dy = 0, \quad (3)$$

где $f_k(t, p_k) \in \dot{N}(D_T \times \Omega)$ – функции внешнего источника; $p_k(t) \in \dot{N}(D_T)$ – управляющие функции, $k = \overline{1, m}$; $u(t, x)$ – функция состояния управляемого процесса; $\varphi(x)$ – функция распределения тепла по стержню в начальный момент времени, $\varphi(x)|_{x=0} = 0$, $\varphi(x) \in \dot{N}^3(D_l)$; $\delta(x - \sigma_k(t))$ – дельта-функция Дирака, $k = \overline{1, m}$; $D \equiv D_T \times D_l$, $D_T \equiv [0, T]$; $\Omega \equiv [0, M^*]$, $0 < M^* < \infty$; $D_l \equiv [0, l]$; $0 < T < \infty$, $0 < l < \infty$.

Функции $\sigma_k(t) \in C(D_T)$ описывают изменения положения подвижных точечных источников в пределах от нуля до l и определяются как решение следующей задачи Коши:

$$\sigma_k'(t) = q_k(t, \sigma_k(t)), \quad \sigma_k(0) = \sigma_k^0 = \text{const}, \quad (4)$$

где $q_k(t, \sigma_k) \in C^{0,1}(D_T \times D_l)$, $k = \overline{1, m}$.

В данной работе при фиксированных управлениях $\vec{d}_k(t)$ используется метод разделения переменных, основанный на поиске решения смешанной задачи (1)–(3) в виде ряда Фурье

$$u(t, x) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i(t) \cdot b_i(x), \quad (5)$$

где $b_i(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \lambda_i x$, $\lambda_i = \frac{2i\pi}{l}$, $i = 1, 2, \dots$

Задача. Найти такие управляющие функции

$$\bar{p}_k(t) \in \left\{ \bar{p}_k : |\bar{p}_k(t)| \leq M^*, k = \overline{1, m}, t \in D_T \right\}$$

и соответствующее им состояние $\bar{u}(t, x)$ – решение смешанной задачи (1)–(3), что доставляют минимум функционалу

$$\begin{aligned} J[p] = & \int_0^l [u(T, y) - \xi(y)]^2 dy + \\ & + \alpha \sum_{k=1}^m \int_0^T p_k^2(t) dt + \beta \sum_{k=1}^m \int_0^T \sigma_k^2(t) dt, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\xi(x)$ – заданная функция такая, что $\xi(x) = \sum_{i=1}^{\infty} \xi_i b_i(x)$, $\xi_i = \int_0^l \xi(y) b_i(y) dy$, $\xi(0) = 0$, $0 < \alpha$, $\beta = \text{const}$.

В работе на основе принципа максимума формулируются необходимые условия оптимальности, вычисляются управляющие функции и решается соответствующая смешанная задача (1)–(3). Данная работа является дальнейшим развитием работы [17].

Смешанная задача (1)–(3).

Обозначим

$$\begin{aligned} \bar{C}_u^{1,2}(D) = & \left\{ u(t, x) : u \in C^{1,2}(D), \right. \\ & \left. u(t, 0) = 0, \int_0^l u(t, y) dy = 0 \right\}. \end{aligned}$$

Замыкание этого пространства по норме

$$\|u\|_{\bar{H}(D)} = \left\{ \int_0^l |u(t, x)|^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}} < \infty$$

обозначим $\bar{H}(D)$.

Для числовой последовательности φ_i в пространстве ℓ_2 используется следующая норма:

$$\|\varphi\|_{\ell_2} = \left\{ \sum_{i=1}^{\infty} |\varphi_i|^2 \right\}^{\frac{1}{2}} < \infty.$$

Кроме того, в данной работе используются следующие обозначения. Класс функций, ограниченных по норме числом M , обозначим через $\text{Bnd}(M)$. Класс функций, удовлетворяющих условию Липшица по переменным u, ϑ, \dots с коэффициентом N , обозначим через $\text{Lip}\{N_{|u, \vartheta, \dots}\}$. А для функций одной переменной индекс опускается.

Как и в работе [13], можно убедиться, что решение смешанной задачи (1)–(3) при фиксированных значениях управлений с помощью ряда Фурье (5) представляется в следующем виде:

$$u(t, x) = \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ \omega_i(t) + \int_0^t G_i(t, s) \sum_{k=1}^m b_i(\sigma_k(s)) f_k(s, p_k(s)) ds \right\} \cdot b_i(x), \quad (7)$$

где $\omega_i(t) = \varphi_i e^{-\lambda_i^2 t}$; $G_i(t, s) = e^{-\lambda_i^2 (t-s)}$; $\varphi_i = \int_0^l \varphi(y) b_i(y) dy$.

Предположим, что нелинейные функции $f_k(s, p_k(t))$ удовлетворяют следующим условиям:

$$f_k(t, p_k(t)) \in \text{Bnd}(M_k^0), \quad 0 < M_k^0 = \text{const}; \quad (8)$$

$$f_{kp}(t, p_k(t)) \neq 0, \quad (9)$$

$$\text{где } f_{kp}(t, p_k(t)) = \frac{\partial f_k(t, p_k(t))}{\partial p_k}, \quad k = \overline{1, m}.$$

Теорема 1. Пусть $\varphi(x) \in L_2(D_l)$ и функции $f_k(t, p_k(t))$, $k = \overline{1, m}$ удовлетворяют условиям (8), (9). Тогда для функции (7) справедливо $u(t, x) \in \bar{H}(D)$.

Доказательство. Действительно, имеем

$$\begin{aligned} & \int_0^l \int_0^t u^2(t, y) dy dt \leq \\ & \leq \int_0^T \int_0^l \left\{ \sum_{i=1}^{\infty} \left[\omega_i(t) + \int_0^t G_i(t, s) \sum_{k=1}^m b_i(\sigma_k(s)) \times \right. \right. \\ & \times f_k(s, p_k(s)) ds \left. \right] \cdot b_i(y) \right\}^2 dy dt \leq \\ & \leq 2 \int_0^T \left\{ \sum_{i=1}^{\infty} [\omega_i(t)]^2 + 2 \left(\sum_{i=1}^{\infty} [\omega_i(t)]^2 \right)^{\frac{1}{2}} \times \right. \\ & \times \left(\sum_{i=1}^{\infty} \left[\int_0^t G_i(t, s) \sum_{k=1}^m b_i(\sigma_k(s)) f_k(s, p_k(s)) ds \right]^2 \right)^{\frac{1}{2}} + \\ & \left. + \sum_{i=1}^{\infty} \left[\int_0^t G_i(t, s) \sum_{k=1}^m b_i(\sigma_k(s)) f_k(s, p_k(s)) ds \right]^2 \right\} dt \leq \\ & \leq 2TM_1^2 + 4\sqrt{2}T^2 \sum_{k=1}^m M_k^0 M_1 M_2 M_3 + \\ & + 4T^3 \left(\sum_{k=1}^m M_k^0 M_2 M_3 \right)^2 < \infty, \end{aligned}$$

где

$$M_1 = \left[\sum_{i=1}^{\infty} \max_{t \in D_T} \{ \omega_i(t) \}^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \|\omega(t)\|_{B_2(T)},$$

$$M_2 = \|G(t, s)\|_{B_2(T)},$$

$$M_3 = \|b(\sigma_k(t))\|_{B_2(T)}, k = \overline{1, m}.$$

Отсюда следует утверждение теоремы. И при этом нетрудно убедиться, что при выполнении условий этой теоремы функция (7) является единственным обобщенным решением смешанной задачи (1)–(3) при фиксированных значениях функций $p_k(t)$, $\sigma_k(t)$, $k = \overline{1, m}$.

Построение оптимального управления. Пусть $\bar{p}_k(t)$ являются оптимальными управлениями

$$\Delta J[\bar{p}_k(t)] = J[\bar{p}_k(t) + \Delta \bar{p}_k(t)] - J[\bar{p}_k(t)] \geq 0,$$

где $\bar{p}_k(t) + \Delta \bar{p}_k(t) \in \bar{H}(D_T)$, $k = \overline{1, m}$.

Нетрудно показать, что применение принципа максимума приводит к следующим необходимым условиям оптимальности [4]:

$$\vartheta(t, \sigma_k(t)) f_{kp}(t, \bar{p}_k(t)) - 2\alpha \bar{p}_k(t) = 0, \quad (10)$$

$$\vartheta(t, \sigma_k(t)) f_{pp}(t, \bar{p}_k(t)) - 2\alpha < 0, \quad k = \overline{1, m}, \quad (11)$$

где $\vartheta(t, x)$ – обобщенное решение следующей задачи:

$$\vartheta_t(t, x) + \vartheta_{xx}(t, x) = 0, \quad (t, x) \in D,$$

$$\vartheta(t, x) = -2[u(T, x) - \xi(x)],$$

$$\vartheta(t, 0) = 0, \quad \int_0^l \vartheta(t, y) dy = 0,$$

сопряженной с задачей (1)–(3), и определяется по формуле

$$\begin{aligned} \vartheta(t, x) = -2 \sum_{i=1}^{\infty} \left[\omega_i(T) + \int_0^T G_i(T, s) \sum_{k=1}^m b_i(\sigma_k(s)) \times \right. \\ \left. \times f_k(s, p_k(s)) ds - \xi_i \right] G_i(T, t) b_i(x). \end{aligned} \quad (12)$$

С учетом условий (8), (9) условия оптимальности (10), (11) перепишем в следующем виде:

$$2\alpha p_k(t) f_{kp}^{-1}(t, p_k(t)) = \vartheta(t, \sigma_k(t)), \quad (13)$$

$$f_{kp}(t, p_k(t)) \left(\frac{p_k(t)}{f_{kp}(t, p_k(t))} \right)_{p_k} > 0, \quad k = \overline{1, m}. \quad (14)$$

С учетом (14) из (12) и (13) получаем

$$\begin{aligned} \alpha p_k(t) f_{kp}^{-1}(t, p_k(t)) + \\ + \sum_{i=1}^{\infty} \int_0^T G_i(T, t) G_i(T, s) \sum_{k=1}^m b_i^2(\sigma_k(s)) f_k(s, p_k(s)) ds = \\ = \sum_{i=1}^{\infty} (\omega_i(T) + \xi_i) G_i(T, t) b_i(\sigma_k(t)) \end{aligned}$$

или

$$\alpha p_k(t) f_{kp}^{-1}(t, p_k(t)) + \sum_{k=1}^{\infty} \int_0^T Q(t, s) f_k(s, p_k(s)) ds = F(t), \quad (15)$$

где

$$Q(t, s) = \sum_{i=1}^{\infty} G_i(T, t) G_i(T, s) b_i^2(\sigma_k(s)),$$

$$F(t) = \sum_{i=1}^{\infty} (\omega_i(T) + \xi_i) G_i(T, t) b_i(\sigma_k(t)), \quad k = \overline{1, m}.$$

В уравнение (15) положим

$$\alpha p_k(t) f_{kp}^{-1}(t, p_k(t)) = g_k(t), \quad k = \overline{1, m},$$

где $g_k(t)$ – пока неизвестные функции, но мы для начала предположим, что они заданы. Тогда имеем следующие функциональные уравнения:

$$p_k(t) = \frac{g_k(t)}{\alpha} f_{kp}(t, p_k(t)), \quad k = \overline{1, m}. \quad (16)$$

Пусть выполняется следующее условие:

$$f_{kp}(t, p_k(t)) \in \text{Bnd}(\bar{M}_1) \cap \text{Lip}\{\bar{N}_{1|p_k}\},$$

$$k = \overline{1, m}, \quad 0 < \bar{N}_1, \quad \bar{M}_1 = \text{const}.$$

Тогда функциональные уравнения (16) имеют единственное решение, которое на отрезке D_T находится из следующего итерационного процесса:

$$p_k^{n+1}(t) = \frac{g_k(t)}{\alpha} f_{kp}(t, p_k^n(t)), \quad k = \overline{1, m}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (17)$$

Это решение обозначим так:

$$p_k(t) = h_k(t, g_k(t)), \quad k = \overline{1, m}. \quad (18)$$

Теперь для определения функции $g_k(t)$, подставляя (18) в (15), получаем интегральные уравнения Фредгольма

$$g_k(t) + \sum_{k=1}^m \int_0^T Q(t, s) f_k(s, h_k(s, g_k(s))) ds = F(t), \quad k = \overline{1, m}. \quad (19)$$

В качестве нормы для произвольной функции $\psi(t) \in C(D_T)$ используем евклидову норму

$$\|\psi(t)\|_C = \max_{t \in D_T} |\psi(t)|.$$

Теорема 2. Пусть:

1) Выполняются условия теоремы 1 и условие (14);

2) $\xi(x) \in L_2(D_I)$;

3) $h_k(t, g_k(t)) \in \text{Bnd}(M_{k1}) \cap \text{Lip}\{N_{k1|g_k}\}$,

$0 < N_{k1}, M_{k1} = \text{const}$;

4) $f_k(t, h_k(t)) \in \text{Bnd}(M_{k2}) \cap \text{Lip}\{N_{k2|g_k}\}$,

$0 < N_{k2}, M_{k2} = \text{const}$;

5) $\rho = (M_2 M_3)^2 T \sum_{k=1}^m N_{k1} N_{k2} < 1$.

Тогда нелинейные интегральные уравнения Фредгольма второго рода (19) имеют единственное решение $g_k(t) \in C(D_T)$.

Доказательство. Сначала заметим, что функции $Q(t, s)$ и $F(t)$ ограничены

$$\begin{aligned} |Q(t, s)| &\leq \sum_{i=1}^{\infty} |G_i(T, t)|^2 |b_i(\sigma_k(t))|^2 \leq \\ &\leq \sum_{i=1}^{\infty} \max_{t \in D_T} |G_i(T, t)|^2 \times \\ &\times \sum_{i=1}^{\infty} \max_{t \in D_T} |b_i(\sigma_k(t))|^2 = (M_2 M_3)^2 < \infty; \\ |F(t)| &\leq \sqrt{\frac{2}{l}} \sum_{i=1}^{\infty} |\omega_i(T) + \xi_i| |G_i(T, t)| \leq \\ &\leq \sqrt{\frac{2}{l}} \left(\sum_{i=1}^{\infty} |\omega_i(T) + \xi_i|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left(\sum_{i=1}^{\infty} |G_i(T, t)|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \leq \\ &\leq \sqrt{\frac{2}{l}} (M_1 + \|\xi\|_{\ell_2}) M_2 < \infty. \end{aligned} \quad (20)$$

С учетом оценок (20) и (21) рассмотрим следующий итерационный процесс:

$$\begin{cases} g_k^1(t) + \sum_{k=1}^m \int_0^T Q(t, s) f_k(s, h_k(s, 0)) ds = F(t), \\ g_k^{n+1}(t) + \sum_{k=1}^m \int_0^T Q(t, s) f_k(s, h_k(s, g_k^n(s))) ds = F(t), \\ n = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (22)$$

В силу условий теоремы из (22) получаем следующие оценки:

$$\begin{aligned} \|g_k^1(t)\|_C &\leq \left\| F(t) - \sum_{k=1}^m \int_0^T Q(t, s) f_k(s, h_k(s, 0)) ds \right\|_C \leq \\ &\leq \sqrt{\frac{2}{l}} (M_1 + \|\xi\|_{\ell_2}) M_2 + (M_2 M_3)^2 \sum_{k=1}^m M_{k2} T < \infty; \quad (23) \\ \|g_k^{n+1}(t) - g_k^n(t)\|_C &\leq \\ &\leq \sum_{k=1}^m \int_0^T |Q(t, s)| \left\| f_k(s, h_k(s, g_k^n(s))) - \right. \\ &\quad \left. - f_k(s, h_k(s, g_k^{n-1}(s))) \right\|_C ds \leq \\ &\leq (M_2 M_3)^2 T \sum_{k=1}^m N_{k2} \left\| h_k(s, g_k^n(s)) - h_k(s, g_k^{n-1}(s)) \right\|_C \leq \\ &\leq \rho \|g_k^n(t) - g_k^{n-1}(t)\|_C < \|g_k^n(t) - g_k^{n-1}(t)\|_C. \quad (24) \end{aligned}$$

Из оценок (23) и (24) следует, что нелинейные интегральные уравнения Фредгольма второго рода (19) имеют единственное решение $g_k(t) \in C(D_T)$, $k = \overline{1, m}$. Теорема доказана.

Кроме того, из (19) и (22) аналогично (23) и (24) можно получить, что справедлива оценка

$$\begin{aligned} \|g_k(t) - g_k^n(t)\|_C &\leq \\ &\leq \frac{\rho^n}{1-\rho} \left[\sqrt{\frac{2}{l}} (M_1 + \|\xi\|_{\ell_2}) M_2 + (M_2 M_3)^2 \sum_{k=1}^m M_{k2} T \right]. \end{aligned}$$

Отсюда с учетом (18) и второго условия теоремы 2 для погрешности приближенного вычисления управляемых функций получаем оценку

$$\begin{aligned} \|p_k(t) - p_k^n(t)\|_C &\leq \\ &\leq \frac{\rho^n}{1-\rho} \left[\sqrt{\frac{2}{l}} (M_1 + \|\xi\|_{\ell_2}) M_2 + \right. \\ &\quad \left. + (M_2 M_3)^2 \sum_{k=1}^m M_{k2} T \right] \sum_{k=1}^m N_{k1}. \end{aligned} \quad (25)$$

Построение оптимального процесса и вычисление минимального значения функционала. Согласно (7) оптимальный процесс находим по формуле

$$\bar{u}(t, x) = \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ \omega_i(t) + \sum_{k=1}^m \int_0^t G_i(t, s) b_i(\sigma_k(s)) \times \right. \\ \left. \times f_k(s, \bar{p}_k(s)) ds \right\} \cdot b_i(x). \quad (26)$$

Оптимальный процесс (26) можно приближенно найти с помощью итерационного процесса Пикара

$$\bar{u}^n(t, x) = \sum_{i=1}^n \left\{ \omega_i(t) + \sum_{k=1}^m \int_0^t G_i(t, s) b_i(\sigma_k^n(s)) \times \right. \\ \left. \times f_k(s, \bar{p}_k^n(s)) ds \right\} \cdot b_i(x). \quad (27)$$

Минимальное значение функционала, согласно формулам (6) и (26), находится из следующей формулы:

$$\begin{aligned} J[\bar{p}_k] = \int_0^l \left[\sum_{i=1}^{\infty} \left\{ \omega_i(T) + \sum_{k=1}^m \int_0^T G_i(T, s) b_i(\sigma_k(s)) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times f_k(s, \bar{p}_k(s)) ds - \xi_i \right\} \cdot b_i(y) \right]^2 dy + \\ + \alpha \sum_{k=1}^m \int_0^T (\bar{p}_k(t))^2 dt + \beta \sum_{k=1}^m \int_0^T (\sigma_k(t))^2 dt. \quad (28) \end{aligned}$$

Из работы [18], в частности, следует, что задача Коши (4) при выполнении условия

$$q_k(t, \sigma_k(t)) \in \text{Bnd}(M_4) \cap \text{Lip}\{N_{3|\sigma_k}\}, \\ k = \overline{1, m}, \quad 0 < M_4, \quad N_3 = \text{const}$$

имеет единственное решение $\sigma_k(t) \in C(D_T)$, $k = \overline{1, m}$.

Теорема 3. Пусть выполняются условия теоремы 2. Тогда функционал (28) принимает конечное значение.

Доказательство. Учитывая доказательства теорем 1 и 2, из (28) получаем

$$\begin{aligned} J[\bar{p}_k] &\leq 2 \left(M_1 + \|\xi\|_{\ell_2} \right)^2 + \\ &+ 2T \left(M_1 + \|\xi\|_{\ell_2} \right) \sum_{k=1}^m M_k^0 (M_2 M_3)^2 + \end{aligned}$$

$$+ 2T^2 \left(\sum_{k=1}^m M_k^0 M_2 M_3 \right)^2 + \alpha T (mM^*)^2 + \beta T m^2 l^2 < \infty.$$

Отсюда следует, что функционал (28) принимает конечное значение. Теорема доказана.

Приближенное значение функционала вычисляется по следующему итерационному процессу:

$$\begin{aligned} J[\bar{p}_k^n] = & \int_0^t \left[\sum_{i=1}^n \left\{ \omega_i(T) + \sum_{k=1}^m \int_0^T G_i(T, s) b_i(\sigma_k^n(s)) \times \right. \right. \\ & \times f(s, \bar{p}_k^n(s)) ds - \xi_i \left. \right\} \cdot b_i(y) \right]^2 dy + \\ & + \alpha \sum_{k=1}^m \int_0^T (\bar{p}_k^n(t))^2 dt + \beta \sum_{k=1}^m \int_0^T (\sigma_k^n(t))^2 dt, \quad n = 1, 2, 3, \dots; \quad (29) \end{aligned}$$

$\sigma_k(t)$, $k = \overline{1, m}$ определяется из следующего итерационного процесса:

$$\sigma_k^{n+1}(t) = \sigma_k^0 + \int_0^t q_k(s, \sigma_k^n(s)) ds, \quad k = \overline{1, m}. \quad (30)$$

Заключение. В работе предлагается методика решения одной точечной подвижной задачи нелинейного оптимального управления для одной системы с параболическим и обыкновенным дифференциальными уравнениями при смешанных нелокальных и начальном условиях. Сначала используется метод Фурье разделения переменных. На основе принципа максимума формулируются необходимые условия оптимальности управлений при квадратичных критериях. Доказывается однозначная разрешимость оптимальных управлений. При этом используется метод последовательных приближений в сочетании его с методом сжимающих отображений. Получается формула для приближенного вычисления подвижных оптимальных управлений и оценка для допускаемой погрешности по оптимальным управлением. Приводятся формулы для приближенного вычисления оптимального процесса и минимального значения функционала. При этом используются итерационные процессы (17), (22), (27), (29) и (30). Полученные результаты могут найти дальнейшее применение в развитии математической теории нелинейного оптимального управления системами с распределенными параметрами при наличии подвижных источников.

Библиографические ссылки

1. Бутковский А. Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами. М. : Наука, 1965. 474 с.
2. Евтушенко Ю. Г. Методы решения экстремальных задач и их применение в системах оптимизации. М. : Наука, 1982. 432 с.
3. Егоров А. И. Оптимальное управление тепловыми и диффузионными процессами. М. : Наука, 1978. 464 с.
4. Керимбеков А. Нелинейное оптимальное управление линейными системами с распределенными параметрами : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Бишкек :

Ин-т математики НАН Кыргызской Республики, 2003. 224 с.

5. Лионс Ж. Л. Оптимальное управление системами, описываемыми уравнениями с частными производными. М. : Мир, 1972. 412 с.

6. Лурье К. А. Оптимальное управление в задачах математической физики. М. : Наука, 1975. 480 с.

7. Рапопорт Э. Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. М. : Вышш. шк., 2009. 680 с.

8. Кротов В. Ф., Гурман В. И. Методы и задачи оптимального управления. М. : Наука, 1973. 448 с.

9. Миллер Б. М., Рубинович Е. Я. Разрывные решения в задачах оптимального управления и их представление с помощью сингулярных пространственно-временных преобразований // Автомат. и телемех. 2013. № 12. С. 56–103.

10. Срочко В. А. Итерационные методы решения задач оптимального управления. М. : Физматлит, 2000. 160 с.

11. Тятошкин А. И. Численные методы и программные средства оптимизации управляемых систем. Новосибирск : Наука, 1992. 193 с.

12. Федоренко Р. П. Приближенное решение задач оптимального управления. М. : Наука, 1978. 488 с.

13. Юлдашев Т. К. Приближенное решение нелинейного параболического и обыкновенного дифференциального уравнений и приближенный расчет функционала качества при известных управляющих воздействиях // Проблемы управления. 2014. № 4. С. 2–8.

14. Юлдашев Т. К. О построении приближений для оптимального управления в квазилинейных уравнениях с частными производными первого порядка // Матем. теория игр и её прилож. 2014. Т. 6, № 3. С. 105–119.

15. Юлдашев Т. К. Приближенное решение точечной подвижной задачи оптимального управления для нелинейного гиперболического уравнения // Моделирование и анализ информационных систем. 2014. Т. 21, № 3. С. 106–120.

16. Бутковский А. Г., Пустыльников Л. М. Теория подвижного управления системами с распределенными параметрами. М. : Наука, 1980. 384 с.

17. Юлдашев Т. К. Нелинейная точечная задача оптимального управления для псевдопараболического уравнения // Вестник ВоронежГУ. Сер. «Системный анализ и информационные технологии». 2014. № 3. С. 9–16.

18. Юлдашев Т. К. Развитие теории нелинейных дифференциальных уравнений с максимумами : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Бишкек : Ин-т математики НАН Кыргызской Республики, 1993. 121 с.

References

1. Butkovskiy A. G. Teoriya optimal'nogo upravleniya sistemami s raspredelyonnymi parametrami [The theory of optimal control of systems with distributed parameters]. Moscow, Nauka Publ., 1965, 474 p. (In Russ.).
2. Evtushenko Yu. G. Metody resheniya ekstremal'nykh sadach i ikh primeneniye v sistemakh

optimizatsii [Methods for solving extremal problems and their application in optimization systems]. Moscow, Nauka Publ., 1982, 432 p. (In Russ.).

3. Egorov A. I. *Optimal'noye upravleniye teplovymi i diffuzionnymi protsessami* [Optimal control of thermal and diffusion processes]. Moscow, Nauka Publ., 1978, 464 p. (In Russ.).

4. Kerimbekov A. *Nelineynoje optimal'noye upravleniye lineynymi sistemami s raspredelyonnymi parametrami*. Dis. d-ra fiz.-mat. nauk. [Nonlinear optimal control of linear systems with distributed parameters. Dis. Dr. Sci. Sciences]. Bishkek, Institut matematiki NAN Kyrgyzskoy Respublikи Publ., 2003, 224 p. (In Russ.).

5. Lions J. L. *Optimal'noye upravleniye sistemami, opisyvayemymi uravneniyami s chastnymi proizvodnymi* [Optimal control of systems described by partial differential equations]. Moscow, Mir Publ., 1972, 412 p. (In Russ.).

6. Lur'ye K. A. *Optimal'noye upravleniye v zadachakh matematicheskoy fiziki* [Optimal control in the problems of mathematical physics]. Moscow, Nauka Publ., 1975, 480 p. (In Russ.).

7. Rapoport E. Ya. *Optimal'noye upravleniye sistemami s raspredelyonnymi parametrami* [Optimal control of systems with distributed parameter]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2009, 680 p. (In Russ.).

8. Krotov V. F., Gurman V. I. *Metody i zadachi optimal'nogo upravleniya* [Methods and problems of optimal control]. Moscow, Nauka Publ., 1973, 448 p. (In Russ.).

9. Miller B. M., Rubinovich E. Ya. Discontinuous solutions in the optimal control problems and their representation by singular space-time transformations. *Automation and Remote Control*. 2013, Vol. 74, No 12, P. 1969–2006.

10. Srochko V. A. *Iteratsionnye metody resheniya zadach optimal'nogo upravleniya* [Iterative methods for solving optimal control problems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2000, 160 p. (In Russ.).

11. Tyatyushkin A. I. *Chislennye metody i programmnaye sredstva optimizatsii upravlyayemykh sistem* [Numerical methods and software for optimization of control systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1992, 193 p.

12. Fedorenko R. P. *Priblizhennoe reshenie zadach optimal'nogo upravleniya* [Approximate solution of optimal control problems]. Moscow, Nauka Publ., 1978, 488 p. (In Russ.).

13. Yuldashev T. K. [Approximate solution of nonlinear parabolic and ordinary differential equations and an approximate calculation of the functionality of quality at known operating influences]. *Problemy upravleniya*. 2014, No 4, P. 2–8 (In Russ.).

14. Yuldashev T. K. [On an optimal control in quazilinear partial differential equations of the first order]. *Matematicheskaya teoriya igr i eyo prilozheniya*. 2014, Vol. 6, No 3, P. 105–119 (In Russ.).

15. Yuldashev T. K. [Approximate solution of optimal control dot mobile problem for a nonlinear hyperbolic equation]. *Modelirovanie i analiz informatsionnykh sistem*. 2014, Vol. 21, No 3, P. 106–120 (In Russ.).

16. Butkovskiy A. G., Pustyl'nikov L. M. *Teoriya podvizhnogo upravleniya sistemami s raspredelyonnymi parametrami* [Theory dot movable control systems with distributed parameters]. Moscow, Nauka Publ., 1980, 384 p. (In Russ.).

17. Yuldashev T. K. [A nonlinear point problem of optimal control for pseudoparabolic equation]. *Vestnik VoronezhGU. Seriya: Sistemnyi analiz i informatsionnye tekhnologii*. 2014, No 3, P. 9–16 (In Russ.).

18. Yuldashev T. K. *Razvitiye teorii nelineynykh differentialslykh uravneniy s maksimumami*. Diss. kand. fiz.-mat. nauk. [Development of the theory of nonlinear differential equations with maxima. Dis. Cand. Sci. Sciences]. Bishkek, Institut matematiki NAN Kyrgyzskoy Respublikи Publ., 1993, 121 p. (In Russ.).

О ВОССТАНОВЛЕНИИ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ В СПИРАЛЬНОЙ ЗВЕЗДЕ МИТТАГ-ЛЕФФЛЕРА ПО ЗНАЧЕНИЯМ НА МНОЖЕСТВЕ ЕДИНСТВЕННОСТИ

Е. И. Яковлев

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

В случае одного комплексного переменного традиционным множеством единственности в классе аналитических функций является множество, содержащее предельную точку. Наиболее известным множеством единственности в многомерном случае является «вещественная» окрестность точки. Для определенного класса областей множество единственности в многомерном случае может быть уменьшено. Например, в работах С. В. Знаменского указывается счетное подмножество на остове полидиска, по значению на котором голоморфная функция восстанавливается во всем полидиске.

Иногда функция может быть продолжена и в большую область. Так, в работах Ж. Адамара, Г. Миттаг-Леффлера, Ле Руа, Линделефа были предложены методы суммирования, дающие хорошие результаты для аналитического продолжения степенного ряда в случае звездных областей комплексной плоскости. В дальнейшем, для одномерного случая в работах Н. У. Аракеляна был предложен метод восстановления аналитического элемента с помощью универсальных матричных методов суммирования в классе спиральных областей.

Настоящая работа посвящена восстановлению аналитической функции, заданной на счетном множестве единственности остова полидиска, в максимальную спиральную область, называемую (m, a) -звездой Миттаг-Леффлера данной функции. Восстановление производится с использованием многомерных матричных методов суммирования кратного степенного ряда, которые строятся с помощью одномерных матричных методов суммирования степенного ряда. При этом апробация построенных многомерных матричных методов суммирования кратного степенного ряда проводится с помощью одномерной геометрической прогрессии.

Ключевые слова: кратный степенной ряд, множество единственности, звезда Миттаг-Леффлера, главная звезда, аналитическое продолжение, суммирование кратного степенного ряда, матричные методы суммирования, спиральные области, области эффективной суммируемости.

Vestnik SibGAU
Vol. 17, No. 1, P. 110–115

ABOUT RESTORATION OF ANALYTIC FUNCTIONS IN THE MITTAG-LEFFLER'S SPIRAL STAR BY THE VALUES ON A SET OF UNIQUENESS

E. I. Yakovlev

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

In the case of one complex variable, many traditional set of uniqueness in the class of analytic functions is the set containing the limit point. The most famous variety of uniqueness in the multivariate case is a “real” neighborhood of a point. For a certain class of many domains of uniqueness in the multidimensional case can be reduced. For example, in the works of S. V. Znamenskii a countable subset on the skeleton of polydisc, the value of a holomorphic function is restored throughout polydisc are specified.

Perhaps the function can be continued in a larger area. In the works of J. Hadamard, G. Mittag-Leffler, Le Roy, Lindelof the so-called summation methods that give good results for analytic continuation of a power series in the case of star fields of the complex plane have been proposed. Further, for the one-dimensional case, in the works of N. At. Arakelyan the restoration of the analytical element using the universal matrix methods of summation in class helical regions was obtained.

The present work is devoted to the restoration of analytic functions defined on a countable set of uniqueness skeleton of polydisc, in the helical region, called (m, a) is the star of the Mittag-Leffler of this function. Recovery is carried out using multidimensional matrix methods of summation of multiple power series, which are constructed using

one-dimensional matrix methods of summation of power series. While testing a multivariate matrix methods of summation of multiple power series are performed using a one-dimensional exponentially.

Keywords: multiple power series, a lot of uniqueness, the star of the Mittag-Leffler, the main star, analytic continuation, summation of multiple power series matrix methods of summation, spiral region, the area effective summability.

Введение. Примерно сотню лет назад ученые начали использовать теорию функций комплексных переменных для описания неравномерных полей, для моделирования сложных потоков, для описания вращающихся полей и стали получать модели комплексных переменных, которые значительно проще описывают сложные объекты и явления, нежели модели действительных переменных. Задачи гидродинамики и газовой динамики, авиастроение, самолетостроение и ракетостроение используют комплексные переменные как основной математический инструмент моделирования. Например, теория подъемной силы крыла самолета опирается на построение аналитической функции, которая носит имя «дедушки» русской авиации Жуковского. Теорема единственности определяет одно из классических свойств аналитических функций. Если из обращения аналитической функции на множестве следует ее тождественное равенство нулю, то обычно такое множество называют множеством единственности.

В случае n -мерного комплексного пространства C^n множеством единственности является «вещественная» окрестность точки. В зависимости от вида области размерность множества единственности может быть уменьшена. Обычно это наблюдается для тех областей в C^n , у которых граница Шилова области является собственной частью границы самой области. Особенno наглядно это получается в случае полилиндра. Классическая формула Коши восстанавливает значение функции, голоморфной в полидиске, по ее значениям на остеve полидиска. В работах [1; 2] С. В. Знаменского указывается счетное подмножество на остеve полидиска, по значению на котором голоморфная функция восстанавливается во всем полидиске.

В некоторых случаях функция может быть продолжена в большую область. Вопросам аналитического продолжения степенного ряда, в частности путем переразложения ряда, в случае одного переменного посвящена монография [3], содержащая соответствующую библиографию. В дальнейшем, более эффективные методы суммирования степенного ряда (аналитического продолжения с помощью матричных методов) были предложены Миттаг-Леффлером, Линделефом, Ле Руа и другими математиками (см., например, [3–5]). Для $n = 1$ в случае звездных областей достаточно подробная библиография имеется в [6–8], для случая спиральных областей – в [9]. В дальнейшем, Аракеляну [9] удалось показать, что аналитическое продолжение однократного степенного ряда с помощью матричных методов суммирования возможно только в спиральные области.

В случае многих переменных в работах [10–13] предлагаются различные методы суммирования кратного степенного ряда для звездных областей. В [14] предложен метод, позволяющий суммировать крат-

ный степенной ряд в случае параболически звездных областей (см. ниже определение 1, при $\alpha = (0, \dots, 0)$). В работе [15] предлагаются методы суммирования кратного степенного ряда, позволяющие суммировать этот ряд в классе областей в C^n , естественным образом обобщающих как спиральные, так и звездные.

Используя формулу из [1; 2], восстанавливающую аналитическую функцию в единичном полидиске по счетному множеству единственности на остеve полидиска, в настоящей работе по значениям функции на дискретном множестве единственности, расположенному на остеve полидиска, функция восстанавливается в произвольной спиральной звезде Миттаг-Леффлера по схеме, предложенной в [15].

Основные обозначения и формулировки. Обозначим $z = (z_1, \dots, z_n)$ – точки n -мерного комплексного пространства C^n , $R_{>}^n := \{x \in R^n : x_1 > 0, \dots, x_n > 0\}$, $\Gamma_r = \{z \in C^n : |z_j| = r_j\}$; $k = (k_1, \dots, k_n)$ – мультииндексы, $\|k\| = k_1 + \dots + k_n$, $k! = k_1! \dots k_n!$, $z^k = z_1^{k_1} \dots z_n^{k_n}$, $U_r = U^n(r_1, \dots, r_n) = \{z \in C^n : |z_j| < r_j\}$, $U = U^n(1, \dots, 1)$, $Q_{>} := \left\{ \frac{m}{n} : m, n \in N \right\}$.

Пусть

$$f(z_1, \dots, z_n) = \sum_{\|k\| \geq 0} a_{k_1 \dots k_n} z_1^{k_1} \dots z_n^{k_n} \quad (1)$$

n -кратный степенной ряд, который сходится в некотором полидиске U_r в C^n . Функции, голоморфные в U_r и непрерывные вплоть до замыкания $\overline{U_r}$, обозначим $A(U_r)$. Для таких функций классическая формула Коши позволяет восстанавливать их значения внутри полидиска по значениям функции на остеve.

В [1; 2] решается задача восстановления функции из $A(U)$ по значениям этой функции на дискретном множестве единственности, расположенному на остеve единичного полидиска U . Пусть положительные числа b_1, \dots, b_n выбраны так, что величины $\ln b_1, \dots, \ln b_n$ вместе с числом π линейно независимы над кольцом целых чисел, тогда набор точек $\beta = \{b_1^{iv}\}_{v=-\infty}^{\infty} = \{b_1^{iv}, \dots, b_n^{iv}\}_{v=-\infty}^{\infty}$ является множеством единственности для функции, голоморфной в единичном полидиске U и непрерывной вплоть до его остеve. Формула, восстанавливающая функцию f по набору β , анонсирована С. В. Знаменским в [1], ее подробное доказательство изложено в [2]. Приведем полную формулировку теоремы из [2].

Теорема A ([2], с. 47, теорема 1). Пусть $f \in A(U)$. Тогда при $z \in \overline{U}$

$$f(z_1, \dots, z_n) = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{2m} \sum_{k=-m}^m \frac{f(b^{ik})}{(1-z_1 b_1^{\delta(k)}) \dots (1-z_n b_n^{\delta(k)})}, \quad (2)$$

где последовательность $\delta(k)$ определяется выбором β . При $\delta(k) \equiv -ik$ формула верна для всех $z \in U$.

Замечание 1. Формула (2) восстанавливает функцию $f(z)$ в замыкании единичного полидиска по дискретному множеству β , последовательность $\delta(k)$ определяется выбором β . Для внутренних точек полидиска можно взять $\delta(k) \equiv -ik$. Поэтому в дальнейшем будем считать $\delta(k) \equiv -ik$.

Замечание 2. Формулу (2) с помощью замены несложно выписать для произвольного полидиска $U_r = U^n(r_1, \dots, r_n)$ с радиусами (r_1, \dots, r_n) :

$$f(z_1, \dots, z_n) = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{2m} \sum_{k=-m}^m \frac{f(rb^{ik})}{(1-z_1 r_1^{-1} b_1^{\delta(k)}) \dots (1-z_n r_n^{-1} b_n^{\delta(k)})}.$$

Задача аналитического продолжения функции, заданной кратным степенным рядом, в спиральную область с помощью одномерных матричных методов решена в [15]. Для формулировки основного результата настоящей работы приведем определение класса областей из [15].

Определение 1. Пусть $x \in \mathbf{R}_>^n$, $\alpha \in \mathbf{R}^n$. Множество G в \mathbf{C}^n назовем (x, α) -спиральным относительно начала координат, если вместе с каждой точкой $z^0 = (z_1^0, \dots, z_n^0)$ в множестве G содержится (x, α) -отрезок

$$\begin{aligned} L_{z_0}^{(x, \alpha)} := \{z \in \mathbf{C}^n : z_1 = z_1^0 t^{x_1(1+i\alpha_1)}, \dots \\ \dots, z_n = z_n^0 t^{x_n(1+i\alpha_n)}, t \in [0, 1]\} \subset G. \end{aligned}$$

Если функция $f(z)$ голоморфна в некоторой окрестности начала координат в \mathbf{C}^n , то максимальную (x, α) -спиральную область $G_f^{x, \alpha}$, в которую голоморфно можно продолжить функцию f , назовем (x, α) -спиральной звездой Миттаг-Леффлера функции f , или просто (x, α) -звездой. Максимальная звездная область G , в которую голоморфно продолжается ряд (1), называется звездой Миттаг-Леффлера (или главной звездой) ряда (1) или функции $f(z)$.

Понятие (x, α) -спиральной звезды Миттаг-Леффлера шире понятия звезды Миттаг-Леффлера. Соответствующие примеры имеются в [13–15]. Для $n = 1$ класс (x, α) -спиральных областей переходит в спиральные области (см. [3], с. 40 и [9], с. 38).

Цель настоящей работы, опираясь на представление функции в единичном полидиске из [2], формулу (2) и результаты из [15], – доказать формулу, позволяющую восстановить функцию f в ее $(x_1, \dots, x_n; \alpha, \dots, \alpha)$ -звезде Миттаг-Леффлера по значениям этой функции на дискретном множестве единственности, расположенному на остеце единичного полидиска U . Основным результатом работы является следующая теорема.

Теорема 1. Пусть $f \in A(U)$, $x \in Q_>^n$. Тогда для $z \in G_f^{(x, \alpha)}$ справедлива формула

$$f(z_1, \dots, z_n) = \lim_{\rho \rightarrow \rho_0} \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{2m} \sum_{k=-m}^m f(b^{ik}) T_{(x; \alpha, \rho)}(z_1 b_1^{ik}, \dots, z_n b_n^{ik}), \quad (3)$$

где метод суммирования $T_{(x; \alpha)}$ построен по одномерному методу T_α из класса S по формуле (6).

Следствие 1. Формула для произвольного полидиска с радиусами $r = (r_1, \dots, r_n)$ имеет вид

$$f(z_1, \dots, z_n) = \lim_{\rho \rightarrow \rho_0} \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{2m} \sum_{k=-m}^m f(r b^{ik}) T_{(x; \alpha, \rho)}\left(\frac{z_1}{r_1} b_1^{ik}, \dots, \frac{z_n}{r_n} b_n^{ik}\right).$$

Замечание 3. Если бы можно было переставить местами пределы (а это заведомо можно сделать внутри полидиска) и перейти к пределу по ρ , то мы получили бы формулу (2) для полидиска из теоремы А.

Приведем необходимые для доказательства теоремы 1 формулировки и понятия из [15].

Пусть $P = \{\rho\}$ – множество на вещественной оси, имеющее предельную точку ρ_0 такую, что $\rho_0 \notin P$, и пусть

$$T_\tau(z) = \sum_{\|k\| \geq 0} c_k(\rho) z^k = \sum_{\|k\| \geq 0} c_{k_1 \dots k_n}(\rho) z_1^{k_1} \dots z_n^{k_n} \quad (4)$$

степенной ряд, коэффициенты которого зависят от произвольного $\rho \in P$, сходящийся в \mathbf{C}^n .

Определение 2. Будем говорить, что матрица $T = \{c_k(\rho)\} = \{c_{k_1 \dots k_n}(\rho)\}$ или матричный метод T суммирует ряд (1) в области $\Omega(f \in H(\Omega))$, если:

1) композиция Адамара рядов (1) и (4)

$$T_\tau * f(z) = \sum_{\|k\| \geq 0} c_k(\rho) a_k z^k = \sum_{\|k\| \geq 0} c_{k_1 \dots k_n}(\rho) a_{k_1 \dots k_n} z_1^{k_1} \dots z_n^{k_n} \quad (5)$$

при фиксированном $\rho \in P$ абсолютно сходится в некоторой полной, логарифмически выпуклой, области, содержащей Ω ;

2) локально равномерно в Ω (равномерно на любом компакте из Ω) выполняется равенство

$$f(z) = \lim_{\rho \rightarrow \rho_0} T_\rho * f(z), \quad \forall z \in \Omega.$$

Замечание 4. Можно рассматривать класс матричных методов T , которые при $\rho \in P$ не задают целую функцию, но выполняется условие 1. Это существенно расширит класс рассматриваемых методов, но вызовет определенные трудности при проверке условия 1. Если ряд (1) сходится в непустой окрестности 0 и матричный метод T при $\rho \in P$ задает целую функцию, тогда условие 1 не требует проверки, оно выполняется автоматически. Что и предполагается в настоящей работе.

Для одномерного случая теорема Окада [6; 9] позволяет апробировать каждый из матричных методов лишь на геометрической прогрессии. Если матричный

метод суммирует геометрическую прогрессию в ее α -спиральной звезде Миттаг-Леффлера, то этот метод суммирует любую функцию в ее α -спиральной звезде Миттаг-Леффлера. Для многомерного случая вариант теоремы Окада для случая звездных областей предложен в [13].

Опишем класс одномерных методов суммирования, необходимых для построения многомерных методов, используемых в теореме 1.

Определение 3. Обозначим через S класс одномерных методов суммирования (полунепрерывных матричных методов) $T_\alpha = \{T_k^\alpha(\rho), \rho \in P\}$ со свойствами:

1. Функция $\Phi_\tau(\lambda) = \sum_{k=0}^{\infty} T_k^\alpha(\rho) \lambda^k$ является целой

для произвольного $\rho \in P, \lambda \in \mathbf{C}$.

2. Матричный метод T_α суммирует геометрическую прогрессию $g(\lambda) = (1-\lambda)^{-1}$ всюду в ее α -спиральной звезде Миттаг-Леффлера $G_{(1-\lambda)^{-1}}^\alpha$. То есть локально равномерно выполняется равенство

$$(1-\lambda)^{-1} = \lim_{\tau \rightarrow \tau_0} T_\tau * (1-\lambda)^{-1}, \quad \forall \lambda \in G_{(1-\lambda)^{-1}}^\alpha.$$

Произвольному матричному методу из класса S и $\forall x \in Q_>$ можно поставить в соответствие многомерный матричный метод по правилу

$$T_{(x;\alpha)} := \left\{ T_{< k, m >}^\alpha(\rho), \rho \in P \right\}, \quad (6)$$

где $m = (m_1, \dots, m_n)$ – первая целочисленная точка с положительными координатами, лежащая на луче, выходящем из нуля и проходящем через точку x . Для дальнейшего изложения нам необходима теорема об аналитическом продолжении с помощью матричных методов. Приведем ее полную формулировку из [15] в удобном для дальнейшего использования виде.

Теорема B. Пусть функция f задана кратным степенным рядом (1), сходящимся в окрестности нуля в \mathbf{C}^n , $x \in Q_>$, $G_f^{(x,\alpha)}$ – ее $(x_1, \dots, x_n; \alpha, \dots, \alpha)$ -спиральная звезда Миттаг-Леффлера и многомерный метод $T_{(x;\alpha)}$ построен по одномерному методу T_α из класса S по формуле (6). Тогда всюду в $G_f^{(x,\alpha)}$ метод $T_{(x;\alpha)}$ локально равномерно суммирует функцию f . То есть справедлива формула

$$f(z) = \lim_{\rho \rightarrow \rho_0} F_{(x;\alpha)}^\tau(z), \quad \forall z \in G_f^{(x,\alpha)}, \quad (7)$$

где $F_{(x;\alpha)}^\tau(z) = \sum_{\|k\| \geq 0} T_{< k, m >}^\alpha(\rho) a_{k_1 \dots k_n} z_1^{k_1} \dots z_n^{k_n}, \tau \in P$ –

композиция Адамара ряда (1) и ряда

$$T_{(x;\alpha)}^\tau(z) = \sum_{\|k\| \geq 0} T_{< k, m >}^\alpha(\rho) z_1^{k_1} \dots z_n^{k_n}, \rho \in P.$$

С помощью теоремы удобно конструировать многомерные матричные методы по одномерным. К сожалению, суммировать такие методы могут кратные степенные ряды в спиральных звездах только с когерентной мнимой частью, т. е. при $\alpha_1 = \dots = \alpha_n = \alpha$.

Основные доказательства. Теорема В позволяет восстанавливать функцию по ее значениям на достаточно «тонких» и даже дискретных множествах во всей спиральной звезде Миттаг-Леффлера. Для доказательства теоремы 1 нам потребуется лемма.

Лемма. Пусть $x \in Q_>$, $f \in A(U_r)$, $G_f^{(x,\alpha)}$ – ее $(x_1, \dots, x_n; \alpha, \dots, \alpha)$ -спиральная звезда Миттаг-Леффлера и многомерный метод $T_{(x;\alpha)}$ построен по одномерному методу T_α из класса S по формуле (6). Тогда всюду в $G_f^{(x,\alpha)}$ справедлива формула

$$\begin{aligned} f(z_1, \dots, z_n) = \\ = \lim_{\rho \rightarrow \rho_0} \frac{1}{(2\pi i)^n} \int_{\Gamma_r} f(\zeta) T_{(x;\alpha,\rho)} \left(\frac{z}{\zeta} \right) \frac{d\zeta}{\zeta}, \quad z \in G_f^{(x,\alpha)}. \end{aligned} \quad (8)$$

Формула справедлива для всех точек в $G_f^{(x,\alpha)}$ $(x_1, \dots, x_n; \alpha_1, \dots, \alpha_n)$ -звезде f . Здесь $\alpha_1 = \dots = \alpha_n = \alpha$.

Замечание 4. Лемма показывает, что функцию можно восстановить в спиральной звезде по значениям на оставе полидиска. Если бы можно было переставить местами предел и интеграл, то мы получили бы интегральное представление Коши для полидиска.

Доказательство леммы. Для внутренности полидиска U_r формула доказывается простым разложением в ряды подынтегральных функций с последующим их перемножением и почлененным интегрированием. Для точек, принадлежащих $(x_1, \dots, x_n; \alpha, \dots, \alpha)$ -звезды f , следует воспользоваться теоремой В из статьи [15] о суммировании матричными методами в спирально-когерентной области.

Рассмотрим интеграл в правой части формулы (8) и разложим подынтегральное выражение в степенные ряды:

$$\begin{aligned} \frac{1}{(2\pi i)^n} \int_{\Gamma_r} f(\zeta) T_{(x;\alpha,\rho)} \left(\frac{z}{\zeta} \right) \frac{d\zeta}{\zeta} = \\ = \frac{1}{(2\pi i)^n} \int_{U_r} \sum_{\|k\| \geq 0} a_{k_1 \dots k_n} \zeta_1^{k_1} \dots \\ \dots \zeta_n^{k_n} \sum_{\|k\| \geq 0} c_{k_1 \dots k_n}(\rho) \left(\frac{z_1}{\zeta_1} \right)^{k_1} \dots \left(\frac{z_n}{\zeta_n} \right)^{k_n} \frac{d\zeta}{\zeta}. \end{aligned}$$

В подынтегральном выражении первый ряд сходится абсолютно, а второй представляет целую функцию, поэтому их почленное произведение представляет степенной ряд, сходящийся равномерно и абсолютно по переменным ζ на оставе полидиска при произвольном $z \in \mathbf{C}^n$. Следовательно, ряд, полученный произведением указанных рядов, можно почленно проинтегрировать по оставу полидиска. Воспользуемся известной формулой

$$\frac{1}{(2\pi i)^n} \int_{\Gamma_r} \zeta_1^{k_1} \dots \zeta_n^{k_n} d\zeta = \begin{cases} 1, (k_1, \dots, k_n) = (-1, \dots, -1), \\ 0, (k_1, \dots, k_n) \neq (-1, \dots, -1). \end{cases} \quad (9)$$

Интегрируя, получим правую часть формулы (7):

$$T_\rho * f(z) = \sum_{\|k\| \geq 0} c_k(\rho) a_k z^k = \sum_{\|k\| \geq 0} c_{k_1 \dots k_n}(\rho) a_{k_1 \dots k_n} z_1^{k_1} \dots z_n^{k_n}.$$

В силу формулы (7) теоремы В

$$f(z) = \lim_{\rho \rightarrow \rho_0} T_\rho * f(z), \forall z \in G_f^{(x,\alpha)}.$$

Лемма доказана.

Доказательство теоремы 1. Следуя лемме, представим функцию $f(z)$ по формуле (8), здесь полидиск Γ_r компактно лежит внутри единичного полидиска. Поэтому подынтегральную функцию можно заменить по формуле (2) из теоремы А:

$$f(z_1, \dots, z_n) = \lim_{\rho \rightarrow \rho_0} \frac{1}{(2\pi i)^n} \times \\ \times \int_{\Gamma_r} \lim_{\lambda \rightarrow \infty} \frac{1}{2\lambda} \sum_{v=-\lambda}^{\lambda} \frac{f(b^{iv})}{(1-\zeta_1 b_1^{iv}) \dots (1-\zeta_n b_n^{iv})} T_{(x;\alpha,\rho)} \left(\frac{z}{\zeta} \right) \frac{d\zeta}{\zeta}.$$

Так как сумма при каждом v конечна, подынтегральное выражение непрерывно зависит от v , интеграл сходится равномерно и абсолютно, а также переменные интегрирования не зависят от предельного перехода при произвольном z из некоторого компакта, то можно знак предела и суммы вынести за знак интеграла:

$$f(z_1, \dots, z_n) = \lim_{\rho \rightarrow \rho_0} \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{2m} \sum_{v=-m}^m f(b^{iv}) \frac{1}{(2\pi i)^n} \times \\ \times \int_{\Gamma_r} \frac{1}{(1-\zeta_1 b_1^{iv}) \dots (1-\zeta_n b_n^{iv})} T_{(x;\alpha,\rho)} \left(\frac{z}{\zeta} \right) \frac{d\zeta}{\zeta}.$$

В подынтегральном выражении первый сомножитель можно разложить по степеням ζ , и полученный степенной ряд будет сходиться абсолютно и равномерно на оставе полидиска Γ_r . Второй сомножитель представляет целую функцию по переменным ζ на оставе этого полидиска при произвольном $z \in \mathbb{C}^n$. Пochленное произведение этих двух рядов представляется степенной ряд, сходящийся равномерно и абсолютно по переменным ζ на оставе полидиска при произвольном $z \in \mathbb{C}^n$. Однако следует заметить, что подынтегральное выражение будет равномерно ограничено лишь при $z \in G_f^{(x,\alpha)}$. Следовательно, ряд, полученный произведением указанных рядов, можно почленно проинтегрировать по оставу полидиска. Воспользуемся формулой (9). После интегрирования для $z \in U_r$ правая часть, очевидно, будет стремиться к $f(z)$. В силу теоремы В, для всех $z \in G_f^{(x,\alpha)}$ правая часть будет равномерно ограничена при произвольных ρ и λ . Опираясь на теорему Монтея (принцип компактности аналитических функций), получим

$$f(z_1, \dots, z_n) = \\ = \lim_{\rho \rightarrow \rho_0} \lim_{\lambda \rightarrow \infty} \frac{1}{2\lambda} \sum_{v=-\lambda}^{\lambda} f(b^{iv}) T_{(x;\alpha,\rho)}(z_1 b_1^{iv}, \dots, z_n b_n^{iv}); \\ z \in G_f^{(x,\alpha)}.$$

Теорема 1 доказана.

Заключение. С помощью формулы (3) из теоремы 1 можно восстанавливать голоморфную функцию внут-

ри спиральной звезды Миттаг-Леффлера, зная ее значения на счетном множестве единственности, расположенному на оставе единичного полидиска. Следствие 1 позволяет перейти к полидиску с произвольными радиусами.

Библиографические ссылки

1. Знаменский С. В. Связь аналитических функций многих переменных с рядами Дирихле одного переменного. Приложение к представлению нелинейных аналитических операторов // Докл. АН СССР. 1975. Т. 223, № 3. С. 544–547.
2. Знаменский С. В. Связь аналитических функций многих переменных, аналитических функционалов и операторов с рядами Дирихле одного переменного и некоторые ее приложения // О голоморфных функциях многих комплексных переменных / ИФ СО АН СССР. Красноярск, 1976. С. 46–59.
3. Biberbach L. Analytische Fortsetzung. Berlin : Springer-Verlag, 1955, 240 p.
4. Mittag-Leffler G. Sur la representation d'une branche uniforme d'une fonction monogene // Acta Math. 1905. No. 29. P. 101–182.
5. Le Roy E. Sur les series divergentes et les functions d'efines par un d'evelopement de Taylor // Ann. Fac. Sci. Univ. Toulouse, 1990. No. 2. P. 317–430.
6. Hardy G. H. Divergent series. Oxford : Clarendon Press, 1949, 503 p.
7. Кук Р. Бесконечные матрицы и пространства последовательностей. М. : Физматгиз, 1960. 474 с.
8. Рамис Ж.-П. Расходящиеся ряды и асимптотические теории. М. ; Ижевск : Ин-т. комп. исслед., 2002. 80 с.
9. Аракелян Н. У. Об эффективном аналитическом продолжении степенных рядов // Матем. сб. 1984. Т. 124, № 5. С. 24–44.
10. Мураев Э. Б. Эйлеровское и борелевское суммирования рядов, их обобщения и приложения : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Новосибирск, 1992. 364 с.
11. Downarovich M. Analytic continuation of series of homogeneous polynomials of n complex variables // Prace Mat. 1975. № 17. P. 23.
12. Arakelian N. H. Efficient harmonic continuation of the Laplace series // J. Contemp. Mathemat. Anal. 2012. Vol. 47, no. 3. P. 105–123.
13. Яковлев Е. И. Аналог теоремы Окада // Вестник КрасГУ. 2006. № 9. С. 111–113.
14. Яковлев Е. И. Об аналитическом продолжении кратного степенного ряда с помощью m -однородных полиномов матричным методом в обобщенную звезду Миттаг-Леффлера // Вестник СибГАУ. 2013. № 4(50). С. 87–92.
15. Яковлев Е. И. Об аналитическом продолжении кратного степенного ряда с помощью одномерных матричных методов суммирования // Вестник СибГАУ. 2014. № 3(55). С. 172–177.

References

1. Znamenskiy S. V. [The relationship of analytic functions of many variables with Dirichlet series of a single

- variable. Application to the representation of nonlinear analytic operators] *Dokl. AN SSSR*, 1975, Vol. 223, No. 3, P. 544–547 (In Russ.).
2. Znamenskiy S. V. [The relationship of analytic functions of several variables, analytic functionals, and operators with Dirichlet series of a single variable and some of its application]. *O golomorffnykh funktsiyakh mnogikh kompleksnykh peremennykh*. [About holomorphic functions of several complex variables]. 1976, Krasnoyarsk, IF SO AN SSSR Publ., P. 46–59.
3. Biberbach L. Analytische Fortsetzung, Springer-Verlag, Berlin, 1955, 240 p.
4. Mittag-Leffler G. Sur la representation d'une branche uniforme d'une fonction monogene, *Acta Math.*, 1905, No. 29, P. 101–182.
5. Le Roy E. Sur les series divergentes et les fonctions d'efines par un d'evelopement de Taylor, *Ann. Fac. Sci. Univ. Toulouse*. 1990, No. 2, P. 317–430.
6. Hardy G. H. Divergent series. Oxford, Oxford, Clarendon Press, 1949, 503 p.
7. Cooke R. G. Infinite matrices and sequence spaces. London, Macmillan, 1960, 473 p.
8. Ramis J.-P. *Raskhodyashchiyesya ryady i asimptoticheskiye teorii* [Divergent series and asymptotic theory]. Moscow, Izhevsk, Inst. comp. issl. Publ., 2002, 80 p.
9. Arakelyan N. U. [On efficient analytic continuation of power series]. *Matem. sb.*, 1984, Vol. 124, No. 5, P. 24–44 (In Russ.).
10. Muraev E. B. *Eylerovskoe i borelevskoe summrovaniya ryadov, ikh obobshcheniya i prilozheniya: Dis. dokt. fiz-mat. nauk*. [Euler and Borel summation of the series, their generalizations and applications. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Novosibirsk, 1992, 364 p.
11. Downarovich M. Analytic continuation of series of homogeneous polynomials of n complex variables. *Prace Mat.*, 1975, Z. 17, P. 23.
12. Arakelian N. H. Efficient harmonic continuation of the Laplace series. *J. Contemp. Mathemat. Anal.*, 2012, Vol. 47, No. 3, P. 105–123.
13. Yakovlev E. I. [The analogue of Okad's theorem]. *Vestnik KrasGU*. 2006, No. 9, P. 111–113 (In Russ.).
14. Yakovlev E. I. [About the analytic continuation of the multiple power series using m-homogeneous polynomial matrix method in the generalized star of Mittag-Leffler]. *Vestnik SibGAU*, 2013, No. 4(50), P. 87–92 (In Russ.).
15. Yakovlev E. I. [About analytical resuming multiple power series by using one dimensional matrix methods]. *Vestnik SibGAU*, 2014, No. 3(55), P. 172–177 (In Russ.).

РАЗДЕЛ
PART
2

АВИАЦИОННАЯ
И РАКЕТНО-
КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

AVIATION
AND SPACECRAFT
ENGINEERING

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ УНИФИЦИРОВАННЫЕ ПЛАТФОРМЫ МАЛОГО КЛАССА

И. И. Зимин*, М. В. Валов, А. В. Яковлев

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

Рассмотрены результаты разработки перспективных платформ малого класса, а также малые космические аппараты (МКА), создаваемые на их базе. Целью работы является создание серии унифицированных платформ, в полной мере отвечающих мировым тенденциям развития космической техники и современным техническим требованиям. Унифицированные платформы предназначены для дальнейшей установки и адаптации на них полезной нагрузки и обеспечения её всеми условиями для штатного функционирования и выполнения поставленных перед МКА задач. Проектирование МКА на базе перспективных унифицированных платформ, обладающих определённой степенью универсальности, в состав которых входит неизменная базовая конструкция и отработанная аппаратура бортовых обеспечивающих систем, ведёт к сокращению времени разработки и снижению стоимости изготовления и запуска МКА.

Серия базовых унифицированных платформ разрабатывается АО «ИСС» совместно с ООО «НПЦ «МКА» и включает в себя три унифицированные платформы: НТ-50, НТ-100 и НТ-400. Каждая из платформ семейства НТ отличается высокими техническими характеристиками и новыми конструктивно-компоновочными решениями. Серия перспективных негерметичных платформ предназначена для создания на их базе новейших МКА различного целевого назначения, таких как МКА связи, ДЗЗ, научно-экспериментальные и технологические МКА. Бортовые системы платформ построены на приборах и оборудовании, произведенных в Российской Федерации. МКА на базе платформ семейства НТ смогут выводиться на низкую круговую орбиту функционирования как одиночным запуском (в том числе и попутным), так и групповым запуском в составе блока из нескольких МКА.

Ключевые слова: малый космический аппарат, МКА, космическая платформа, платформа.

Vestnik SibGAU
Vol. 17, No. 1, P. 118–124

ADVANCED UNIFIED MICRO SERIES PLATFORMS

I. I. Zimin*, M. V. Valov, A. V. Yakovlev

JSC “Information satellite systems” named after academician M. F. Reshetnev”
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
*E-mail: i.zimin@iss-reshetnev.ru

The paper presents the results of designing the advanced micro series space platforms and the small satellites created on their basis. The objective of this scientific work is creation of the series unified space platforms, which will fully comply with the world trends of space technology progress and the current technical requirements. The unified platforms are intended to subsequent payload mounting and adaptation on them and providing all conditions for the payload required for operation and performance of the small satellite objectives. The small satellites designing based on advanced unified platforms featuring the certain versatility, which includes the permanent-type basic design and the proven equipment of on-board subsystems, results in reducing development time and cost of manufacturing and launch of the small satellite.

Series of basic unified space platforms is developed in JSC “Information satellite systems” named after academician M. F. Reshetnev” in common with R&P Small Satellites Center LLC and includes three unified platforms – NT-50, NT-100 and NT-400. Each platform from NT series features the high technical performances and the new engineering solutions. Series of advanced unpressurized space platforms is intended to creation of the new small satellites for different purposes on their basis, such as communication small satellites, the Earth remote sensing small satellites, research and development and technological small satellites. Space platform on-board subsystems are based on devices and equipment manufactured in the Russian Federation. The small satellites based on platforms from NT series could be launched into low circular operational orbit by single launch (including concurrent launch), as well as by tandem launch as part of several small satellites unit.

Keywords: small satellite, spacecraft, space platform.

Введение. В настоящее время космические технологии находят все более широкое применение во всех областях человеческой деятельности. Растущие потребности в использовании космической техники в различных сферах требуют создания все более совершенных космических аппаратов (КА), способных решать всевозможные задачи.

Особенно актуальным в последнее время стало создание малых космических аппаратов (МКА), это связано с рядом преимуществ МКА перед большими КА.

С точки зрения разработки, создания и запуска спутника малая масса обеспечивает ряд преимуществ экономического характера.

Одним из этих преимуществ является рентабельный запуск. Вывод спутника на орбиту требует значительной части средств от общей стоимости проекта. Цена рассчитывается, исходя из высоты орбиты, веса спутника, стоимости ракеты-носителя (этот параметр зависит не только от класса – тяжелые, средние и легкие РН, но и от страны-изготовителя).

Вывод аппаратов малой массы осуществляется на низкие орбиты с помощью более дешевых средств легкого или среднего класса, в том числе российских конверсионных ракет, предназначенных для утилизации путем запуска с полезной нагрузкой. Кроме того, часто малые спутники запускаются не поодиночке, а целой группой в составе блока из нескольких МКА, что удешевляет себестоимость запуска одного аппарата. Также возможен «попутный запуск» в качестве сопутствующей нагрузки к большому спутнику.

Еще одним преимуществом МКА перед большими КА являются сжатые сроки создания (1–3 года вместо 5–10 лет). Сокращение производственного цикла связано с узкой специализацией спутника, использованием серийных компонентов, унифицированных платформ, традиционных конструкторских и технологических требований к разработке, созданию, запуску и эксплуатации. Сжатые сроки создания способствуют скорейшему возврату инвестиций.

Еще одним плюсом МКА является ценовая привлекательность. Процесс создания малого спутника, предназначенного для решения серьезных прикладных задач, таких как ДЗЗ, нельзя назвать дешевым, в данном случае в названии концепции уместно заменить термин «дешевый» на «недорогой». Тем не менее, цена аналогичного большого спутника оказывается в разы больше.

В настоящее время тренд развития больших спутников идет по пути реализации максимальных характеристик по основным потребительским параметрам одновременно. Для малых КА разработчики не стремятся реализовать предельные характеристики сразу по всем направлениям, а сосредоточиваются на одном или нескольких из этих параметров, реализуя коммерчески привлекательный для потребителей МКА [1; 2].

Для создания современных малых космических аппаратов различного целевого назначения в достаточно сжатые сроки целесообразно использовать унифицированные космические платформы (УКП).

Проектирование спутника с использованием УКП, обладающей определённой степенью универсальности, в состав которой входит неизменная базовая кон-

струкция и отработанная аппаратура бортовых обеспечивающих систем, ведет к сокращению времени разработки и снижению стоимости изготовления и запуска МКА.

УКП предназначена для дальнейшей установки и адаптации на ней полезной нагрузки (ПН) и обеспечения её всеми условиями для штатного функционирования и выполнения поставленных перед МКА задач [3–9].

Семейство перспективных космических платформ негерметичного конструктивного исполнения обеспечит создание на их базе малых космических аппаратов различного целевого назначения со стартовой массой от 40 кг (на базе платформы НТ-50) до 400 кг (на базе платформы НТ-400). Бортовые системы платформ построены на приборах и оборудовании, произведенных в Российской Федерации.

Семейство платформ НТ разрабатывается АО «ИСС» в кооперации с ООО «НПЦ «МКА – СибГАУ» и включает в себя три вида космических платформ – НТ-50, НТ-100 и НТ-400.

Каждая из вышеперечисленных платформ подходит для создания на ее базе МКА различного целевого назначения. Далее рассмотрим подробно каждую платформу из семейства НТ, а также перспективные МКА на их базе.

Космическая платформа НТ-50. Унифицированная космическая платформа негерметичного конструктивного исполнения НТ-50 служит для создания на ее базе МКА со стартовой массой от 40 до 80 кг. Данная платформа подходит для создания МКА научно-экспериментального и технологического назначения. Платформа имеет в своем составе грубую трехосную систему ориентации и стабилизации (СОС) на базе магнитометра и трех электромагнитных устройств, способную обеспечивать точность ориентации по каждой из осей $\pm 10^\circ$. Использование такого построения СОС значительно уменьшает стоимость платформы. Космическая платформа НТ-50 подходит для проведения научных экспериментов, отработки новейшей аппаратуры, квалификации перспективных приборов, а также для образовательных целей [10–12].

Кроме того, простота построения, малый вес и сжатые сроки создания платформы делают ее привлекательной для небольших частных организаций и образовательных учреждений.

Основные технические характеристики платформы НТ-50 показаны в табл. 1.

В настоящее время на базе платформы НТ-50 создается малый космический аппарат. В задачи МКА будет входить проведение ряда экспериментов, обеспечение летной квалификации платформы и отработка перспективных приборов. Запуск МКА запланирован в 2017 г.

Внешний вид платформы НТ-50 показан на рис. 1.

Космическая платформа НТ-100. Космическая платформа НТ-100 предназначена для создания на ее базе МКА массой от 130 до 220 кг. В данной платформе применена активная трехосная система ориентации и стабилизации, основной контур которой построен на базе звездных датчиков и управляющих

двигателей-маховиков. Такое техническое решение позволяет использовать космические аппараты на базе платформы НТ-100 для решения задач высокоточной съёмки поверхности Земли в различных

оптических и радиодиапазонах, а также производить, в случае необходимости, перенацеливание спутника для съёмки объектов, не охватываемых подспутниковой полосой обзора [13–14].

Таблица 1

Основные технические характеристики платформы НТ-50

Характеристика	Значение
Масса платформы, кг	30
Масса, выделяемая для полезной нагрузки, кг	До 50
Пиковая мощность, Вт	90
Средневитковая мощность, Вт	30
Конструктивное исполнение	Негерметичное
Система ориентации и стабилизации: тип ориентации точность ориентации по трем осям, град	Трехосная активная ± 10
Система электропитания: напряжение питания бортовой аппаратуры, В	$27,0 \pm 0,5$
Бортовые радиолинии: КИС, кбит/с СРЛ (S-band), кбит/с	2,5 2×32
СAC КА на базе платформы, лет	1–3
Средства выводения	Выведение на любом типе РН, в том числе и попутной нагрузкой

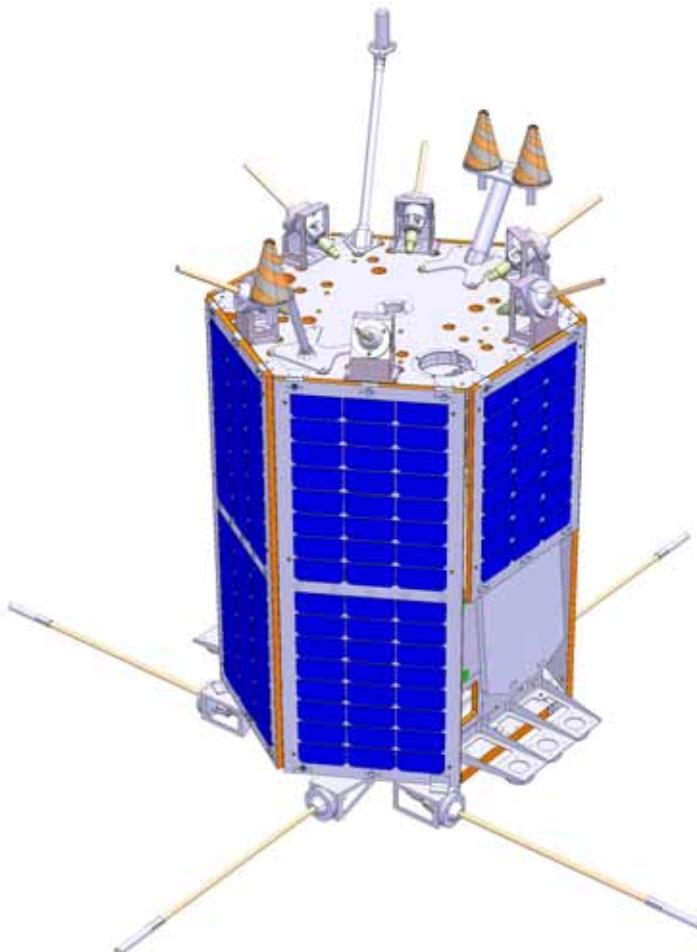


Рис. 1. Космическая платформа НТ-50

В состав платформы входит СТР на базе тепловых труб и электрообогревателей, которая предназначена для поддержания в требуемых диапазонах температуры расположенных в приборных отсеках блоков служебной и целевой бортовой аппаратуры, а также для обеспечения теплового режима ряда приборов, устройств и элементов конструкции, расположенных вне приборных отсеков, на всех этапах функционирования.

В состав системы электропитания (СЭП) входят арсенид-галиевые фотопреобразователи, литий-ионная аккумуляторная батарея (АБ) и автоматика СЭП. Система электропитания обеспечивает непре-

рывное питание бортовой аппаратуры МКА на базе платформы постоянным током на всех этапах функционирования.

Также платформа имеет в своем составе систему коррекции на базе термокatalитической двигательной установки, что позволяет обеспечить САС аппаратов на базе платформы не менее 5 лет на низкой круговой орбите высотой 450 км.

Основные технические характеристики платформы показаны в табл. 2.

Внешний вид платформы НТ-100 в стартовом и рабочем положении показан на рис. 2.

Таблица 2

Основные технические характеристики платформы НТ-100

Характеристика	Значение
Масса платформы, кг	120
Масса, выделяемая для полезной нагрузки, кг	100
Пиковая мощность, выделяемая для полезной нагрузки, Вт	120
Конструктивное исполнение	Негерметичное
Система ориентации и стабилизации:	
тип ориентации	Трехосная активная
точность ориентации, град:	
– крен	$\pm 0,08$
– тангаж	$\pm 0,08$
– рыскание	$\pm 0,08$
точность стабилизации с погрешностью по каждой из осей, град/с	0,0004
Система электропитания:	
напряжение питания бортовой аппаратуры, В	$27 \pm 0,5$
Система коррекции	
тип ДУ	Термокаталитическая
тип топлива	Гидразин
масса топлива	8 кг
Бортовые радиолинии:	
командная	10 Мбит/с
целевая	2×120 Мбит/с
САС КА на базе платформы, лет	5
Средства выводения	РКН «Старт-1», РН «Союз-2 1В», РН «Ангара-1.2»

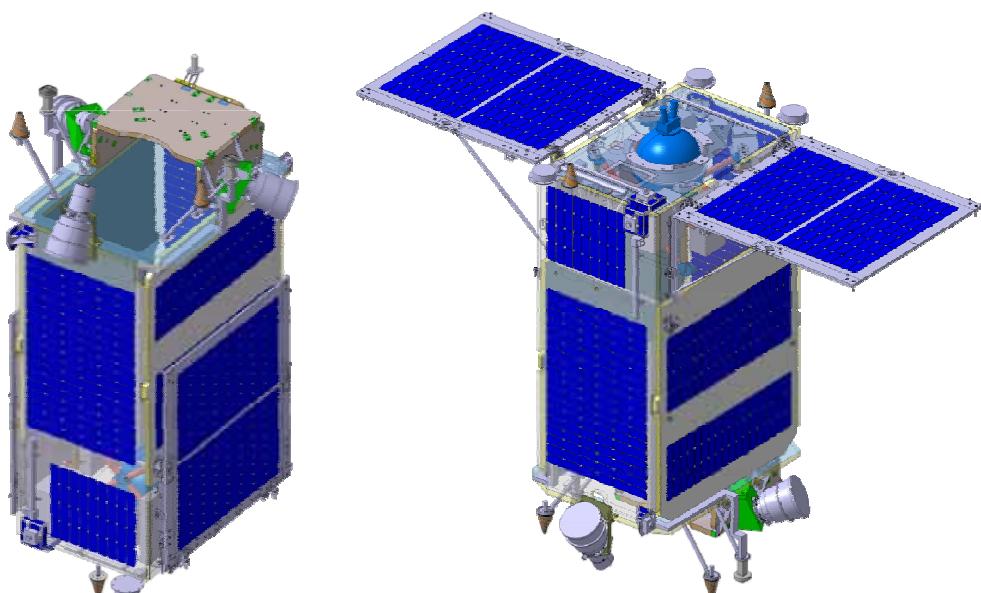


Рис. 2. Космическая платформа НТ-100 в стартовом и рабочем положении

Космическая платформа НТ-400. Унифицированная космическая платформа НТ-400 создается с целью построения на ее базе малых космических аппаратов массой до 400 кг, способных решать широкий спектр задач:

- обеспечение различных видов связи;
- наблюдение поверхности Земли, сбор данных о космическом пространстве;
- проведение научных и экспериментальных работ;
- выполнение всевозможных задач в интересах Министерства обороны.

В основу разработки платформы положен принцип максимальной преемственности с более ранними разработками платформ АО «ИСС» в части использования приборов и конструктивных решений.

Бортовые системы платформы НТ-400 построены на приборах и оборудовании, произведенных в Российской Федерации. Платформа обеспечивает создание космических аппаратов со стартовой массой до 400 кг, при этом масса полезной нагрузки составляет не менее 50 % от общей массы спутника, что полностью соответствует мировым аналогам.

В платформе применена активная трехосная система ориентации и стабилизации, основной контур которой построен на базе звездных датчиков и управляющих двигателей-маховиков. Такое техническое решение позволяет использовать космические аппараты на базе платформы НТ-400 для решения задач высокоточной съемки поверхности Земли, а также производить, в случае необходимости, перенацеливание спутника для съемки объектов, не охватываемых подспутниковой полосой обзора.

Крылья солнечных батарей имеют возможность изменять угол относительно корпуса платформы, что

позволяет использовать платформу для создания КА, работающих на низких круговых орбитах с любым наклонением.

Также платформа имеет в своем составе систему коррекции на базе термокаталитической двигательной установки, что позволяет обеспечить САС аппаратов на базе платформы не менее 5 лет.

Для обеспечения оперативности доставки информации на наземные комплексы приема платформа НТ-400 имеет в своем составе межспутниковую линию связи с КА-ретранслятором типа «Луч».

Основные технические характеристики платформы показаны в табл. 3 [15].

Платформа обеспечивает возможность одиночного и группового выведения МКА на низкие орбиты на различных типах РН легкого, среднего и тяжелого классов.

Космическая платформа НТ-400 позволит в максимально сжатые сроки при относительно небольшой стоимости создавать МКА различного целевого назначения:

- МКА связи;
- МКА в интересах Министерства обороны;
- МКА ДЗЗ в интересах различных заказчиков (таких как министерства и ведомства РФ, исполнительные органы власти в регионах РФ, управляющие структуры и субъекты экономической деятельности, региональные центры космических услуг и информационно-аналитические центры, предприятия горнодобывающей промышленности, сельского, лесного и рыбных хозяйств и т. д.).

Внешний вид платформы НТ-400 в рабочем положении показан на рис. 3.

Таблица 3

Основные технические характеристики платформы НТ-400

Характеристика	Значение
Масса платформы, кг	170
Масса, выделяемая для полезной нагрузки, кг	До 230
Пиковая мощность, выделяемая для полезной нагрузки, Вт	До 385
Собственное средневитковое энергопотребление АБ платформы, Вт	150
Конструктивное исполнение	Негерметичное
Система ориентации и стабилизации: тип ориентации точность ориентации по трем осям, град точность стабилизации, град/с: – по тангажу и крену – по развороту скорость перенацеливания платформы, град/с	Трехосная активная 0,05 0,0005 Не более 0,01 2
Система электропитания: напряжение питания бортовой аппаратуры, В	27,0 ± 0,5
Система коррекции: тип ДУ тип топлива масса топлива, кг	Термокаталитическая Гидразин 8
Бортовые радиолинии: КИС (S-band) СРЛ (X-band) МКА – КА Р (KA-band)	32 кбит/с 2×150 Мбит/с 300 Мбит/с
САС КА на базе платформы, лет	5



Рис. 3. Космическая платформа НТ-400 в рабочем положении

Заключение. Унифицированные космические платформы серии НТ могут быть использованы для создания малых космических аппаратов стартовой массой от 40 до 400 кг в обеспечение решения всевозможных целевых задач, таких как задачи связи, ДЗЗ, научно-экспериментальные и исследовательские. Использование перспективных платформ серии НТ в качестве унифицированной космической платформы сможет сократить время создания МКА и существенно снизить его стоимость. Кроме того, бортовые системы платформ серии НТ построены на приборах и оборудовании, произведенных в Российской Федерации, что является важным фактором в современной геополитической ситуации.

Библиографические ссылки

1. Звездин И. А. Малые космические аппараты: перспективы рынка [Электронный ресурс]. URL: http://www.telenir.net/transport_i_aviacija/vzlyot_2005_01/p75.php. (дата обращения: 28.10.2013)
2. Dan Ward. Faster, Better, Cheaper Revisited: Program Management Lessons from NASA // Defense AT&L. 2010. Р. 48–52.
3. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с.
4. Чеботарев В. Е. Проектирование космических аппаратов систем информационного обеспечения. В 2 кн. Кн. 2. Внутреннее проектирование космического аппарата / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2005. 168 с.
5. Чеботарев В. Е. Проектирование космических аппаратов систем информационного обеспечения : учеб. пособие. В 2 кн. Кн. 1. Внешнее проектирование космического аппарата / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2004. 132 с.
6. Гущин В. Н. Основы устройств космических аппаратов : учебник для вузов М. : Машиностроение, 2003. 272 с.
7. Туманов А. В., Зеленцов В. В., Щеглов Г. А. Основы компоновки бортового оборудования космических аппаратов : учеб. пособие. М. : Изд-во Моск. гос. техн. ун-та им. Н. Э. Баумана, 2010. 344 с.
8. Технология производства космических аппаратов : учебник / Н. А. Тестоедов [и др.] ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2009. 352 с.
9. Алексеев К. Б. Управление космическими летательными аппаратами. М. : Машиностроение, 1974. 343 с.
10. Малый космический аппарат «Михаил Решетнев». Результаты работы / И. И. Зимин [и др.] [Электронный ресурс] // Труды МАИ. 2013. № 65. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35908>. (дата обращения: 19.01.2016).
11. Малый космический аппарат «Михаил Решетнев». Результаты работы / И. И. Зимин [и др.] // Авиация и космонавтика – 2012. : 11-я Междунар. конф. (13–15 нояб. 2012, г. Москва). СПб. : Мастерская печати, 2012. С. 97.

12. Зимин И. И., Валов М. В., Яковлев А. В. Перспективная универсальная платформа микрокласса // Инновационный арсенал молодежи : труды пятой науч.-техн. конф. / ФГУП «КБ «Арсенал» ; Балт. гос. техн. ун-т. СПб, 2014. С. 115–117.
13. Перспективная унифицированная платформа НТ-100-01 / И. И. Зимин [и др.] // Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли : тезисы докладов III Междунар. науч.-техн. конф. М. : ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2015. С. 15–17.
14. Зимин И. И., Валов М. В. Разработка малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли [Электронный ресурс] // Труды МАИ. 2015. № 81. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=57807> (дата обращения: 19.01.2016).
15. Зимин И. И., Валов М. В., Яковлев А. В. КА ДЗ3 на базе универсальной платформы НТ-400 // Актуальные вопросы проектирования автоматических космических аппаратов для фундаментальных и прикладных научных исследований / сост. В. В. Ефанов. Химки : ФГУП «НПО имени С. А. Лавочкина», 2015. С. 86–89.

References

1. Zvezdin I. A. *Malye kosmicheskie apparaty: perspektivi rynka* [Small spacecraft: market prospects]. (In Russ.) Available at:http://www.telenir.net/transport_i_aviacija/vzlyot_2005_01/p75.php. (accessed 28.10.2013).
2. Dan Ward. Faster, Better, Cheaper Revisited. Program Management Lessons from NASA. *Defense AT&L*, 2010 (March-April). P. 48–52.
3. Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* [Fundamentals of designing information support spacecrafsts]. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2011, 488 p.
4. Chebotarev V. E. *Proektirovanie kosmicheskikh apparatov sistem informatsionnogo obespecheniya. Kn. 2: Vnutrennee proektirovanie kosmicheskogo apparata* [Designing spacecraft information support systems. Vol. 2: The internal design of the spacecraft]. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2005, 168 p.
5. Chebotarev V. E. *Proektirovanie kosmicheskikh apparatov sistem informatsionnogo obespecheniya. Kn. 1: Vneshnee proektirovanie kosmicheskogo apparata* [Designing spacecraft information support systems: Vol. 1: The external design of the spacecraft]. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2004, 132 p.
6. Gushchin V. N. *Osnovy ustroystv kosmicheskikh apparatov* [Spacecrafts design fundamentals], Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003, 272 p.
7. Tumanov A. V., Zelentsov V. V., Shcheglov G. A. *Osnovy komponovki bortovogo oborudovaniya kosmicheskikh apparatov* [Fundamentals of spacecraft on-board equipment lay-out], Moscow, Izd-vo Mosk. gos. tekhn. un-ta im. N. E. Baumana Publ., 2010, 344 p.
8. Testoedov N. A., Mikhnev M. M., Mikheev A. E. *Tekhnologiya proizvodstva kosmicheskikh apparatov* [Spacecraft manufacturing technology], Krasnoyarsk, Sib. gos. aerokosmich. un-t Publ., 2009, 352 p.
9. Alekseev K. B. *Upravlenie kosmicheskimi letatel'nymi apparatami* [Control of space aircraft]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974, 343 p.
10. Zimin I. I., Valov M. V., Yakovlev A. V., Galochkin S. A. [Small satellite “Mikhail Reshetnev. Results of operations]. *Trudy MAI*, 2013, No. 65 (In Russ.). Available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35908> (accessed 19.01.2016)
11. Zimin I. I., Valov M. V., Yakovlev A. V., Galochkin S. A. [Small satellite “Mikhail Reshetnev. Results of operations]. *11-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya “Aviatsiya i kosmonavtika – 2012”*. *Tezisy dokladov*. [11th International Conference “Aviation and Cosmonautics – 2012” (13–15 November 2012, Moscow). Abstracts]. SPb., Masterskaya pechatи Publ., 2012, P. 97 (In Russ.).
12. Zimin I. I., Valov M. V., Yakovlev A. V. [Perspective unified micro class platform] *Innovatsionnyy arsenal molodezhi: trudy pyatoy nauch.-tekhn. konf.* [Innovative arsenal of youth: proceedings of the fifth scientific and engineering. Conf.]. SPb. FGUP "KB "Arsenal", Balt. gos. tekhn. un-t Publ., 2014, P. 115–117 (In Russ.).
13. Zimin I. I., Valov M. V., Yakovlev A. V., Popov V. V. [Perspective unified platform “NT-100-01”]. *Tezisy dokladov Tret'ey mezhdunarodnoy Nauchno-tehnicheskoy konferentsii “Aktual'nye problemy sozdaniya kosmicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya Zemli”*. [Scientific conference abstracts of the Third International Scientific-Technical Conference “Actual problems of development of space systems for remote sensing of the Earth”]. Moscow, 2015, P. 15–17 (In Russ.).
14. Zimin I. I., Valov M. V. [Designing the small satellite for the Earth observation]. *Trudy MAI*, 2015, No. 81 (In Russ.). Available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=57807> (accessed 19.01.2016).
15. Zimin I. I., Valov M. V., Yakovlev A. V. [Spacecraft for the Earth observation based on the space platform NT-400]. *Aktual'nye voprosy proektirovaniya avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov dlya fundamental'nykh i prikladnykh nauchnykh issledovaniy*. [Topical issues of designing unmanned spacecraft for fundamental and applied research / compiled by V. V. Efanov. Khimki. FSUE "NPO named after S. A. Lavochkin]. Khimki, 2015, P. 86–89 (In Russ.).

РАЗРАБОТКА БОРТОВОГО УСТРОЙСТВА СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

А. В. Кацура, А. Р. Акзигитов*, А. С. Андронов, Д. Е. Строков, Р. А. Акзигитов

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: aakzigitov88@mail.ru

Развитие межмашинного взаимодействия по всему миру не могло не затронуть авиационную отрасль. Оно основано на обмене данными между машинами без участия человека. Это значительно упрощает процесс мониторинга объектов. Применение беспроводных видов связи позволяет осуществлять контроль удаленных объектов, включая подвижные. Одним из таких видов связи является GSM-связь. Благодаря относительно широкому покрытию связь GSM используется для передачи данных местоположения и датчиков подвижного объекта. Однако территория Российской Федерации имеет неполный охват GSM-связью. Для мониторинга воздушных судов в таких районах необходимо задействовать спутниковую связь. Предложено использовать спутниковую группировку компании Iridium для обеспечения доступа к связи в труднодоступных районах полетов воздушных судов. Ключевая особенность спутников Iridium, а именно полный охват земной поверхности, стала определяющей при выборе резервного способа связи.

Модуль передачи данных Iridium 9602 соответствует поставленным авторами работы требованиям к устройству. Передача пакета данных по 340 байт позволяет снизить затраты на спутниковую связь. С точки зрения экономических показателей оптимальным решением стало резервирование блоком Iridium GSM-связи. В первую очередь, это связано со стоимостью услуг по предоставлению связи. Таким образом, при недоступном канале GSM будет задействован канал Iridium. Основными элементами экспериментального устройства являются микроконтроллер, спутниковый модем Iridium 9602, модуль GSM, модуль GPS/ГЛОНАСС MGGS2217, высокочастотные приемная и передающие антенны. Размещение устройства мониторинга на борту воздушного судна позволит с точно установленным интервалом получать данные местоположения и скорости. Анализ рынка аналогичных устройств показал, что основной и единственный канал связи в таких блоках – связь GSM. Блоки, оснащенные модулями спутниковой связи, передают данные через спутники Intmarsat, связь с которыми затруднительна в приполярных районах.

Ключевые слова: Iridium, устройство мониторинга, GPS, ГЛОНАСС, GSM.

Vestnik SibGAU
Vol. 17, No. 1, P. 125–130

DEVELOPMENT OF ONBOARD DEVICE FOR SATELLITE MONITORING OF AIRCRAFT

А. В. Кацура, А. Р. Акзигитов*, А. С. Андронов, Д. Е. Строков, Р. А. Акзигитов

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk 660037, Russian Federation
*E-mail: aakzigitov88@mail.ru

The development of “Machine-to-machine” interaction couldn’t but affect aviation sphere worldwide. It is based on the data exchange between machines without participation of a person. It considerably simplifies the process of monitoring of objects. Application of wireless types of communication allows to provide control of remote objects, including the mobile. One of such types of communication is GSM communication. Thanks to rather wide covering, communication of GSM is used for the data transmission of location and sensors of mobile object. However the territory of the Russian Federation has incomplete coverage by GSM communication. For monitoring of aircrafts it is necessary to involve satellite communication in such areas. It is offered to use satellite group of the Iridium company for ensuring access to communication in remote areas of flights of aircrafts. The key feature of Iridium satellites, full coverage of a terrestrial surface, became the communication defining at a choice of a reserve way.

The module of data transmission Iridium 9602 conforms to the requirements put by the authors of work to the device. Transfer of a package of data on 340 bytes allows to lower costs of satellite communication. From the point of view of economic indicators, reservation by the communication Iridium of GSM became the optimum decision. First

of all, it is connected with the cost of services in providing communication. Thus, at the inaccessible GSM channel the Iridium channel will be involved. Basic elements of the experimental device are: the microcontroller, the satellite Iridium 9602 modem, the GSM module, the GPS/GLONASS MGGS2217 module, a high-frequency reception and the transferring antennas. Placement of the device of monitoring onboard the aircraft will allow to receive these locations and speeds with precisely established interval. The analysis of the market of similar devices showed that the main and only communication channel in such blocks – communication of GSM. The devices equipped with modules of satellite communication transmit data through Inmarsat satellites communication with which is difficult in subpolar areas.

Keywords: Iridium, monitoring device, GPS, GLONASS, GSM.

Введение. Спутниковый мониторинг подвижных объектов всё чаще находит свое применение у транспортных компаний. Он основан на активно развивающемся способе обмена информацией между объектами – машинном взаимодействии Machine-to-machine (M2M). Данный способ применяется для любых объектов, снабжённых устройствами, с которых необходимо получать оперативную информацию. К таким устройствам относятся датчики температуры отдалённых объектов, сейсмодатчики, счетчики банкоматов и т. д. По состоянию на 2010 г., в мире использовались миллиарды устройств, способных вести обмен данными между собой [1]. Для мобильных и отдаленных объектов мониторинга применяется беспроводной способ обмена данными. Такой способ, как правило, подразумевает использование GSM-связи для передачи данных на пункт мониторинга. Реже применяется радиосвязь и сети Wi-Fi. Главным преимуществом использования GSM-связи перед последними является широкое покрытие и предоставление операторами сотовой связи специальных условий для пользователей [2]. Через канал GSM на частотных диапазонах 850/900/1800/1900 МГц возможно передавать данные о местоположении устройства мониторинга, размещенного на подвижном объекте. Местоположение устройства определяется по сигналам спутников GPS и ГЛОНАСС. Координаты объекта привязаны к показаниям датчиков. Таким образом, нескольким точкам на карте, определяющим местоположение подвижного объекта, соответствуют различные показания датчиков. Передачу данных по каналу GSM осуществляют GSM-модули, имеющие широкое применение в современных M2M-системах [3]. Типовой GSM-модуль содержит порты ввода/вывода, интерфейс SIM-карты, выход питания, антенну, вход аналогово-цифрового преобразователя, отладочный интерфейс. Однако для осуществления полноценного мониторинга воздушных судов одного лишь GSM-канала недостаточно из-за ограниченного покрытия. Особенно актуальной эта проблема становится для восточных регионов Российской Федерации, включая приполярные зоны [4]. Наиболее известные компании спутниковой связи Iridium и Inmarsat предоставляют свои услуги для систем M2M [5; 6]. Отличие заключается в расположении спутниковых группировок. Система Iridium имеет 66 низкоорбитальных спутников и 6 дополнительных. Передача данных осуществляется через межспутниковые связи и не требует промежуточных станций, а охват земной поверхности составляет 100 % [7; 8]. Inmarsat имеет 11 геостационарных спутников, связь с которыми становится недоступной на широтах $\pm 85^\circ$ [9]. Спутниковая система Iridium

отвечает поставленным при разработке устройства требованиям, а именно, максимально возможный охват земной поверхности для замещения системы GSM в случае отсутствия её сигнала.

Трансивер Iridium 9602. Трансивер Iridium 9602 представляет собой блок с разъёмами для антенн GPS и Iridium. Передача данных на модуль осуществляется на порт RS-232 в составе 20-контактного разъёма. Отдельно трансивер предназначен для приема пакетов данных с контроллера для передачи через спутниковый канал Iridium. Конфигурация оборудования, включающая питание, микроконтроллер для управления, антенну, определяется разработчиком устройств на базе модуля; 20-контактный разъём содержит выводы электроснабжения постоянным током, управление питанием, интерфейс данных, доступ сети, индикацию питания [10]. Особенностями модуля являются:

- малые габаритные размеры;
- единый алюминиевый корпус;
- отсутствие SIM-карты;
- максимальный размер данных для отправки – 340 байт;
- максимальный размер данных для получения – 270 байт.

Специальный протокол собирает данные о нескольких точках местоположения, которые при достижении объема в 340 байт отправляются по каналу Iridium. Это объясняется достаточно высокой стоимостью спутникового трафика [11], которая не позволяет использовать протоколы сжатия, аналогичные GSM, и отправлять данные с высокой периодичностью. Целесообразно с экономической точки зрения использовать канал Iridium для передачи данных местоположения только при нахождении устройства вне зоны покрытия сети GSM.

На рис. 1 изображена схема передачи SBD (Short Burst Data) трафика по каналу Iridium [12]. Один пакет содержит информацию о показаниях датчиков, привязанных к нескольким координатам. При достижении размера пакета 340 байт осуществляется его отправка на наземный комплекс управления (НКУ). Таким образом, при получении сервером данных со спутников они распаковываются, и на НКУ передается информация сразу о нескольких точках на карте. Такой метод передачи данных позволяет существенно снизить затраты на отправку данных.

Приемный модуль MGGS2217. Модуль MGGS2217 представляет собой плату с односторонним монтажом закрытого исполнения с 28 контактными площадками [13]. Модуль ведет параллельный прием и обработку

сигналов с координатами и скоростью от спутников GPS и ГЛОНАСС на частотах 1575–1610 МГц. Передача информации со спутников на микроконтроллер по умолчанию производится с частотой 1 Гц. Совместное использование сигналов GPS/ГЛОНАСС увеличивает точность определения местоположения объекта мониторинга [14–16]. Прием данных со спутника может обеспечиваться через пассивную и активную антенные, подключаемые к высокочастотному разъему. Ключевые особенности модуля:

- смена режима работы через персональный компьютер;
 - 80 каналов в режиме поиска и 20 – в режиме слежения;
 - время определения местоположения при ходном старте – 25 с;
 - наличие UART-интерфейса.

Устройство мониторинга. Взятая за основу конфигурация устройства мониторинга включает в себя антенну ГЛОНАСС/GPS, управляющий микроконтроллер и модуль GSM. Данные о местоположении вместе с показаниями датчиков передаются на НКУ. В работе [17] для мониторинга беспилотного летательного аппарата (БПЛА) авторами предлагалось использовать Iridium 9602 как основной модуль для передачи координат и высотно-скоростных параметров БПЛА. Однако стоимость отправки пакетов данных через одну только спутниковую связь может поставить под вопрос экономическую целесообразность подобного мониторинга [11] при большой продолжительности полётов. Для гражданской авиации или государственной авиации, в частности авиации МЧС, необходимо спутниковый канал использовать в качестве резервного. На рис. 2 изображена структурная схема устройства с трансивером Iridium 9602.

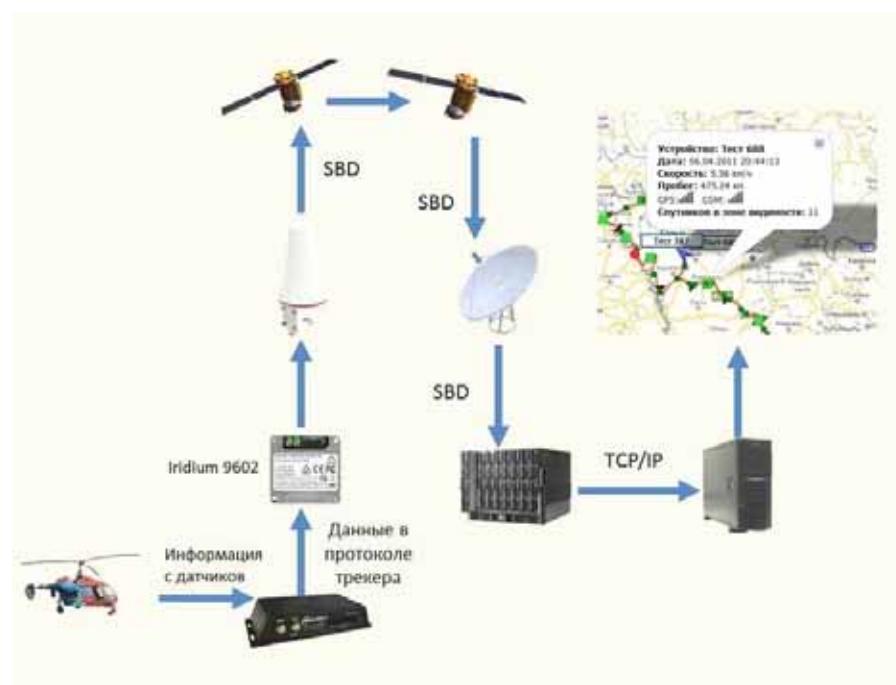


Рис. 1. Схема передачи данных по каналу Iridium [13]

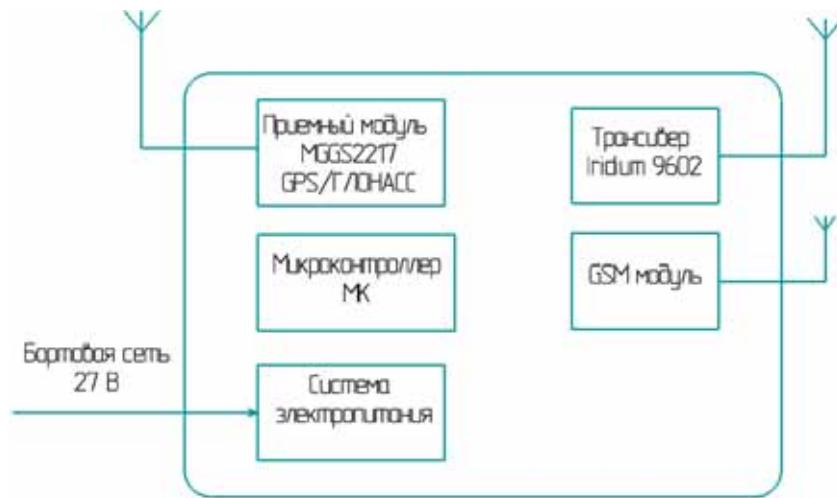


Рис. 2. Структурная схема устройства мониторинга ВС



Рис. 3. Внешний вид платы устройства мониторинга

Для передачи данных о высоте, скорости и координатах ВС МК формирует пакеты данных, полученных с приемного модуля MGGS 2217. Каждые 5 минут МК опрашивает трансивер Iridium и модуль GSM. В случае отсутствия GSM-сигнала МК формирует пакет данных размером 340 байт и отправляет его на трансивер, который, в свою очередь, передаёт их на спутник. Использование второго канала также повышает надежность устройства [18]. Питание устройства обеспечивается бортовой сетью постоянного тока напряжением 27 В. На рис 3 изображена плата экспериментального варианта устройства, собранная на базе устройства мониторинга наземного транспорта МЧС УТП-М-01-8.004 [19] с дополнительным установленным авторами модулем Iridium 9602. Плата размещается в закрытом корпусе. К двум высокочастотным разъемам подключаются антенные фидеры GPS/ГЛОНАСС и Iridium. Данная модель собрана авторами исключительно в экспериментальных целях на базе МЧС и не подлежит серийному производству.

Заключение. Совершенствование мониторинга воздушных судов стало неизбежным без применения спутниковых систем связи. Очевидно, что радиус действия наземных станций связи ограничен, и нет возможности по технико-экономическим причинам разместить их на всей поверхности Земли [20]. Экспериментальная модель блока объединяет в себе использование наземных станций GSM как основных для мониторинга и в качестве резервного канала – спутниковой связи Iridium. Взятое за основу готовое устройство УТП-М-01-8.004 имело только GSM-канал для передачи координат. По результатам проведенного эксперимента, при котором устройство размещалось на борту вертолета МИ-8 МЧС, было выявлено, что при полетах на крейсерской скорости обеспечивается возможность передачи координат местоположения на диспетчерский пункт по обоим каналам – GSM

и Iridium. Отличие заключалось в том, что использование канала Iridium, как и ожидалось, приводило к большей задержке отправки данных с борта ВС. Таким образом, авторами работы предложен и опробован на ВС метод мониторинга с использованием спутникового канала Iridium. Следующий этап разработки устройства требует опробования экспериментальной модели на ВС с большей крейсерской скоростью и по результатам эксперимента – принятия решения о совершенствовании элементной базы.

Библиографические ссылки

1. Harbor Research – Machine-to-Machine (M2M) & Smart Systems Market Forecast [Электронный ресурс]. URL: <http://www.slideshare.net/harborresearch/harbor-research-machine-to-machine-m2-m-smart-systems-market-forecast> (дата обращения: 14.12.15).
2. Киселев А. Н. Новый GSM/GPRS-модуль Sagem HiLo: особенности применения в M2M-приложениях // Беспроводные технологии. 2008. № 4(13). С. 18–21.
3. Паллаб Ч. А. Системы передачи данных требуют развития M2M-автоматизации // Электронные компоненты. 2013. № 9. С. 27–30.
4. Кацура А. В., Моховиков И. С. Улучшение точностных и надежностных характеристик аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем в высоких широтах // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : материалы VIII Всерос. науч.-техн. конф. В 2 т. Т. 1. Технические науки. Информационные технологии. Сообщения школьников / СибГАУ. Красноярск. 2012. С. 190–191.
5. Iridium M2M [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iridium.com/solutions/m2m> (дата обращения: 15.12.15).
6. M2M Services [Электронный ресурс]. URL: http://www.inmarsat.com/wp-content/uploads/2013/11/Inmarsat_M2M_Services.pdf (дата обращения: 15.12.15).

7. Невдяев Л., Смирнов А. Персональная спутниковая связь. М. : Эко-Трендз, 1998. 216 с.
8. Глобальная сеть: группировка спутников [Электронный ресурс]. URL: http://iridium.steccom.ru/wp-content/uploads/2012/09/IRDM_Global-Network_SatelliteConstellation_DATASHEET_27Sep2010_RU.pdf (дата обращения: 15.12.15).
9. Fleet Broadband coverage [Электронный ресурс]. URL: http://www.inmarsat.com/wp-content/uploads/2013/10/Inmarsat_FleetBroadband_Coverage_Map.pdf (дата обращения: 15.12.15).
10. Iridium 9602 SBD Transceiver Developer's Guide [Электронный ресурс]. URL: <http://nearspace.ru/doc/Iridium-9602-SBD-Transceiver-Product-Developers-Guide.pdf> (дата обращения: 15.12.15).
11. Iridium SBD [Электронный ресурс]. URL: <http://satphones.eu/en/content/24-iridium-sbd-rudics> (дата обращения: 16.12.15).
12. Спутниковый мониторинг. Часть 1 [Электронный ресурс]. URL: <http://habrahabr.ru/post/148759/> (дата обращения: 16.12.15).
13. MGGS2217. Руководство по эксплуатации. Версия 1.2. [Электронный ресурс]. URL: http://glonassneva.com/sysfiles/MGGS2217-DS-RU_Glonass-Neva_ver_1_2.pdf (дата обращения: 16.12.15).
14. Прогноз точности навигационного определения по ГНСС ГЛОНАСС+GPS [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sdcn.ru/smgle/precisions?version=rus&sist=sum&site=extern> (дата обращения: 16.12.15).
15. Соловьев Ю. Системы спутниковой навигации. М. : Эко-Трендз, 2000. 260 с.
16. Зандер Ф. В., Кацура А. В., Гейман В. Н. Приемное устройство авиационных навигационных комплексов и пеленгаторов // Решетневские чтения : материалы XVII Междунар. науч. конф. В 2 ч. Ч. 2. / СибГАУ. Красноярск. 2013. С. 362–264.
17. Батурина Т. Н., Сушков А. А., Боев Н. М. Разработка автономного приемопередающего устройства спутниковой связи с функцией бортового регистратора для беспилотных летательных аппаратов // Современные проблемы радиоэлектроники : материалы Всерос. науч.-тех. конф. / СФУ. Красноярск. 2014. С. 22–25.
18. Лукасов В. В., Кацура А. В. Надежность летательных аппаратов и авиационных двигателей / СибГАУ. Красноярск. 2005. 76 с.
19. Устройство терминальное программируемое УТП-М-01-8.004. Техническое описание. Орел : ЗАО НТЦ «Навигатор Технолоджи», 2008. 68 с.
20. Кацура А. В., Таранов А. И. Локальные дифференциальные подсистемы спутниковых радионавигационных систем // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : материалы VIII Всерос. науч.-тех. конф. В 2 т. Т. 1. Технические науки. Информационные технологии. Сообщения школьников / СибГАУ. Красноярск. 2012. С. 198–199.
- machine-m2-m-smart-systems-market-forecast (accessed 14.12.15).
2. Kiselev A. N. [New GSM/GPRS module Sagem HiLo: features of application in M2M]. *Besprovodnye tekhnologii*. 2008, Vol. 4, No. 13, P. 18–21 (In Russ.).
3. Pallab Ch. A. [Data communication drives M2M automation processes]. *Elektronnye komponenty*. 2013, No. 9, P. 27–30.
4. Katsura A. V., Mokhovikov I. S. [Improvement precision and reliability of characteristics of the equipment of consumers of satellite radio navigational systems in high latitudes]. *Aktual'nye problemy aviatii i kosmonavtiki: materialy VIII Vseross. nauch.-tekhn. konf.* [Actual problems of aircraft and aeronautics: proceedings of the VIIIth All-Russian scientific and technical conference]. Krasnoyarsk, SibSAU, 2012, P. 190–191 (In Russ.).
5. Iridium M2M. Available at: <https://www.iridium.com/solutions/m2m> (accessed 15.12.15).
6. M2M Services. Available at: http://www.inmarsat.com/wp-content/uploads/2013/11/Inmarsat_M2M_Services.pdf (accessed 15.12.15).
7. Nevdyaev L. M., Smirnov A. A. *Personal'naya sputnikovaya svyaz'* [Personal satellite communication]. Moscow, Eko-Trendz publ., 1998, 216 p.
8. *Global'naya set': gruppirovka sputnikov* [Global network: group of satellites]. Available at: http://iridium.steccom.ru/wp-content/uploads/2012/09/IRDM_Global-Network_SatelliteConstellation_DATASHEET_27Sep2010_RU.pdf (accessed 15.12.15).
9. Fleet Broadband coverage. Available at: http://www.inmarsat.com/wp-content/uploads/2013/10/Inmarsat_FleetBroadband_Coverage_Map.pdf (accessed 15.12.15).
10. Iridium 9602 SBD Transceiver Developer's Guide. Available at: <http://nearspace.ru/doc/Iridium-9602-SBD-Transceiver-Product-Developers-Guide.pdf> (accessed 15.12.15).
11. Iridium SBD. Available at: <http://satphones.eu/en/content/24-iridium-sbd-rudics> (accessed 16.12.15).
12. *Sputnikovyy monitoring. Chast' 1* [Satellite monitoring. Part 1] (In Russ.). Available at: <http://habrahabr.ru/post/148759/> (accessed 16.12.15).
13. MGGS2217. *Rukovodstvo po ekspluatatsii. Versiya 1.2.* [MGGS2217. Operation manual. Version 1.2.] (In Russ.). Available at: http://glonassneva.com/sysfiles/MGGS2217-DS-RU_Glonass-Neva_ver_1_2.pdf (accessed 16.12.15).
14. *Prognoz tochnosti navigatsionnogo opredeleniya po GNSS GLONASS+GPS* [Forecast of accuracy of navigation definition for GLONASS+GPS]. Available at: <http://www.sdcn.ru/smgle/precisions?version=rus&sist=um&site=extern> (accessed 16.12.15).
15. Solov'ev Yu. A. *Sistemy sputnikovoy navigatsii* [Systems of satellite navigation]. Moscow, Eko-Trendz publ., 2000, 260 p.
16. Zander F. V., Katsura A. V., Geyman V. N. [Intake of aviation navigation complexes and direction finders]. *"Reshetnevskie chteniya": materialy XVII Mezhdunar. nauch. konf.* ["Reshetnev readings": proceedings of the XVIIth International scientific conference]. Krasnoyarsk, SibSAU, 2013, P. 362–264 (In Russ.).

References

1. Harbor Research – Machine-to-Machine (M2M) & Smart Systems Market Forecast. Available at: <http://www.slideshare.net/harborresearch/harbor-research-machine-to-machine-m2m-smart-systems-market-forecast> (accessed 14.12.15).

17. Baturin T. N., Sushkov A. A., Boev N. M. [Development of the self-contained send-receive unit of satellite communication with function of the onboard registrar for unmanned aerial vehicles]. *Sovremennye problemy radioelektroniki: materialy vseross. nauch.-tekhn. konf.* [Modern problems of radio electronics: proceedings of All-Russian scientific and technical conference]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2014, P. 22–25 (In Russ.).
18. Lukasov V. V., Katsura A. V. *Nadezhnost' letatel'nykh apparatov i aviatcionnykh dvigateley*. [Reliability of aircraft and aviation engines.]. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2005, 76 p.
19. *Ustroystvo terminal'noe programmiruemoe UTP-M-01-8.004. Tekhnicheskoe opisanie*. [Terminal and programmable device UTP-M-01-8.004. Technical description]. Orel, ZAO NTTs “Navigator Tekhnolodzhi” Publ., 2008, 68 p.
20. Katsura A. V., Taranov A. I. [Local differential subsystems of satellite radio navigational systems]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki: materialy VIII Vseross. nauch.-tekhn. konf.* [Actual problems of aircraft and aeronautics: proceedings of the VIIIth All-Russian scientific and technical conference]. Krasnoyarsk, SibSAU, 2012, P. 198–199 (In Russ.).

© Кацуря А. В., Акзигитов А. Р., Андронов А. С., Строков Д. Е., Акзигитов Р. А., 2016

ПЛАТФОРМА АВТОМАТИЗАЦИИ СИСТЕМЫ КОМПЕНСАЦИИ ВЕСОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ДЛЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ РЕФЛЕКТОРОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

И. В. Ковалев¹, Ю. О. Баданина^{2*}

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

²Сибирский государственный технологический университет
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, просп. Мира, 82

*E-mail: secret398@mail.ru

Рассмотрено конструктивное исполнение и логика раскрытия крупногабаритной трансформируемой антенны. Выявлена необходимость компенсации весовой составляющей при сборке и испытаниях конструкции. Учитывая логику движения элементов силовой спицы, сделан вывод о применении следящей системы для компенсации весовой составляющей.

Проведен анализ имеющегося оборудования и систем управления. Выбран производитель автоматизированного оборудования, удовлетворяющего поставленным задачам управления и контроля. Сделан вывод о проектировании системы компенсации весовой составляющей на основе сервоприводов, контроллеров и сенсоров, объединенных платформой автоматизации, управляемой специальным программным обеспечением.

Разработана структура платформы автоматизации, соответствующая принятому технологическому процессу проведения испытаний. Определены принципы взаимодействия подсистем системы компенсации весовой составляющей для приёма, обработки и контроля параметров процесса испытаний. Сделан вывод о том, что предложенная система может быть интегрирована в перспективную систему автоматизации и управления технологическим процессом проведения испытаний раскрытия крупногабаритных антенн космических аппаратов.

Ключевые слова: космический аппарат, крупногабаритный рефлектор, автоматизация, система компенсации весовой составляющей, контроллер.

Vestnik SibGAU
Vol. 17, No. 1, P. 131–136

PLATFORM OF AUTOMATION OF COMPONENT WEIGHT COMPENSATION SYSTEM FOR LARGE SPACECRAFT REFLECTOR

I. V. Kovalev¹, J. O. Badanina^{2*}

¹Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
²Siberian State Technological University
82, Mira Av., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation

*E-mail: secret398@mail.ru

The design and logic of opening large convertible antenna are considered in this article. The necessity of weight component compensation in the assembly and testing of the design is discovered. Taking into the account the logic of the movement elements of power spokes, it has been concluded that the use of the tracking system compensates the weight component.

The analysis of the existing equipment and control systems has been conducted. The selection of the manufacturer of automated equipment that meets the stated objectives of management and control was made. It is concluded that the design component of the weight compensation system based on servo controllers and sensors combined platform automation, controlled by special software.

The structure of the platform automation, consistent workflow testing, has been developed. It defines the principles of interaction between subsystems of the weight compensation component for receiving, processing and monitoring of process parameters testing. It is concluded that the proposed system can be integrated into the automation system and the perspective of process control testing of disclosure of large spacecraft.

Keywords: spacecraft, bulky reflector, automation, system weight component compensation controller.

Введение. В связи с внедрением при производстве космических летательных аппаратов крупногабаритных механических систем возникла необходимость поиска новых, но при этом достаточно простых и эффективных способов обработки данных механических систем на этапе наземной экспериментальной отработки, так как применение традиционных методов либо не удовлетворяет предъявляемым требованиям, либо невозможно использовать их из-за конструктивных особенностей.

На различных космических аппаратах (КА) проведен ряд экспериментов по развертыванию крупногабаритных антенных конструкций. Анализ существующих на мировом рынке трансформируемых крупногабаритных рефлекторов показал, что, несмотря на определенные достижения в этой области, лишь немногие из них способны в невесомости обеспечить точность соответствия заданной формы и необходимую жесткость конструкции. Не всегда удается добиться и их надежного раскрытия. Причина в нарушении технологии на любом из следующих этапов:

- изготовление деталей и узлов с учетом ресурсных характеристик конструкции;
- высокоточная сборка на стендовом комплексе;
- стендовое тестирование антенны.

Для всех существующих на данный момент космических аппаратов на этапе отработки необходимо проводить ряд испытаний, в ходе которых требуется обеспечить ликвидацию весовой составляющей элементов конструкции для устранения ее деформации или разрушения под действием силы тяжести. Для выполнения данного условия применяются системы компенсации весовой составляющей. Данные системы могут найти свое применение при проверке функционирования механических систем, при отработке процессов раскрытия трансформируемых антенн, ферменных рефлекторов разных форм и размеров, солнечных батарей и других многозвездных конструкций [1–4].

Назначение. Система компенсации весовой составляющей предназначена для компенсации моментов сил, действующих относительно корневого шарнирного узла, относительно промежуточного шарнирного узла, относительно шарнирного узла подкоса спицы от веса звеньев и подвижных частей рефлектора, в том числе отдельно от формообразующей структуры, от лент механизма раскрытия, сетеполотна и других существенных конструктивных элементов рефлектора, настройки и проверки функционирования рефлектора [5].

Система компенсации весовой составляющей должна обеспечивать работу с рефлектором, основным элементом несущей конструкции которого являются силовые спицы (рис. 1), которые определяют требуемую стабильность рабочей поверхности под воздействием факторов эксплуатации. Рассмотрим основные принципы работы системы компенсации весовой составляющей на примере одного модуля, необходимого для обеспечения компенсации весовой составляющей элементов силовой спицы антенны.

Для обеспечения требуемых габаритов в транспортировочном положении силовая спица имеет трансформируемую конструкцию и приводится в рабочее положение с помощью механизма выдвижной мачты [6–8]. Для построения траектории движения центров масс во время раскрытия спицы составлена таблица по 20-ти положениям звеньев и подкоса относительно друг друга в процессе раскрытия антенны. Из графика (рис. 2) следует, что траектории движения звеньев и подкоса достаточно сложные, требующие применения следящей системы для компенсации весовой составляющей этих элементов в процессе отработки раскрытия антенны в наземных условиях [9–11].

Задача управления системой. Для реализации компенсации весовой составляющей силовой спицы во время сборки и испытаний необходимо организовать три точки связи, находящиеся в теоретических центрах масс корневого, концевого и откидного звеньев с модулем системы компенсации весовой составляющей. Организация связи звеньев с исполнительными следящими механизмами системы компенсации весовой составляющей будет реализована через гибкую условно нерастяжимую стропу.

Исполнительными механизмами системы компенсации весовой составляющей будут являться три каретки, перемещающиеся по направляющей и обеспечивающие определенное заданное отклонение гибкой стропы от вертикали, а также три привода намотчика гибкой стропы, позволяющие компенсировать изменения длины гибкой стропы при изменении координат центров масс звеньев. Из расположения центров масс звеньев и их траектории складываются допустимые ходы кареток системы компенсации весовой составляющей (см. таблицу).

По данным таблицы построен график движения центров масс (ЦМ) корневой спицы, концевой спицы и подкоса (рис. 2).

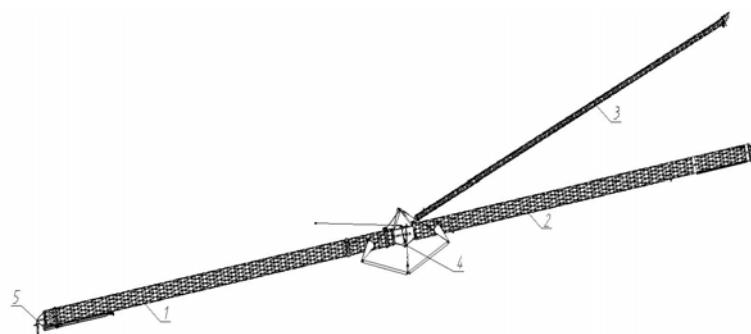


Рис. 1. Силовая спица: 1 – корневое звено; 2 – концевое звено; 3 – откидное звено; 4 – промежуточный шарнирный узел; 5 – корневой шарнирный узел

**Теоретические параметры кинематики движения спицы
и изменения положения центра масс во время раскрытия спицы**

Условное положение звеньев спицы	Углы раскрытия		Спика корневая		Спика концевая		Подкос	
	α_1	α_2	Y , мм	X , мм	Y , мм	X , мм	Y , мм	X , мм
1	0	0	2,48	2313,37	167,1	2330,16	271,39	1534,75
2	0	10,247	2,48	2313,37	465,55	2371,19	709,66	1607,02
3	9,024	10,247	365,31	2284,35	831,72	2268,82	952,95	1475,81
4	15,143	20	606,71	2232,4	1355,26	2180,68	1526,52	1396,96
5	20,827	30	824,85	2161,32	1856,49	2070,93	2086,24	1302,31
6	26,143	40	1021,52	2075,62	2328,41	1948,97	2620,16	1201,69
7	31,043	50	1195,08	1980,78	2768,04	1827,27	3125,07	1108,88
8	35,301	60	1338,88	1886,56	3167,92	1728,72	3595,02	1049,65
9	38,624	70	1445,95	1805,8	3519,72	1685,15	4022,89	1060,35
10	41	80	1519,57	1744,3	3822,27	1713,52	4403,89	1161
11	42,875	90	1575,84	1693,64	4084,82	1794,79	4738,68	1330,01
12	44,751	100	1630,45	1641,13	4318,52	1894,75	5031,51	1527,03
13	46,902	110	1690,88	1578,8	4529,99	1988,05	5286,52	1721,15
14	49,401	120	1758,12	1503,57	4721,07	2061,81	5505,96	1895,95
15	52,239	130	1830,41	1414,67	4891,15	2110,11	5690,6	2043,4
16	55,518	140	1908,33	1307,66	5043,81	2118,17	5845,57	2145,91
17	59,556	150	1995,67	1170,04	5189,93	2051,64	5886,04	2797,27
18	64,682	160	2092,22	987,06	5336,97	1873,35	5967,21	2675,42
19	71,247	170	2191,29	741,58	5482,94	1543,53	6064,13	2381,61
20	79,906	180	2278	403	5613	991,2	6174,5	1842,6

Примечание. α_1 – угол между осью мачты и спицей корневой; α_2 – угол между спицей корневой и спицей концевой.

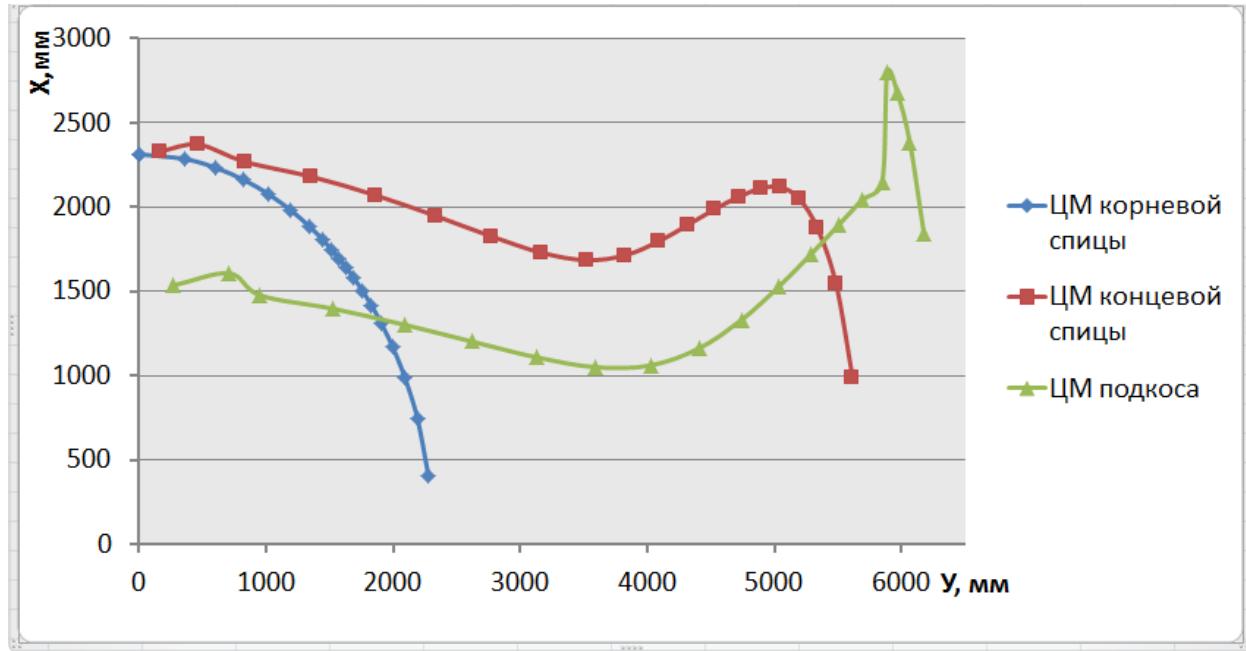


Рис. 2. Движение ЦМ корневой спицы, концевой спицы и подкоса

Модуль системы компенсации весовой составляющей должен удовлетворять следующим основным условиям: обеспечение поддержания заданного усилия в гибких стропах и его контроль, отслеживание отклонения гибкой стропы от вертикали и контроль угла отклонения на всей траектории движения центров масс звеньев. Реакция исполнительных меха-

низмов системы должна обеспечивать необходимую динамику в процессе раскрытия антенны [4; 9].

Предлагаемая платформа автоматизации. Анализ отечественного и зарубежного рынка автоматизированного оборудования показал, что у отечественного производителя отсутствует необходимая номенклатура.

Оборудование, удовлетворяющее необходимым условиям, производится только фирмами Siemens, Rockwell Automation и Mitsubishi Electric.

Анализ оборудования фирмы Siemens показывает, что оно не удовлетворяет массогабаритными параметрами и методам построения SCADA-системы.

Рассмотрено оборудование фирмы Rockwell Automation. Дистрибуторы этого оборудования готовы его поставить, но не занимаются технической поддержкой и сопровождением проектов.

Анализ оборудования японской фирмы Mitsubishi Electric показал, что оно соответствует необходимым требованиям по габаритным параметрам, техническим характеристикам и программным продуктам, способным реализовать соответствующую систему управления и программную оболочку оператора для системы компенсации весовой составляющей [12].

Для реализации компенсации весовой составляющей предлагается автоматизированная система на основе платформы автоматизации MELSEC System Q Mitsubishi Electric. Платформа Mitsubishi System Q основана на прогрессивной многопроцессорной технологии: одна система будет иметь несколько процессоров: процессор программируемого контроллера, процессор управления движением, процессор управляющей программы на основе SCADA-системы с возможностью полной интеграции запросов по управлению и обмену данными на единой платформе. Кроме того, обеспечивается высокая степень готовности системы за счет использования резервирования ведущих устройств в коммуникационных сетях, а также распознавания обрыва линий и способности к «горячей замене», что позволяет производить замену модулей прямо во время работы системы.

Процессорный модуль управления движением управляет и синхронизирует подключенные к нему сервоусилители, серводвигатели и набор необходимых сенсоров, интегрированных в систему управления для функции непрерывной визуализации и слежения за позициями центров масс звеньев спиц.

Структурная схема автоматизации представлена на рис. 3.

Каждый модуль включает в себя отдельный блок управления, состоящий из ПЛК, модуля управления движением, модуля аналоговых входов, модуля цифровых входов, модуля выходов, источника питания и сервоусилителей, расположенных на базовом шасси. Все модули соединены с базовой управляющей станцией средствами Ethernet. Базовая управляющая станция состоит из ПЛК, модуля MES-интерфейса, коммутационного модуля Ethernet и персонального компьютера с операционной системой для контроллеров позиционирования и SCADA-системы.

SCADA-система реализована на MX4 SCADA – полнофункциональной системе контроля и сбора данных, основанной на интерфейсе Windows, что значительно сокращает скорость обучения, давая возможность пользователю быстро приспосабливаться и реагировать на изменения в процессе. В SCADA-системе запрограммированы основные функции, включая блокировку, сигнализацию, архив данных и отчеты, обеспечиваются простые, но важные готовые решения [12; 13].

Визуализация работы с управляющей программой выполнена на панели оператора Mitsubishi Electrical GOT2000, которая обеспечивает человеко-машинный интерфейс, предоставляет доступ к технологическим данным, позволяет отслеживать, управлять и по мере необходимости изменять параметры процесса компенсации весовой составляющей. Автоматическое управление процессом компенсации весовой составляющей построено таким образом, что на экране компьютера отображается главное меню системы, содержащее функциональные зоны:

- режим сборки;
 - режим испытаний;
 - статистика;
 - настройка и диагностика;
 - активные аварии;
 - архив.

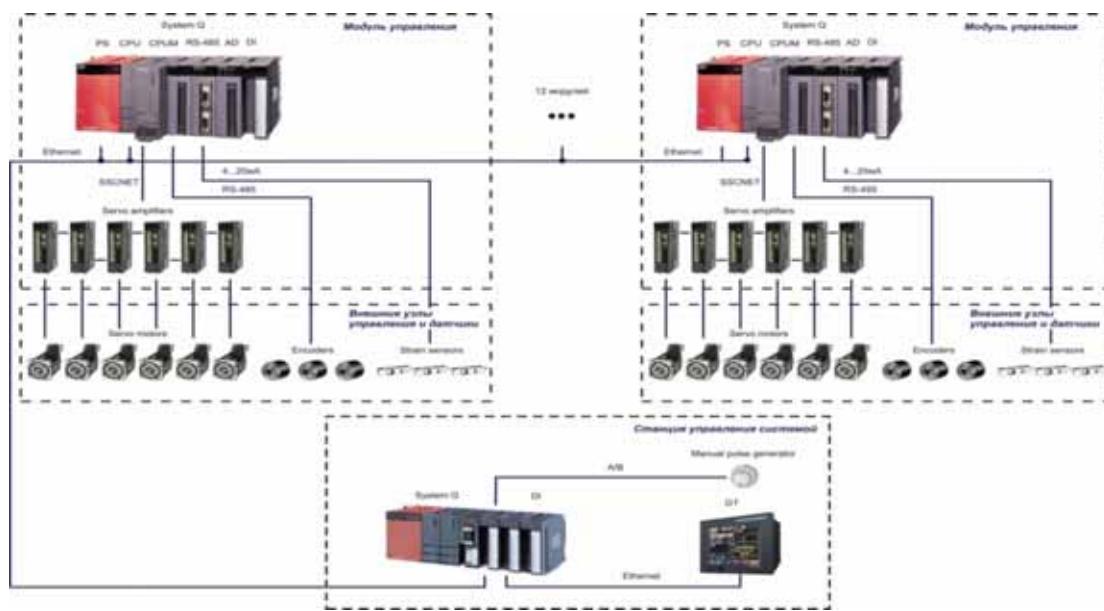


Рис. 3. Структура платформы автоматизации

Автоматическое управление компенсацией весовой составляющей заключается в контроле и поддержании требуемых значений параметров процесса путем управления системой, работой исполнительных механизмов и, при необходимости, в принятии дополнительных мер по управлению процессом.

При штатных испытаниях спроектированная система работает по сформированному алгоритму, поддерживая величину определенного усилия и вертикальное положение гибкой связи по всей траектории раскрытия спиц антенны, а также учитывает влияние динамических рывков и прописанные аварийные ситуации.

Работа системы управления построена таким образом, что в управляющей программе задаются основные параметры процесса компенсации весовой составляющей:

- величины требуемого натяжения гибких строп;
- необходимые скорости (или законы изменения скорости) серводвигателей, отслеживающих вертикальное положение гибкой стропы.

Серводвигатели позволяют установить любой из известных законов регулирования и задать любые параметры разгона-торможения, необходимые для плавного трогания-останова, отработки сигналов с датчиков измерения угла и весоизмерительных ячеек.

Заключение. По результатом данной статьи сделан вывод о том, что предложенная система сможет быть интегрирована в перспективную систему автоматизации и управления технологическим процессом проведения испытаний раскрытия крупногабаритных антенн космических аппаратов.

Разработана структура платформы автоматизации системы компенсации весовой составляющей, соответствующая принятому процессу проведения испытаний. Разработан интуитивно понятный человеко-машинный интерфейс с возможностью дистанционного управления и контроля заданных параметров.

Использование выбранной платформы автоматизации позволит решить поставленную задачу управления системой компенсации весовой составляющей, которая повысит её надёжность, расширит функциональные возможности, будет удобна в использовании, увеличит производительность расчётов и сократит число ошибок операторов, достигнет требуемого уровня оперативности работы системы в целом. Такая оценка позволяет с уверенностью утверждать о качественном улучшении системы компенсации весовой составляющей, которая будет обладать большей гибкостью, надежностью и безотказностью.

Библиографические ссылки

1. Гуляев В. И., Гайдачук В. В., Чернявский А. Г., Шалино Л. О динамике крупногабаритного разворачивающегося рефлектора // Прикладная механика. 2003. № 39 (9). С. 109–115.

2. Хеджепет М. Д. Конструкции для точных дистанционно раскрываемых антенн. Заключительный отчет / Национальный аэрокосмический и исследовательский центр Langley. Контракт № NASA-18567. 1989.

3. Ковалев И. В., Кикоть Ю. О. Мобильная система имитации невесомости для крупногабаритных космических аппаратов // Вестник СибГАУ. 2014. Вып. 4(56). С. 173–178.

4. Пат. 233970 RU C 2 G 61 M 19/00 B 64 P 7/00. Устройство имитации невесомости механизмов с гибкой конструкцией элементов / Дроздов А. А., Агашкин С. В., Михнев М. М., Ушаков А. Р. 27.09.2008.

5. Голдобин Н. Н. Методика оценки формы радиоотражающей поверхности крупногабаритного трансформируемого рефлектора космического аппарата // Вестник СибГАУ. 2013. Вып. 1(47). С. 106–111.

6. Дебда Д. Е., Пятибратов Г. Я. Проблемы создания комбинированных систем компенсации силы тяжести объектов обезвешивания. Новочеркасск : ЮРГТУ, 2000. 32 с. Деп. в ВИНИТИ 16.02.2000, № 396-В00.

7. Подураев Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение. М. : Машиностроение, 2007. 256 с.

8. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления / пер. с англ. Б. И. Копылова. М. : Лаборатория базовых знаний, 2002. 832 с.

9. Романов А. В., Тестоедов Н. А. Основы проектирования информационно-управляющих и механических систем космических аппаратов / под ред. д-ра техн. наук, профессора В. Д. Атамасова. СПб. : АНО ЛА «Профессионал», 2015. С. 240.

10. Пат. 1828261 RU A1 SU G 01 M 19/00. Устройство обезвешивания элементов / Ануприенко Г. Е., Карпачев Ю. А., Кухоцкий Л. М., Мишинев А. А., Павлюк В. Н., Рудых Ю. Н., Савенко Ю. Н. 20.09.96.

11. Пат. 5848899A. US. Method and device for simulating weightlessness / Ian P. Howard. 15.12.98.

12. Платформа Mitsubishi Electric MELSEC System Q и её компоненты [Электронный ресурс]. URL: <http://mitsubishielecric.ru> (дата обращения: 03.02.2016).

13. Программное обеспечение GX IEC Developer и MX OPC Server [Электронный ресурс]. URL: <http://mitsubishielecric.com> (дата обращения: 03.02.2016).

References

1. Gulyaev V. I., Gaydaychuk V. V., Cherniavsky A. G., Lenin L. [On the dynamics of the unfolding of large-sized reflector]. *Prikladnaya mehanika* [Applied Mechanics]. Kiev, 2003, 39.9, P. 109–115.

2. Hedzhepet M. J. *Konstruktsii dlya tochnykh distantsionno raskryvayemykh antenn. Zaklyuchitel'nyy otchet. Podgotovлено Natsional'nym aerokosmicheskim i issledovatel'skim tsentrom Langley po kontraktu № NASA-18567.* [Design for precise remote antennas disclosed. Final Report. Prepared by the National Aerospace Research Center and Langley contract № NASA-18567]. 1989.

3. Kovalev I. V., Kikot J. O. [Mobile system simulate weightlessness for large spacecraft]. *Vestnik SibGAU*, 2014, No. 4 (56), P. 173–178 (In Russ.).

4. Drozdov A. A., Agashkin S. V., Mikhnev M. M., Ushakov A. R. *Ustroystvo imitatsii nevesomosti mehanizmov s gibkoy konstruktseiy elementov* [The device simulating weightlessness with Flexible design

- elements]. Patent RF, No. 233970 G61M19 C2/00 V64P7/00, 2008.
5. Goldobin N. N. [Methodology to evaluate the shape of the reflecting surface of bulky radio convertible reflector spacecraft]. *Vestnik SibGAU*, 2013, Vol. 1 (47), P. 106–111 (In Russ.).
6. Debda D. E., Pyatibratov G. Y. *Problemy sozdaniya kombinirovannykh sistem kompensatsii sily tyazhesti ob'ektorov obezveshivaniya* [Problems of creation of the combined compensation systems gravity of weightlessness objects]. Novosibirsk, SRSTU Publ., 2000, 32 p.
7. Poduraev Y. V. *Mekhatronika: osnovy, metody, primenenie* [Mechatronics: fundamentals, methods, applications]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007, 256 p.
8. Dorf R., Bishop R. *Sovremennye sistemy upravleniya* [Modern control systems]. Trans. from English B. I. Kopylov. Moscow, Laboratoriya bazovykh znanii Publ., 2002, 832 p.
9. Romanov A. V., Testoedov N. A. *Osnovy proektirovaniya informatsionno-upravlyayushchikh i mekhanicheskikh sistem kosmicheskikh apparatov* [Basics of designing information control and mechanical systems of spacecraft]. Ed. by Doctor of Techn. Sci., Professor V. D. Atamasova. St. Petersburg, LA ANO "Professional", 2015, 240 p.
10. Anuprienko G. E., Karpachev Y. A., Kuhotsky L. M., Mishneev A. A., Pavlyuk V. N., Rudykh Yu. N., Savenko Y. N. *Ustroystvo obezveshivaniya elementov* [The device of elements weightlessness]. Patent RF, No. 1828261 A1 G01M19 SU / 00, 1996.
11. Ian P. Howard. Method and device for simulating weightlessness. Patent RF, No. 5848899A, 1998.
12. *Platforma Mitsubishi Electric MELSEC System Q i ee komponenty* [Platform Mitsubishi Electric MELSEC System Q and its components]. Available at: <http://mitsubishielecric.ru> (accessed 03.02.2016).
13. *Programmnoe obespechenie GX IEC Developer i MKh OPC Server* [Software GX IEC Developer and MX OPC Server]. Available at: <http://mitsubishielecric.com> (accessed 03.02.2016).

© Ковалев И. В., Баданина Ю. О., 2016

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА
В МИКРОКАНАЛЬНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

Д. А. Коновалов*, Н. Н. Кожухов, И. Г. Дроздов

Воронежский государственный технический университет
Российская Федерация, 394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14
*E-mail: dmikonovalov@yandex.ru

Представлено исследование тепломассобмена в микроканалах на основе нитевидных монокристаллов кремния теплообменных элементов для телекоммуникационных систем космической техники, модулей управления наземного базирования. Целью настоящей работы является разработка математических моделей и проведение численного моделирования тепломассопереноса для микроканального теплообменника гибридной системы тепловой защиты на основе монокристаллов кремния. Система тепловой защиты должна обеспечивать стабильную работу электронного оборудования в широком диапазоне температур окружающего воздуха (от -40 до $+60$ °C), а терmostатирование должно находиться в пределах $\pm 0,1$ °C. При этом массогабаритные характеристики теплообменника соотнесены с размерами электронных компонентов. Предложен вариант теплообменника на основе матрицы из нитевидных кристаллов кремния, который позволяет создать развитую поверхность, обеспечивая высокий теплосъем до 100 W/cm^2 . По разработанной технологии произведены опытные образцы. Разработана математическая модель, наиболее полно описывающая процессы тепломассопереноса в микроканальных теплообменниках, определены корректные граничные условия. Проведено численное моделирование процессов тепло- и массопереноса. Построены зависимости перепада давления, температуры от расхода охладителя, определены подходы для нахождения геометрических характеристик эффективного ребра на основе монокристаллов. Определены зависимости температур монокристаллического ребра от его высоты и пространственного расположения. Исследованы критические режимы работы системы. С целью оптимизации теплогидравлических характеристик предложены новые конструкции теплообменных элементов из монокристалла кремния для проведения дальнейших исследований.

Ключевые слова: компактный теплообменник, развитая поверхность теплообмена, монокристалл кремния, система терmostатирования, тепловая защита.

Vestnik SibGAU
Vol. 17, No. 1, P. 137–146

MODELING OF PROCESSES OF HEAT AND MASS TRANSFER IN MICROCHANNEL HEAT EXCHANGERS OF SPACE-SYSTEM ENGINEERING CONTROL SYSTEMS

D. A. Konovalov*, N. N. Kozhukhov, I. G. Drozdov

Voronezh State Technical University
14, Moskovsky prospect, Voronezh, 394026, Russian Federation
*E-mail: dmikonovalov@yandex.ru

The work is devoted to the study of heat transfer in microchannels on the basis of filamentary monocrystals of silicon of the heat exchange elements for telecommunication systems, space technology, management module land-based. The aim of this work is to develop mathematical models and conduct numerical modeling of heat and mass transfer for a microchannel heat exchanger hybrid thermal protection system on the basis of silicon single crystals. The thermal protection system must ensure stable operation of the electronic equipment in a wide range of ambient temperatures (from minus 40 to plus 60 °C) and temperature control should be within ± 0.1 °C. The overall dimensions of heat exchanger are correlated with the size of electronic components. A variant of the heat exchanger based on the matrix of filamentary crystals of silicon that allows you to create a large surface area providing high heat removal of up to 100 W/cm^2 is offered. By the developed technology prototypes have been produced. The mathematical model that best describes the processes of heat and mass transfer in microchannel heat exchangers, defined the proper boundary conditions has been developed. Numerical modeling of heat and mass transfer has been conducted. The dependences of the differential pressure, temperature, flow cooler, identified approaches for determining geometric characteristics of effective edge-based single crystals have been built. The dependences of the temperatures of single-crystal fin from its height and spatial location have been determined. The critical modes of the system have been researched.

To optimize the thermal and hydraulic characteristics of the proposed new design of heat-exchange elements made of single crystal silicon for further research has been offered.

Keywords: compact heat exchanger, the extended heat exchange surface, whiskers of silicon, temperature control system, thermal protection.

Введение. В последние годы активное развитие таких отраслей, как космическая техника, энергетика и электроника, приводит к повышению тепловых нагрузок различных элементов оборудования, входящего в состав космических, энергетических и телекоммуникационных систем. В связи с этим исследование способов интенсификации теплоэнергетических процессов является актуальной задачей при создании стабильных систем отвода теплоты. Особое место отводится термостатированию, которое заключается в разработке технологий обеспечения температуры приборов и устройств телекоммуникационных систем наземного базирования с высокой тепловой стабильностью ($\pm 0,1^{\circ}\text{C}$).

Постановка задачи. Для надежного функционирования оборудования в условиях повышенного тепловыделения элементов, а также при высоких температурах окружающего воздуха наряду с пассивными используют активные системы тепловой защиты с развитыми поверхностями теплообмена. Одним из эффективных способов интенсификации теплопереноса является использование пористых и микроканальных теплообменников. Исследованиям процессов тепломассопереноса в указанных выше системах посвящены множественные работы отечественных и зарубежных авторов [1; 2].

При чрезвычайно высоких тепловых потоках, больших температурных напорах, сложной конструкции или малой доступности поверхности пористое и микроканальное охлаждение – наиболее подходящий метод тепловой защиты. При этом зачастую размеры теплообменника должны быть соизмеримы с тепловыделяющим элементом, что ведет к жестким требованиям массогабаритных характеристик.

Широкий диапазон структурных, теплофизических, гидравлических, химических, оптических и других свойств пористых и микроканальных материалов, возможность изготовления из них элементов конструкций, высокая интенсивность теплообмена – все это дает возможность использовать указанные теплообменные элементы в условиях действия высоких тепловых нагрузок и температур, там, где другие виды охлаждения конструкций оказываются малоэффективными. Так, например, в системах тепловой защиты жидкостных ракетных двигателей, сверхзвуковых огнеструйных резаков, плазмотронов, а также блоков питания, микросхем, современных процессоров, станций базовой, спутниковой и космической связи, тепловой поток в которых составляет $100 \text{ Вт}/\text{см}^2$ и выше [3–5], были разработаны и успешно апробированы пористые теплообменники с межканальной транспирацией охладителя [6; 7].

Следует отметить, что на процесс теплопереноса оказывает непосредственное влияние не только конвективная составляющая, но и теплофизические свойства самого теплоотводящего элемента, а также

термическое сопротивление между «горячей» поверхностью и охладителем. Так, при величине коэффициента внутриворового теплообмена, равной $h_v = 10^9\text{--}10^{11} \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, эффективный коэффициент теплопроводности медной матрицы составляет $160 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, а удельное термическое сопротивление между нагретой поверхностью и теплообменником составляет порядка от 10^{-3} до $10^{-2} (\text{м}\cdot\text{К})/\text{Вт}$, что в целом свидетельствует о высокой эффективности пористого охлаждения.

Одним из решений данной проблемы является использование микроканальных элементов на основе монокристаллов кремния. Применение данной технологии при изготовлении устройств охлаждения позволяет снизить практически до нуля и даже исключить в принципе термическое сопротивление между подложкой и теплообменными элементами.

Разработка макетов теплообменников. Были разработаны и созданы теплообменные аппараты с теплоотводящими элементами в виде матрицы нитевидных кристаллов кремния, которые выращены на подложке полупроводника и образуют развитую поверхность теплообмена [8]. Решение о применении в качестве материала монокристаллического кремния обусловлено его высоким коэффициентом теплопроводности, а также перспективными разработками в области электроники в части выращивания на одной стороне кремниевой подложки электронных чипов, а на другой стороне – шипов заданной конфигурации, представляющих собой систему микроканалов системы тепловой защиты, что в целом позволяет исключить термическое контактное сопротивление между теплообменником и источником тепловыделения.

Один из макетов теплообменника с теплоотводящими элементами из нитевидных кристаллов кремния, выращенных на подложке полупроводника, представлен на рис. 1.

Изготовление микроканального теплообменника на основе монокристаллов кремния заключается в следующем. Нитевидные кристаллы кремния выращиваются на кремниевых монокристаллических подложках в печи с горизонтальным расположением трубчатого кварцевого реактора в открытой хлоридно-водородной среде. После разращивания кристаллов подача тетрахлорида кремния в реакционную зону прекращается, а реактор с выращенными образцами нитевидных кристаллов охлаждается до комнатной температуры. Морфологические исследования выполняются методами сканирующей зондовой микроскопии.

Для исследования были разработаны и созданы теплообменные аппараты с теплоотводящими элементами (рис. 2) в виде матрицы нитевидных кристаллов кремния, которые выращены на подложке полупроводника и образуют развитую поверхность теплообмена с системой коллекторов и проницаемых перегородок [8].

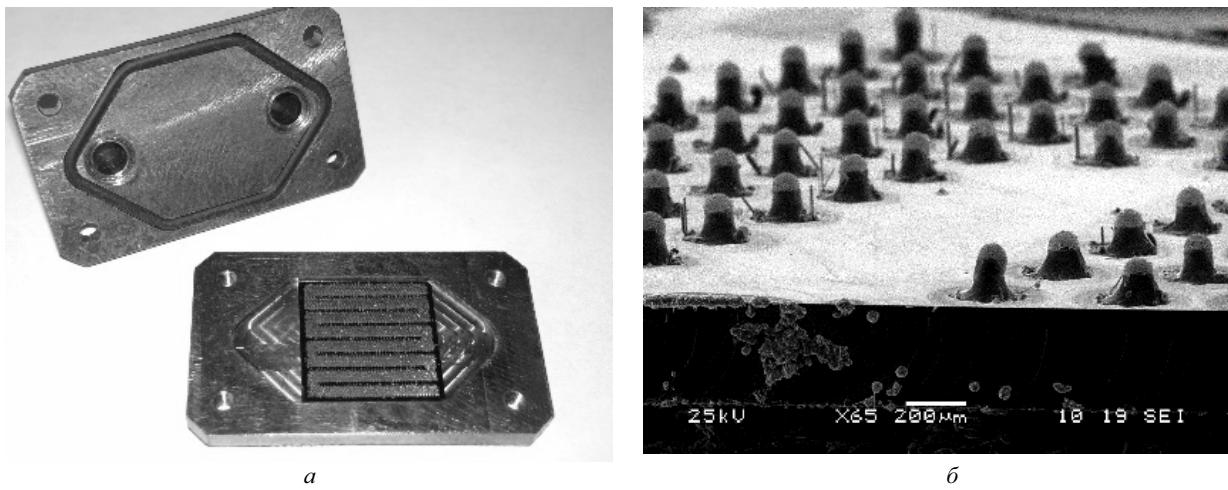


Рис. 1. Микроканальный теплообменник с теплоотводящими нитевидными монокристаллами кремния:
а – общий вид; б – фотография подложки

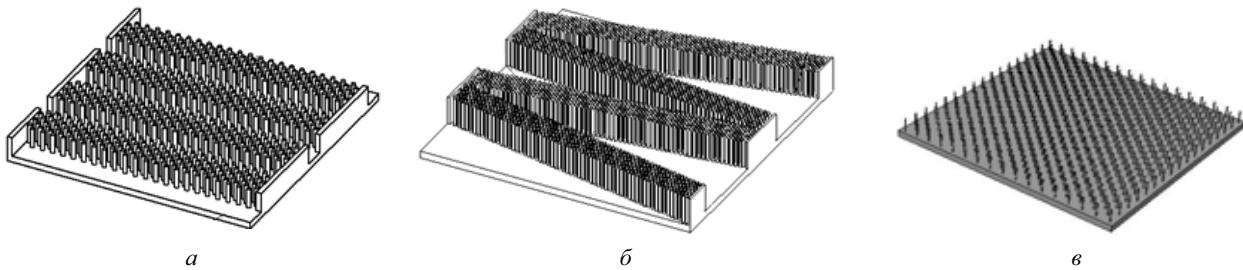


Рис. 2. Микроканальные теплоотводящие элементы на основе матрицы нитевидных монокристаллов кремния:
а – с зигзагообразным прямоугольным расположением; б – с зигзагообразным клиновидным расположением;
в – со сплошным расположением

В таком варианте элементы охлаждения образуют монолитную конструкцию вместе с тепловыделяющим элементом, при этом исключается термическое сопротивление, которое присутствует в варианте при раздельном исполнении теплообменника и тепловыделяющего элемента.

Математическое моделирование. В настоящее время практически отсутствуют результаты математического и численного моделирования процессов тепломассопереноса в микроканальных структурах подобного рода [3; 9; 10]. Применение математических моделей и критериальных уравнений тепломассопереноса макромоделей, в том числе обтекание пучков труб в теплообменниках, для оценки процессов в микромасштабах дает неудовлетворительные результаты. Использование модели идеальной пористой среды для прогнозирования работы микроканальных элементов также является несовершенной, что заключается в серьезном расхождении результатов численного и экспериментального моделирования.

Это связано с тем, что необходимо исследование особенностей процессов гидродинамики и теплообмена в микроканалах, когда следует учитывать пристеночные течения вблизи стенок и шипов, а также развитые течения в свободном пространстве. Существенный градиент температур между шипом и охладителем также вносит свои корректизы в точность моделирования процессов гидродинамики, в том числе и на нестационарных режимах работы. Некорректность существующих моделей ведет к потере точно-

сти в оценке процессов тепломассопереноса в разрабатываемых элементах тепловой защиты, что может привести к ее разрушению при критических режимах работы и сбою в работе наземных телекоммуникационных систем.

Имеются исследования процессов тепломассопереноса в микроканалах, на поверхностях с рельефом из наночастиц при наличии фазового перехода, но в большей части они имеют экспериментальный характер для конкретных моделей [11–13].

При построении математической модели был принят ряд допущений [14–17]: рабочий агент считается вязкой несжимаемой средой (вода); течение потока – трехмерное стационарное; теплофизические свойства потока принимаются постоянными и равными средним значениям в исследуемом интервале температур; на входе в расчетную область имеется полностью разбитое течение с изотропной турбулентностью; теплообмен с окружающей средой отсутствует (на внешней стороне выполняется условие адиабатности).

Система уравнений Навье–Стокса для описания турбулентного движения вязкой несжимаемой ньютоновской жидкости при отсутствии массовых сил представлена в векторно-тензорной форме:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\mu \nabla \vec{V} \right). \quad (2)$$

В скалярно-тензорной форме уравнения неразрывности и изменения количества движения записываются как

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_k}{\partial t} + u \frac{\partial u_k}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_k} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{jk}. \quad (4)$$

С учетом уравнения неразрывности (3) уравнение (4) может быть представлено в виде

$$\frac{\partial u_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_k) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_k} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{jk}. \quad (5)$$

В уравнениях (1)–(4) используемые индексы определяют направления декартовой системы координат x_j (здесь $j = 1, 2, 3$; $k = 1, 2, 3$; u_k , u_j – декартовые составляющие скорости в направлении соответствующих осей; p – давление; t – время; ρ – плотность жидкости; τ_{jk} – составляющие тензора вязких напряжений; μ – коэффициент динамической (молекулярной) вязкости; \vec{V} – вектор местной скорости потока, $\vec{V} = e_i u_i$; e_i – единичные векторы; ∇ – оператор Гамильтона; $\partial u_k / \partial t$ – производная по времени; $\tau_{jk} = \mu (\partial u_j / \partial x_k + \partial u_k / \partial x_j)$.

Вопросы замыкания полученной системы уравнений решаются на различном уровне сложности. Простейший путь – использование эмпирической информации о характеристиках турбулентности, наиболее сложный путь заключается в выводе уравнений относительно рейнольдсовых напряжений.

При моделировании гидродинамики течения охладителя использовалась двухслойная модель SST. Её выбор обусловлен хорошей сходимостью для задач, где необходимо учитывать как условия течения охладителя во входящем потоке, так и в пограничном слое вблизи шипов, обеспечивая при этом приемлемую сходимость решения [14; 16]. Она относится к модели с двумя дифференциальными уравнениями, учитывающей такие модели, как $k-\omega$ и $k-\varepsilon$, и обес-

печивает плавный переход от модели $k-\omega$ в пристеночных областях к модели $k-\varepsilon$ вдали от твердых стенок.

Система уравнений для неизотермического (с теплообменом) течения несжимаемой жидкости в декартовых прямоугольных координатах будет состоять из уравнений неразрывности (6), движения (7) и энергии (8):

$$\nabla U = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + (U \cdot \nabla) U = J - \frac{1}{\rho} \nabla P + v \Delta U, \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + (U \cdot \nabla) T = a \Delta T + \frac{q_v}{\rho c_p}, \quad (8)$$

где J есть результирующий вектор массовых сил; v – кинематическая вязкость среды ($v = \mu / \rho$); a – коэффициент температуропроводности ($a = \lambda / \rho c_p$).

В тензорных обозначениях система (6)–(8) выглядит как

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial U_k}{\partial \tau} + U_j \frac{\partial U_k}{\partial x_j} = J_k - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_k} + v \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_k}{\partial x_j} \right), \quad (10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + U_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = a \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{q_v}{\rho c_p}. \quad (11)$$

При разработке математической модели и численного моделирования процессов гидравлики и теплообмена в работе рассмотрен вариант матрицы, изображенный на рис. 2, б. Была создана модель области течения охладителя через 1/5 часть теплоотводящего элемента (рис. 3) с целью ускорения процессов расчета. Данные модели были созданы в графическом пакете Siemens NX. Геометрические размеры одного «шипованного» ребра составили 20×4 мм. Высота шипов была принята 1 мм.

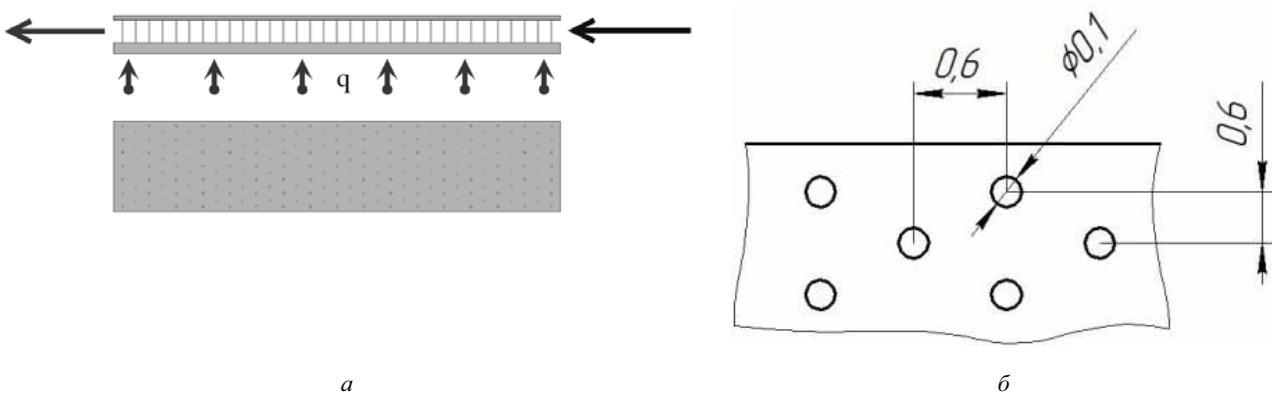


Рис. 3. Модель области течения: а – граничные условия; б – расположение шипов

Для математического моделирования использовался расчетный комплекс Ansys Fluent. Использовалась двухслойная модель SST, обеспечивающая, как уже указывалось, хорошую сходимость для задач, где необходимо учитывать как условия течения охладителя во входящем потоке, так и в пограничном слое вблизи шипов [14]. На входе в расчетную область задавался постоянный расход и температура 25 °С. Рабочий агент считается вязкой несжимаемой средой (вода), а течение потока – трехмерное стационарное. Подвод тепла был задан граничными условиями второго рода на нижней поверхности расчетной модели (рис. 3, а). На выходе из расчетной области задаются «мягкие» граничные условия (условие продолжения решения). На остальных поверхностях задаются условия прилипания и адиабатности. Степень начальной турбулентности 5 %, в конце – 10 %. Расчет производился для различных режимов работы, характеризуемых различными расходами охладителя.

Тепловой поток был выбран исходя из геометрии теплонапряженного элемента (2×2 см) и составил 100 Вт/см². Исследуемый диапазон расходов охладителя составил от $3 \cdot 10^{-4}$ до $12 \cdot 10^{-4}$ кг/с. В пересчете на 1/5 часть элемента с нитевидными монокристаллами кремния тепловой поток составил 80 Вт.

Геометрические размеры и схема расположения монокристаллов кремния на подложке одного из решений представлены на рис. 3, б.

Теплоотводящие элементы расположены в шахматном порядке, расстояние между центрами шипов по оси абсцисс и по оси ординат составило 600 мкм. Указанное значение шага шипов обосновано технологией изготовления микроканальных элементов на основе монокристаллов кремния.

Для проведения математического моделирования использовался специализированный расчетный комплекс Ansys Fluent v. 15, предназначенный для численного решения уравнений движения жидкости и теплообмена в интересуемой расчетной области, что позволило снизить трудоемкость и сократить длительность расчетов.

Алгоритм использования Ansys Fluent для решения поставленной задачи заключается в следующем. На первом этапе осуществляется импорт построенной 3D-модели исследуемого объекта в решатель Fluent;

на втором – декомпозиция расчетной области и построение сетки, оценивается ее качество; на третьем этапе необходимо определить граничные условия, выбрать параметры расчета, свойства материалов, выбор дополнительных моделей для моделирования турбулентности; на четвертом производится решение поставленной задачи. С целью корректности расчетов учитывалось влияние подводящих и отводящих коллекторов.

Для расчетной области была сгенерирована сетка, имеющая следующие параметры: тип сетки – тетрагональная; размеры ячеек – min $3,793176 \cdot 10^{-17}$ м, max $2,098848 \cdot 10^{-11}$ м; параметр достаточности сетки (aspect ratio) – max 20,157.

Результаты численного моделирования. По результатам проведенного вычислительного эксперимента были получены картины распределения давления, скорости и температуры охладителя для различных областей и нескольких режимов работы. На рис. 4–12 представлены результаты для расхода 0,00065 кг/с. Аналогичные результаты были получены для диапазона расходов от $3 \cdot 10^{-4}$ до $12 \cdot 10^{-4}$ кг/с.

Результаты показывают, что наблюдается симметричное течение охладителя относительно стенок. При малых расходах течение носит ламинарный характер. По мере роста расхода наблюдаются отдельные отрывные течения вблизи шипов, но в целом не наблюдается перехода к турбулентному течению. Установлено возникновение протяженных застойных зон течения за задней поверхностью шипа. При этом их величина может достигать расстояния между шипами. Сокращение застойной зоны (примерно до 1/2 расстояния между шипами) возможно за счет увеличения расхода охладителя либо за счет более частой «высадки» шипов на подложке. Установлено, что температура шипов существенно отличается от температуры охладителя, что может приводить к локальному перегреву.

На рис. 9 представлены зависимости перепада давления в теплообменнике и средней температуры каркаса и потока охладителя, причем температура потока охладителя определялась по среднему значению на площади выхода охладителя, а температура каркаса – по среднему значению температуры в его полном объеме.

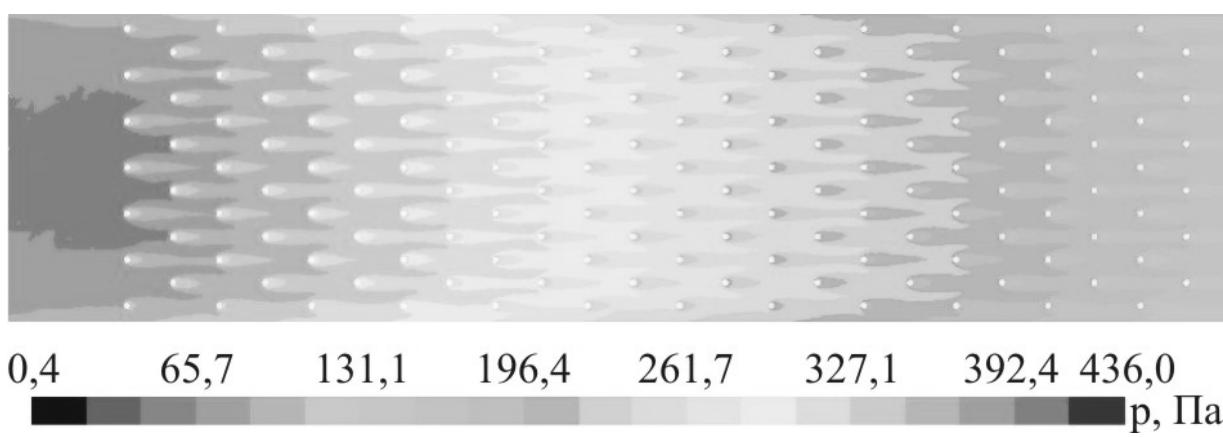


Рис. 4. Распределение давления в потоке (вид сверху)

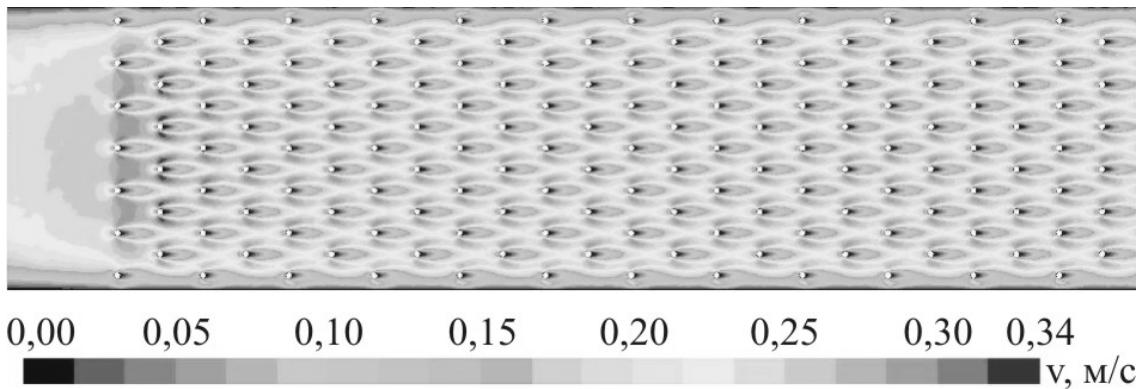


Рис. 5. Распределение скоростей в потоке (вид сверху)

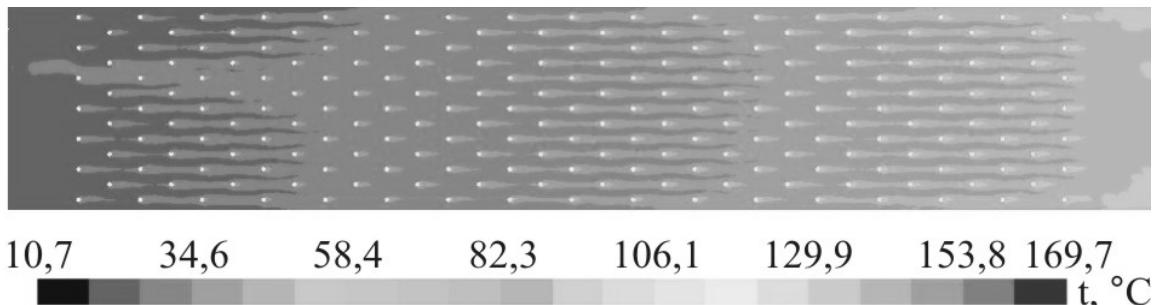


Рис. 6. Распределение температур в потоке (вид сверху)

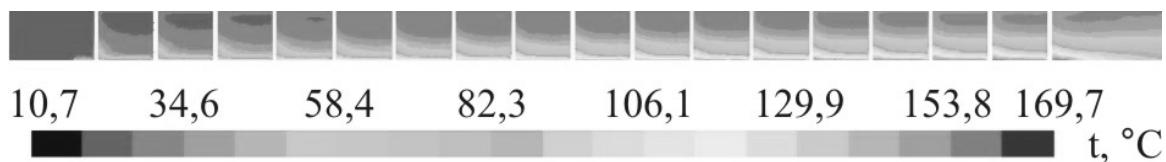


Рис. 7. Распределение температур в потоке (вид спереди)

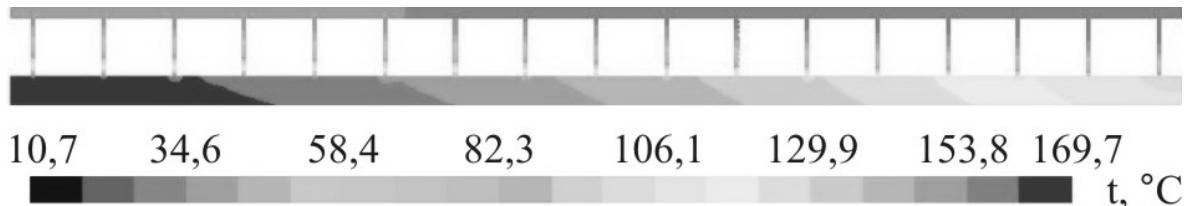


Рис. 8. Распределение температур в каркасе (вид спереди)

Для оценки «работоспособности» шипов и с целью дальнейшей оптимизации высоты шипов были взяты отдельно выбранные шипы, нумерация которых представлена на рис. 10.

Распределение температур вдоль центральной оси шипа для одного из режимов работы (расход охладителя 0,00035 кг/с) представлено на рис. 11.

Проведенные исследования показали, что микроканальные теплообменники на основе нитевидных монокристаллов кремния обладают большим потенциалом теплосъема, чем их аналоги на основе пористых теплообменных элементов.

Полученные данные показывают, что увеличение расхода охладителя не всегда ведет к эффективному охлаждению теплонапряженных поверхностей теплообменника, так как прогрев теплоносителя идет только в нижней его части, что создает предпосылки для

разработки более эффективной конструкции теплообменника, в том числе переменного шага шипов на различных участках. Большая высота теплоотводящих элементов с увеличением расхода охладителя далеко не всегда повышает эффективность охлаждения, а зачастую приводит к дополнительным затратам на транспортировку охладителя через матрицу монокристаллов кремния.

Очевидно, что при расходах охладителя в диапазоне от $3 \cdot 10^{-4}$ до $12 \cdot 10^{-4}$ кг/с наблюдается существенное различие между температурой охладителя и шипа. В областях с высоким расходом, свыше $9 \cdot 10^{-4}$ кг/с, температура шипа не превышает 100 °C, что делает работу элемента охлаждения однофазной и приводит к надежному охлаждению. При этом величина гидравлического сопротивления в абсолютном выражении становится сопоставимой с сопротивлением

пористых теплообменных элементов с межканальной транспирацией охладителя. Решение данной проблемы может быть устранено за счет применения теплообменных элементов с межканальной транспирацией охладителя (см. рис. 2).

В области более низких расходов наблюдается повышение температуры шипа более 100 °C. Очевидно, что в данном случае необходимо повышать статиче-

ское давление в системе либо изменять геометрическое расположение шипов во избежание локального перегрева и возможного фазового перехода в областях, близких к области нагрева. При этом средняя температура потока не превышает температуру фазового перехода. Распределение температуры охладителя за шипами показано на рис. 12.

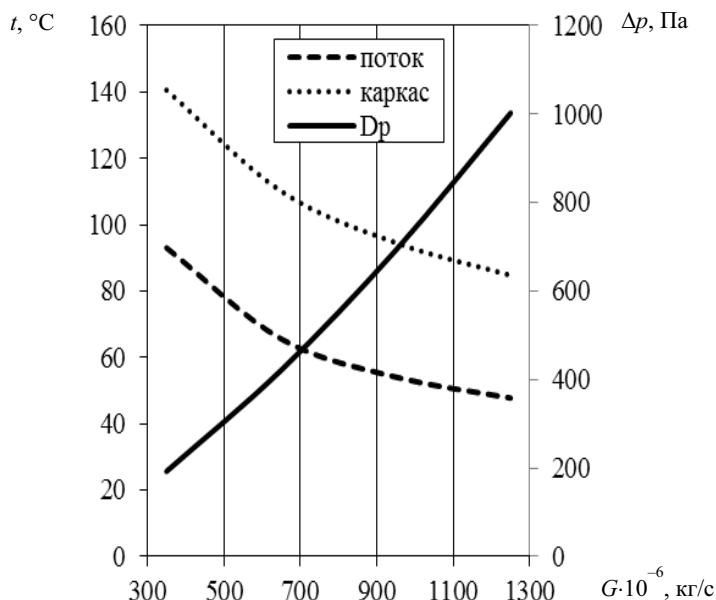


Рис. 9. График зависимостей температур и перепада давлений

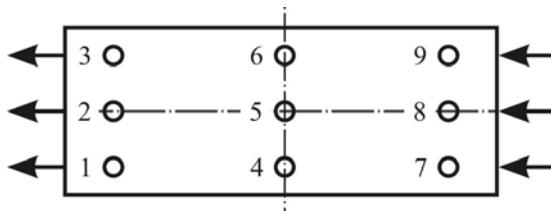


Рис. 10. Нумерация и расположение исследуемых шипов

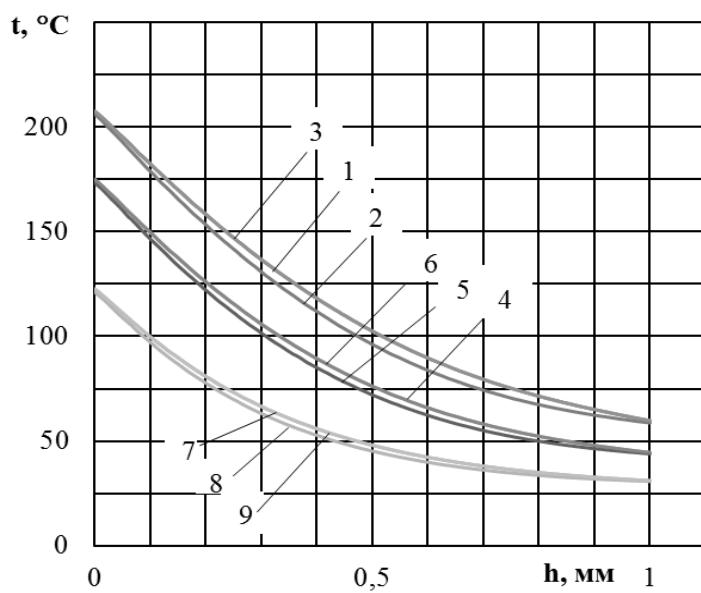


Рис. 11. Зависимость температуры шипов от высоты

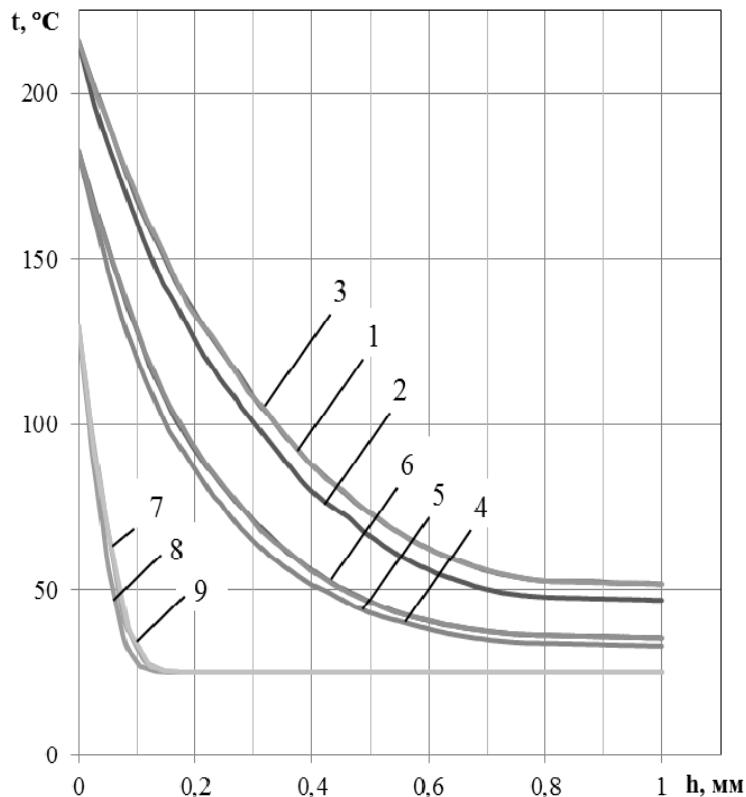


Рис. 12. Зависимость температуры охладителя за шипами по высоте канала

Из графика видно, что максимальное изменение температуры охладителя происходит при высоте канала от 0,3 до 0,7 мм и более.

Заключение. Таким образом, высота монокристаллического шипа свыше 0,7 мм позволяет теплообменнику работать при относительно небольшом гидравлическом сопротивлении, при этом существенно не влияя на теплоперенос и отводимый тепловой поток. На начальном гидродинамическом участке высота шипа может быть снижена до величины от 0,2 до 0,3 мм, что повышает общую эффективность работы микроканального теплообменника.

Слишком большой подводимый тепловой поток и невысокая скорость движения охладителя могут привести к его закипанию, что недопустимо в данном случае. В случае фазового перехода в критических режимах работы конструкция должна обеспечивать надежный отвод газообразной фазы, исключая локальные перегревы. Это также создает предпосылки для дальнейшей оптимизации конструкции.

Благодарности. Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации, № 14.577.21.0202.

Acknowledgments. This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation № 14.577.21.0202.

Библиографические ссылки

1. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах : монография / Б. В. Дзюбенко [и др.] // М. : ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2008. 532 с.

2. Разработка и моделирование микроканальных систем охлаждения : монография / Д. А. Коновалов [и др.] // Воронеж : Воронеж. гос. техн. ун-т, 2013. 222 с.

3. Определение перспективных направлений создания гибридных теплообменников для систем охлаждения электронной аппаратуры и оценка эффективности их работы / И. Г. Дроздов [и др.] // Российская национальная конференция по теплообмену : материалы пятой Рос. нац. конф. по теплообмену (25–29 окт. 2010, г. Москва). В 8 т. Т. 8 / Московский энергетический ин-т (технический ун-т). 2010. С. 151–154.

4. Об одном подходе к созданию модели интегрированного теплообменника / Д. П. Шматов [и др.] // Тепловые процессы в технике. 2012. Т. 4, № 5. С. 205–208.

5. Моделирование нестационарного теплообмена в пористых элементах систем тепловой защиты с использованием программного комплекса FLOWVISION / Д. А. Коновалов [и др.] // Вестник ВГТУ. 2011. Т. 7, № 4. С. 143–147.

6. Пат. 58788 Российская Федерация. МПК⁷ H 01 L 23/34. Устройство охлаждения для электронных компонентов / Дроздов И. Г., Кожухов Н. Н., Мозговой Н. В., Коновалов Д. А., Шматов Д. П. № 2006113838/22 ; заявл. 24.04.2006 ; опубл. 27.11.2006, Бюл. № 33. 5 с.

7. Пат. 51441 Российская Федерация. МПК⁷ H 01 L 23/34. Устройство охлаждения электронных компонентов / Дроздов И. Г., Мозговой Н. В., Шматов Д. П., Кожухов Н. Н. № 2005121936/22 ; заявл. 11.07.2005 ; опубл. 10.02.2006, Бюл. № 4. 4 с.

8. Пат. 2440641 Российская Федерация. МПК⁷ H 01 L 23/34. Устройство отвода теплоты от кристалла

полупроводниковой микросхемы / Савинков А. Ю., Дроздов И. Г., Шматов Д. П., Дахин С. В., Коновалов Д. А., Кожухов Н. Н., Небольсин В. А. № 2010146036/28 ; заявл. 10.11.2010 ; опубл. 20.01.2012, Бюл. № 2. 12 с.

9. Исследование нестационарного теплообмена в микроканальных теплообменных элементах на основе нитевидных кристаллов кремния / Д. А. Коновалов [и др.] // Российская национальная конференция по теплообмену : материалы шестой Рос. нац. конф. по теплообмену (27–31 окт. 2014, г. Москва). В 8 т. Т. 3 / Московский энергетический ин-т (технический ун-т). 2014. С. 71–72.

10. Моделирование процессов гидродинамики течения охладителя вnanoструктурах на основе нитевидных кристаллов кремния / Д. А. Коновалов [и др.] // Вестник ВГТУ. 2013. Т. 9, № 3. С. 30–37.

11. Белов К. И., Жуков В. М., Кузма-Кичта Ю. А. Интенсификация теплообмена при кипении жидкостей на сферах с керамическими субмикронными покрытиями на основе AL_2O_3 // Школа-семинар : материалы школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А. И. Леонтьева (24–29 мая 2015, г. Звенигород) / Московский энергетический ин-т (технический ун-т). 2015. С. 281–284.

12. Исследование кипения при естественной циркуляции в трубе с рельефом из наночастиц / Ю. А. Кузма-Кичта [и др.] // Российская национальная конференция по теплообмену : материалы шестой Рос. нац. конф. по теплообмену (27–31 окт. 2014, г. Москва). В 8 т. Т. 2 / Московский энергетический ин-т (технический ун-т), 2014. С. 55–56.

13. Ribatski G. A Critical overview on the recent literature concerning flow boiling and two-phase flows inside microscale channels // Exp. Heat Trans. 2013. 26 (2–3). Pp. 198–246.

14. Белов И. А., Исаев С. А. Моделирование турбулентных течений : учеб. пособие / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2001. 106 с.

15. Морозов И. И., Ляскин А. С. Введение в численные методы вычислительной гидроаэродинамики : учеб. пособие. Самара : Изд-во СГАУ, 2011. 65 с.

16. Гарбарук А. В., Стрелец М. Х., Шур М. Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений : учеб. пособие. СПб. : Изд-во Санкт-Петербургского политехн. ун-та, 2012. 88 с.

17. Грицкевич М. С. Гарбарук А. В. Некоторые особенности применения гибридных RANS-LES подходов при расчете турбулентных течений на неструктурных сетках // Школа-семинар : материалы школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А. И. Леонтьева (24–29 мая 2015, г. Звенигород) / Московский энергетический ин-т (технический ун-т). 2015. С. 40–44.

transfer at the macro-, micro - and nanoscale]. Moscow, FGUP “TsNIIATOMINFORM” Publ., 2008, 532 p.

2. Konovalov D. A., Drozdov I. G., Shmatov D. P., Dakhin S. V., Kozhukhov N. N. Razrabotka i modelirovaniye mikrokanal'nykh sistem okhlazhdeniya [Development and modeling of microchannel cooling systems]. Voronezh, VSTU Publ., 2013, 222 p.

3. Drozdov I. G., Konovalov D. A., Shmatov D. P., Kozhukhov N. N., Dakhin S. V. [Definition of perspective directions of the development of hybrid heat exchangers for cooling systems of electronic equipment and evaluating their performance: proceedings of the fifth Russian national conference on heat transfer]. Trudy pyatoy Rossiyskoy natsional'noy konferentsii po teploobmenu. [Fifth national conference on heat and mass transfer]. Moscow, 2010, Vol. 8, P. 151–154 (In Russ.).

4. Shmatov D. P., Drozdov I. G., Konovalov D. A., Dakhin S. V., Kozhukhov N. N. [About one approach to creation of model of integrated heat exchanger]. Teplovye processy v tehnike. 2012, Vol. 4, No 5, P. 205–208 (In Russ.).

5. Konovalov D. A., Shmatov D. P., Drozdov I. G., Dakhin S. V. [Modeling of transient heat transfer in porous elements of the thermal protection using the software complex FLOWVISION]. Vestnik VGTU. 2011, Vol. 7, No 4, P. 143–147 (In Russ.).

6. Drozdov I. G., Kozhukhov N. N., Mozgovoy N. V., Konovalov D. A., Shmatov D. P. Ustroystvo okhlazhdeniya dlya elektronnykh komponentov [Cooling device for electronic components]. Patent RF, No. 58788, 2006.

7. Drozdov I. G., Mozgovoy N. V., Shmatov D. P., Kozhukhov N. N. Ustroystvo okhlazhdeniya elektronnykh komponentov [Cooling device for electronic components]. Patent RF, No. 51441, 2006.

8. Savinkov A. Yu., Drozdov I. G., Shmatov D. P., Dakhin S. V., Konovalov D. A., Kozhukhov N. N., Nebol'sin V. A. Ustroystvo otvoda teploty ot kristalla poluprovodnikovoy mikroskhemy [Device removal of heat from the crystal of semiconductor chips]. Patent RF, No. 2440641, 2012.

9. Konovalov D. A., Lazaren'ko I. N., Shmatov D. P., Drozdov I. G. [The study of unsteady heat transfer in microchannel heat transfer elements with whiskers of silicon]. Trudy shestoy Rossiyskoy natsional'noy konferentsii po teploobmenu. [Proceedings of the Sixth national conference on heat and mass transfer]. Moscow, 2014, Vol. 3, P. 71–72 (In Russ.).

10. Konovalov D. A., Lazarenko I. N., Drozdov I. G., Shmatov D. P. [Modeling of the hydrodynamics of a flow of the refrigerant in the nanostructures based on filamentary crystals of silicon]. Vestnik VGTU. 2013. Vol. 9. No 3, P. 71–72 (In Russ.).

11. Belov K. I., Zhukov V. M., Kuzma-Kichta Yu. A. [Intensification of heat exchange during boiling of liquids in the fields with submicron ceramic coatings based on AL_2O_3]. Trudy XX Shkoly-seminara molodykh uchenykh i spetsialistov pod rukovodstvom akademika RAN A. I. Leont'eva. [Problems of gas dynamics and heat and mass transfer in power plants: proceedings of XX School-seminar of young scientists and specialists under leadership of academician A. I. Leont'ev]. Moscow, 2015, P. 281–284 (In Russ.).

References

- Dzyubenko B. V., Kuzma-Kichta Yu. A., Leont'ev A. I., Fedik I. I., Kholpanov L. P. Intensifikatsiya teplo- i massoobmena na makro-, mikro- i nanomasshtabakh. [Intensification of heat and mass

12. Kuzma-Kichta Yu. A., Lavrikov A. V., Stenina N. A., J. Hammerschmit Sh. Sholl' [The study of boiling in natural circulation in the tube with a relief of nanoparticles]. *Trudy shestoy Rossiyskoy natsional'noy konferentsii po teploobmenu*. [Proceedings of the Sixth national conference on heat and mass transfer]. Moscow, 2014, Vol. 2, P. 55–56 (In Russ.).
13. Ribatski G. A Critical overview on the recent literature concerning flow boiling and two-phase flows inside microscale channels. *Experimental Heat Transfer*, 2013, 26 (2–3), P. 198–246.
14. Belov I. A., Isaev S. A. *Modelirovaniye turbulentnykh techeniy* [Modeling of turbulent flows]. 2001, St.Petersburg, BGTU Publ., 106 p.
15. Morozov I. I., Lyaskin A. S. *Vvedenie v chislennye metody vychislitel'noy gidroaerodinamiki: ucheb.-posobie* [Introduction to numerical methods of computational fluid dynamics: a tutorial]. 2011, Samara, SGAU Publ., 65 p.
16. Garbaruk, A. V., Strelets M. Kh., Shur M. L. *Modelirovaniye turbulentnosti v raschetakh slozhnykh techeniy* [Modeling turbulence in complex current calculations: proc. manual]. 2012, St.Petersburg, Politechnic Publ., 88 p.
17. Gritskevich M. S. Garbaruk A. V. [Some features of the use of hybrid RANS-LES approaches to computation of turbulent flows on unstructured grids]. *Trudy XX Shkoly-seminara molodykh uchenykh i spetsialistov pod rukovodstvom akademika RAN A. I. Leont'eva*. [Problems of gas dynamics and heat and mass transfer in power plants: proceedings of XX School-seminar of young scientists and specialists under leadership of academician A. I. Leontiev]. Moscow, 2015, P. 40–44 (In Russ.).

© Коновалов Д. А., Кожухов Н. Н., Дроздов И. Г., 2016

ОБЪЕКТИВ КАМЕРЫ СОПРОВОЖДЕНИЯ ДЛЯ СПУТНИКОВОГО ЛАЗЕРНОГО ДАЛЬНОМЕРА ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА

Е. Г. Лапухин*, В. М. Владимиров, Л. В. Границкий

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

Рассмотрены варианты расчета комбинированной оптической системы для лазерного спутникового дальномера, включающей расширитель лазерного пучка и объектив камеры сопровождения в оптическом диапазоне. Расширитель лазерного пучка представляет катадиоптрическую систему диаметром 320 мм, имеющую 7-кратное увеличение для длин волн от 400 до 2000 нм дифракционного качества по всему полю зрения без дополнительной перефокусировки. В обратном ходе лучей расширитель играет роль питающей оптики объектива в оптическом диапазоне. Эквивалентное фокусное расстояние объектива равно 1753 мм. Рассмотрены два варианта объектива: с использованием обычных марок стекла и с использованием стекла, имеющего особый ход дисперсии. Приводится анализ изображения точечных источников и распределение световой энергии в пятне рассеяния точечного источника. В предложенной оптической системе используется фокус Куде, позволяющий использовать аппаратуру, установленную стационарно. При расчете оптической системы радиусы кривизны всех сферических поверхностей выбраны из рядов значений, рекомендуемых ГОСТ 1807–75, что удешевляет технологию изготовления.

Ключевые слова: спутниковый лазерный дальномер, объектив, расширитель лазерного пучка.

Vestnik SibGAU
Vol. 17, No. 1, P. 147–153

CAMERA LENS FOR A SATELLITE LASER RANGING FOR VISUAL TARGETTING OPTICAL RANGE

E. G. Lapukhin*, V. M. Vladimirov, L. V. Granitskiy

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

In the article the authors present the result of calculating of combined optical system for a satellite laser ranging station. The calculated system includes extender of laser rays and lens of control-camera in optical band. The extender of laser rays is a catadioptric system over 320 millimeters and has sevenfold increase for the lengths of waves from 400 to 2000 nm without refocusing. In reverse the motion of rays the extender of laser of bunch is used as a part of camera lens in optical band. Equivalent focal length of a lens is 1753 mm. The authors presented two options of a lens of camera: lens containing usual optical glass and lens containing optical glass with special dispersion path: special crown (OK4) and special flint (OF1).

The calculated systems can be used for a location of satellites by two laser lengths of waves. This method allows to define distance from satellite to us more precisely.

In the article the analysis of the RMS spot diameter and radial energy distribution of spot has been shown. In our optical system we use Coude focus, therefore all equipment is separated from rotator. All surfaces of lenses in system are spherical. We take radiiuses of surfaces from GOST 1807–75 of the Russian Federation. Due to the chosen radiiuses and glasses from catalogue of the LZOS the cost of production will become less.

Keywords: Satellite Laser Ranging, camera lens, extender of laser.

Введение. В настоящее время наибольшую точность в измерении дальности до космического аппарата дают спутниковые лазерные локационные станции (спутниковые лазерные дальномеры). По измеренной дальности и моментам времени измерения

определяется вектор состояния спутника для дальнейшего прогноза его местоположения [1]. В свою очередь, использование дисперсионного метода в определении поправки среднего коэффициента преломления атмосферы, основанного на одновременной

локации лазерными импульсами, разнесенными по длине волны, позволяет повысить точность в определении дальности спутника [2]. Для применения дисперсионного метода необходим расчет оптических систем дальномера, работающих одновременно на двух длинах волн без дополнительной перефокусировки.

Оптическая составляющая спутниковых лазерных дальномеров выполняет следующие задачи [3–5]: а) расширяет (коллимирует) лазерный пучок; б) принимает отраженные от спутника лазерные импульсы; в) осуществляет визуальное сопровождение спутника. Для выполнения этих задач возможна реализация оптических систем как отдельными блоками, так и комбинированными. Примером поблочной реализации является лазерный дальномер ЛД-2 [6]. В нем оптическая составляющая реализована в трех отдельных блоках: расширитель (коллиматор) лазерного пучка, два рефлектора для регистрации эхо-сигнала и телескоп для визуального сопровождения цели. В дальномере «Сажень-ТМ» расширитель лазерного пучка, приемная оптическая система и оптическая система для сопровождения спутника выполнены в виде одного оптического блока. Диаметр системы при этом определяется апертурой оптической системы, принимающей отраженные от спутника эхо-сигналы. И отдельно выполнен оптический блок гидрования, который позволяет по ярким звездам соотнести инерциальную систему координат с системой координат лазерного дальномера [7].

В оптической схеме дальномера «Симеиз-1873» Крымской астрофизической обсерватории, расположенного на горе Кошка, роль расширителя лазерного пучка выполняет приемная оптическая двухзеркальная система диаметром 1 м^2 [8], причем выпуклое вторичное зеркало выполнено в виде отрицательной линзы Манжена. В данном дальномере лазерный излучатель с рассеивающей линзой и фотодетектор эхо-сигнала с собирающей линзой расположены в фокусе Куде, который фиксирован в пространстве. Это позволяет использовать аппаратуру, установленную стационарно.

Разработка и расчет оптических комбинированных систем для лазерных дальномеров, работающих в широком диапазоне длин волн, представляет довольно интересную задачу, и ее решение позволяет увеличить точность определения дальности космического аппарата и минимизировать габаритно-массовые характеристики лазерного спутникового дальномера.

Целью работы являлся расчет комбинированной оптической системы, которая включает расширитель лазерного пучка, оптику приема эхо-сигнала и оптическую систему визуального сопровождения для широкой области спектра.

Структурная схема. Для достижения цели было решено произвести расчет оптической системы по структурной схеме, приведенной на рис. 1. Структурная схема представляет комбинированную оптическую систему, включающую в себя расширитель лазерного пучка для диапазона длин волн от 400 до 2000 нм, детектор эхо-сигнала с фокусирующей линзой и объек-

тив камеры сопровождения для оптического диапазона 480–644 нм.

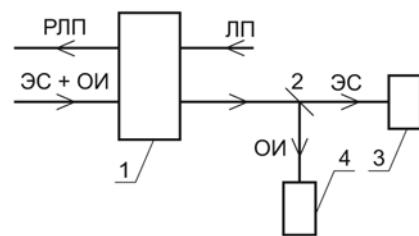


Рис. 1. Структурная схема комбинированной оптической системы спутникового лазерного дальномера: 1 – расширитель лазерного пучка; 2 – интерференционный фильтр; 3 – детектор эхо-сигнала; 4 – объектив камеры сопровождения; ЛП – лазерный пучок; РЛП – расширенный ЛП; ЭС – эхо-сигнал; ОИ – оптическое излучение

Лазерный пучок ЛП (рис. 1) проходит через расширитель лазерного пучка 1, являющийся, как правило, афокальной оптической системой. При прохождении через него происходит увеличение апертуры лазерного луча. Расширенный в диаметре лазерный пучок РЛП направлен в сторону спутника, на котором установлены уголковые отражатели оптического диапазона. После отражения эхо-сигнал ЭС направлен в обратном направлении (в сторону лазерного дальномера). Далее ЭС проходит через оптическую систему расширителя в обратном ходе лучей, проходит через интерференционный фильтр 2 и фиксируется детектором эхо-сигнала 3, останавливая при этом счетчик временных интервалов. Наряду с ЭС через оптику расширителя в обратном ходе лучей принимается оптическое излучение ОИ всего оптического диапазона. ОИ, не пройдя через фильтр 2, направляется в объектив камеры сопровождения 4.

Расширитель лазерного пучка. В качестве расширителя лазерного пучка используется рассчитанный нами ранее зеркально-линзовый расширитель [9], который является зеркально-линзовой афокальной оптической системой (рис. 2).

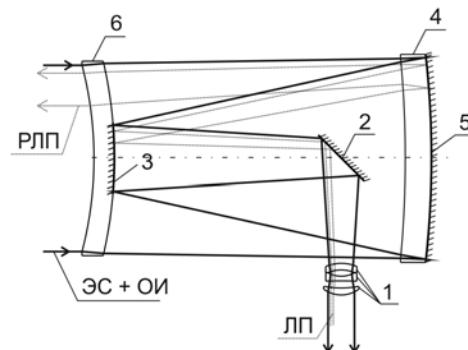


Рис. 2. Оптическая схема расширителя лазерного пучка, используемого в комбинированной схеме для спутникового лазерного дальномера: 1 – окулярный трехлинзовый блок; 2 – плоское диагональное зеркало; 3 – зеркальное покрытие центральной части апертурного мениска; 4 – зеркало Манжена; 5 – зеркальное покрытие зеркала Манжена; 6 – апертурный мениск

Лазерный пучок после прохождения окулярного блока 1 начинает расходиться. После отражения на зеркале 2 направление расходящегося лазерного пучка меняется на 90° в сторону апертурной линзы 6, центральная часть которой имеет отражающее покрытие 3. Отразившись от покрытия 3, пройдя через линзу Манжена 4 и отразившись от зеркального покрытия 5, лазерный луч становится слаборасходящимся. После прохождения через апертурный мениск 6 пучок становится параллельным и увеличенным в диаметре.

Основные характеристики расширителя лазерного пучка приведены в табл. 1.

Таблица 1
Основные характеристики расширителя лазерного пучка

Диаметр входного зрачка, мм	42,8
Диаметр выходного зрачка, мм	300
Диапазон длин волн, нм	400–2000
Расходимость луча 400 нм, рад	$\sim 2,5 \times 10^{-5}$
1064 нм, рад	$\sim 11,6 \times 10^{-5}$
Увеличение, крат	7
Поле зрения, °	0,4

Данный расширитель при диаметре апертурной линзы 320 мм и семикратном увеличении в обратном ходе лучей служит световой поток до диаметра 42,8 мм. Это позволяет использовать его не только как питающую оптику для детектора эхо-сигнала, но и как питающую оптику для объектива сопровождения. Расходимость луча для всего оптического диапазона и ближнего инфракрасного (до 2000 нм) – дифракционная и не требует дополнительной перефокусировки, что позволяет его использовать при одновременном расширении лазерных пучков с разнесенными длинами волн. При этом на входе непараллельность лазерного пучка с оптической осью расширителя в пределах $\pm 0,2^\circ$ не оказывается на его расходимость при выходе из расширителя. Диагональное зеркало 2 на рис. 2 выносит окулярный блок в фокус Несмита, что впоследствии позволит использовать фокус Куде в лазерном дальномере. В данном расширителе все поверхности линз и зеркал сферические за исключением плоского зеркала D_2 . Апертурный мениск и зеркало Манжена изготовлены из оптического стекла марки ЛК7, линзы окулярного блока – из стекла марок ЛК7, К8, ТФ10 [10–12].

Отсекатели паразитных лучей в виде усеченных конусов (обычно устанавливают в двухзеркальных системах типа кассегренова) в расширителе лазерного пучка не требуются, так как диагональное зеркало 2 (см. рис. 2) имеет меньший размер, чем размер сечения теневого конуса для паразитных лучей.

Объектив камеры сопровождения. Авторами рассчитан объектив камеры сопровождения в двух вариантах. Основное различие вариантов оптических систем состоит в количестве линз в системе и в марках используемого оптического стекла. В первом варианте используются обычные стекла, а во втором варианте содержатся линзы, изготовленные из стекла с особым ходом дисперсии: особый флинт ОФ1 [13] и особый крон ОК4 [14]. Основные характеристики объективов, в состав которых входит вышеописанный расширитель лазерного пучка в обратном ходе лучей, приведены в табл. 2.

На рис. 3 приведены два варианта оптических схем камеры сопровождения в оптическом диапазоне. Расширитель лазерного пучка в полном объеме на схемах не показан, так как он рассматривался выше. На схемах обозначена лишь его часть – окулярный трехлинзовый блок 1.

Принцип работы рассчитанных объективов следующий. Лазерный источник ЛИ генерирует лазерный пучок ЛП, который с помощью плоских зеркал D_1 и D_2 направляется в окулярный трехлинзовый блок расширителя лазерного пучка. Лазерный импульс после прохождения расширителя, отражения от уголковых отражателей эхо-сигналом проходит в обратном ходе лучей через расширитель, отражается от зеркала D_2 и проходит через прозрачный для него диагональный фильтрующий элемент ДФЭ. Линза 2 фокусирует ЭС на регистрирующей поверхности фотодетектора, который дает команду на завершение счета интервалов времени. Фокусное расстояние линзы 2 определяется конструктивными размерами.

Одновременно с ЭС в расширителе в обратном ходе лучей поступает оптическое излучение, которое, пройдя через расширитель, поступает на плоское зеркало D_2 . Отразившись от него и от поверхности ДФЭ, с помощью линз фокусирующего блока оптического излучения 3 оптическое излучение фокусируется на регистрирующей поверхности прибора с зарядовой связью ПЗС.

Поэлементные характеристики фокусирующего блока 3 (рис. 3) для первого и второго варианта приведены в табл. 3 и 4 соответственно. В таблицах указаны радиусы кривизны поверхностей, световой диаметр линз и их толщина, значение воздушных промежутков между линзами и марка стекла, из которого они изготовлены. Отсчет номеров поверхностей фокусирующего блока оптического излучения 3 на рис. 3 начинается с первой поверхности от диагонального фильтрующего элемента ДФЭ в направлении фокальной плоскости. Радиус кривизны для всех сферических поверхностей выбран из списка ГОСТ 1807–75 [15].

Общие характеристики объектива камеры сопровождения

Характеристика	Вариант	
	№ 1	№ 2
Диаметр входного зрачка, мм	319,5	319,5
Эквивалентное фокусное расстояние, мм	1752,6	1753,6
Фокальное отношение	5,49	5,49

Таблица 2

Окончание табл. 2

Характеристика	Вариант	
	№ 1	№ 2
Масштаб в фокальной плоскости, мкм / "	8,5	8,5
Основной спектральный диапазон, нм	480–644	480–644
Кривизна поля зрения	Плоскость	Плоскость
Угловой диаметр поля зрения, градусы	0,3	0,3
Линейный диаметр поля зрения, мм	9,2	9,2
Задний отрезок, мм	117,01	225,12
Среднеквадратический диаметр изображения точечного источника (центр поля / край поля), мкм	7,5 / 12,0	5,5 / 6,7
Диаметр пятна рассеяния, в пределах которого находится 80 % световой энергии изображения точечного источника (центр поля / край поля), мкм	8,6 / 14,4	7,9 / 7,8
Типы поверхностей	Сфера	Сфера
Количество линз	5	4
Марки используемых стекол	ТФ10, ЛК7	ОФ1, ОК4, Пл. кварц
Фокальная поверхность	Плоскость	Плоскость

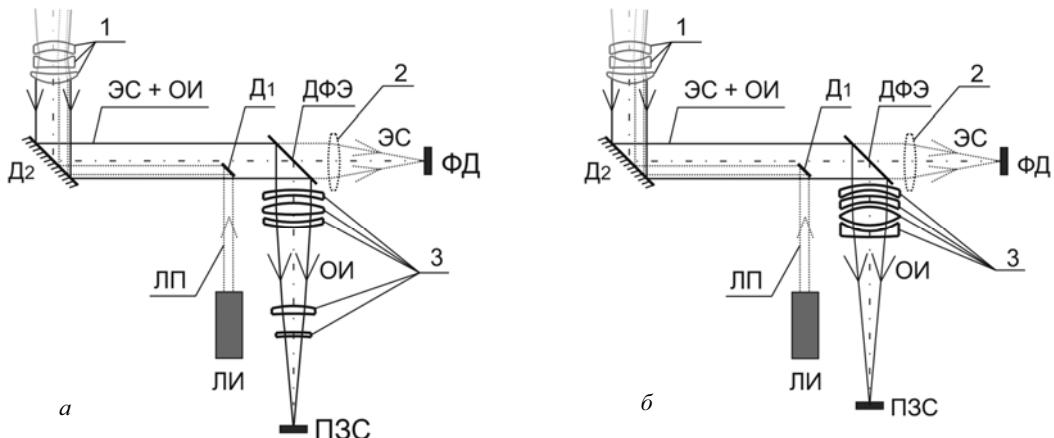


Рис. 3. Объектив камеры сопровождения:

а – вариант № 1 с 5-линзовым фокусирующим блоком; б – вариант № 2 с 4-линзовым фокусирующим блоком;
 1 – окулярный трехлинзовый блок расширителя лазерного пучка; 2 – фокусирующая линза для эхо-сигнала ЭС;
 3 – линзы фокусирующего блока оптического излучения ОИ; ЛИ – лазерный излучатель; ЛП – лазерный пучок;
 Д1, Д2 – плоские зеркала; ДФЭ – диагональный фильтрующий элемент, прозрачный для ЭС; ФД – фотодетектор;
 ПЗС – прибор с зарядовой связью

Таблица 3

Поэлементные данные фокусирующего блока для первого варианта объектива

№ поверхности	Радиус кривизны, мм	Световой диаметр, мм	Толщина, мм	Наполнение, материал
1	205,10	74,8	7	ТФ10
2	134,90	73,6	9,2	Воздух
3	126,47	75,6	15	ЛК7
4	-281,80	75,1	11,22	Воздух
5	-136,77	73,0	7	ЛК7
6	-168,27	73,1	104,36	Воздух
7	128,23	52,5	10	ЛК7
8	444,60	50,4	25	Воздух
9	389,00	42,1	5	ТФ10
10	227,00	40,9	117,11	Воздух
11	∞			

Таблица 4

Поэлементные данные фокусирующего блока для второго варианта объектива

№ поверхности	Радиус кривизны, мм	Световой диаметр, мм	Толщина, мм	Наполнение, материал
1	143,22	74,9	7,0	ОФ1
2	71,12	73,0	2,82	Воздух

Окончание табл. 4

№ поверхности	Радиус кривизны, мм	Световой диаметр, мм	Толщина, мм	Наполнение, материал
3	59,16	75,5	8,0	Кварц пл.
4	62,52	73,9	4,09	Воздух
5	75,86	75,5	25,0	ОК4
6	-69,82	73,7	2,49	Воздух
7	-63,10	71,9	8,0	Кварц пл.
8	-216,80	70,6	225,12	Воздух
9	∞			

Таблица 5

Соответствие марки стекла по каталогу ЛЗОС маркам стекла зарубежных производителей

Марка стекла		
ЛЗОС	ШОТТ (SCHOTT)	ОХАРА (OHARA)
ЛК7	FK	FSL
К8	BK7	BSL7
ТФ10	—	—
ОФ1	KF	NSL
ОК4	FK	FPL

Длина заднего отрезка (расстояние от последней оптической поверхности до приемника излучения) в обоих случаях достаточна для установки узла фокусировки, светофильтров и самого фотоприемника.

Система зеркал, состоящая из зеркала 2 (см. рис. 2) и зеркала D_2 (см. рис. 3), позволяет использовать фокус Куде. Точка фокуса в системе Куде неподвижна относительно поверхности Земли. Изображение, построенное оптической системой в фокальной плоскости, претерпевает вращение относительно оптической оси во время сопровождения цели. Использование фокуса Куде позволяет использовать стационарно установленную аппаратуру: детектор эхо-сигнала с фокусирующей линзой, объектив камеры сопровождения с фотодетектором оптического изображения и лазерный источник. Установка оборудования на станине лазерного дальномера снижает нагрузку на опорно-поворотное устройство (ОПУ), что позволяет снизить вес ОПУ.

При расчете объективов использовались марки стекла ЛК7, ТФ10, ОФ1, ОК4, изготавливаемые на Лыткаринском заводе оптического стекла, и плавленый кварц. Соответствие стекол по каталогу ЛЗОС маркам стекла зарубежных производителей представлено в табл. 5 [16]. При замене отечественных стекол на стекла зарубежных производителей возможна небольшая коррекция толщин линз и расстояний между ними.

Анализ изображения точечных источников. Диаграммы объектива для точечных источников, расположенных на оси, на угловом расстоянии $0,075^\circ$ и $0,15^\circ$ от оси, приведены на рис. 4. В верхнем правом углу указан угол поля. Сторона квадрата равна 0,05 мм. Обозначения лучей: крестики – длина волны 479,9914 нм, круг – 546,074 нм, треугольники – 643,8469 нм.

Суммарное распределение энергии в изображении точечного источника приведено на рис. 5. Круглым маркером обозначена кривая распределения на оси, треугольным – на расстоянии $0,075^\circ$ от оси, и крестиком – на угле $0,15^\circ$ от оси. В обоих случаях 100 % световой энергии укладывается в кружок диаметром ~ 30 мкм.

Фотоприемник. Назначение фотоприемника сводится к тому, чтобы преобразовать изображение в оптическом диапазоне в телевизионный сигнал и передать его на внешние устройства вывода для контроля в реальном времени слабосветящихся объектов в ночное время и объектов в условиях ночной освещения. Предполагается, что фотоприемником могут служить матричные ПЗС-приемники с кадровым переносом типа ELCM1079 производства НПП «ЭЛАР», Россия. Данный приемник представляет матричный прибор с зарядовой связью с кадровым переносом, содержащий секцию накопления 578 строк по 578 элементов размером 22 мкм, с квантовой эффективностью 40–55 %, на длинах волн 400–700 нм (данный сенсор светочувствителен в диапазоне от 250 до 1000 нм, но имеет меньшую квантовую эффективность) [17]. Учет тепловых токов (шумов) возможен при стабильной температуре сенсора благодаря элементу Пельтье, который установлен в газонаполненной камере вместе с матричным ПЗС-приемником. В данном приборе входное окно камеры выполнено из оптического кварцевого стекла толщиной 2,8 мм. Данная плоскопараллельная пластина вносит в систему дополнительную сферическую aberrацию. С помощью перефокусировки выбирается положение оптимального фокуса. Для варианта № 1 следует уменьшить расстояния от последней линзы объектива до первой поверхности кварцевого окна ПЗС-приемника не на величину толщины кварцевой пластины, а до значения 115,10 мм. Это позволит получить пятно рассеяния для интегрального света в плоскости оптимальной фокусировки для нулевого луча – 7,4 мкм, для поля $0,075^\circ$ – 9,5 мкм и на краю поля $0,15^\circ$ – 11,8 мкм. Для второго варианта расстояние от последней поверхности объектива до окна приемника должно составлять 223,21 мм. В этом положении пятно рассеяния будет для поля 0° – 6,2 мкм, для поля $0,75^\circ$ – 5,6 мкм и на краю поля $0,15^\circ$ – 5,9 мкм. При размере пикселя 22 мкм данная матрица в сочетании с рассчитанным объективом имеет масштаб 2,6 "/ пиксель.

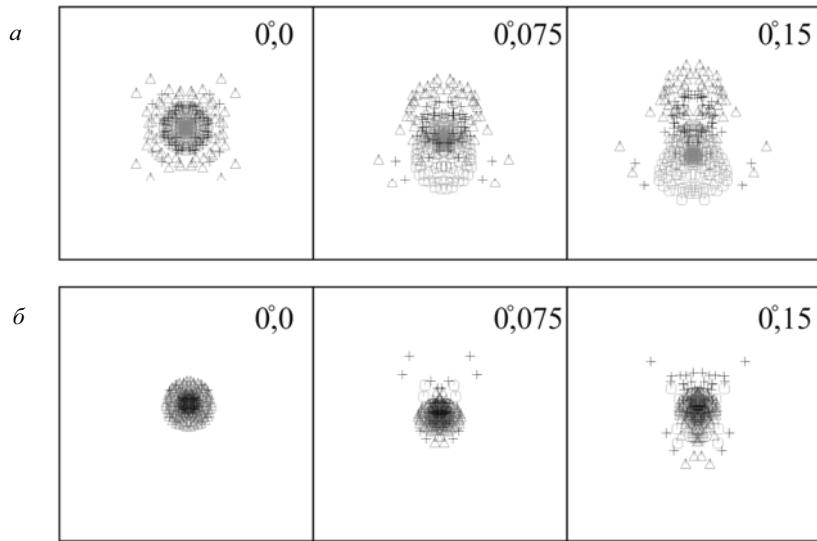


Рис. 4. Точечные диаграммы точечного источника для двух вариантов расчета:
а – первый вариант расчета объектива; б – второй вариант расчета

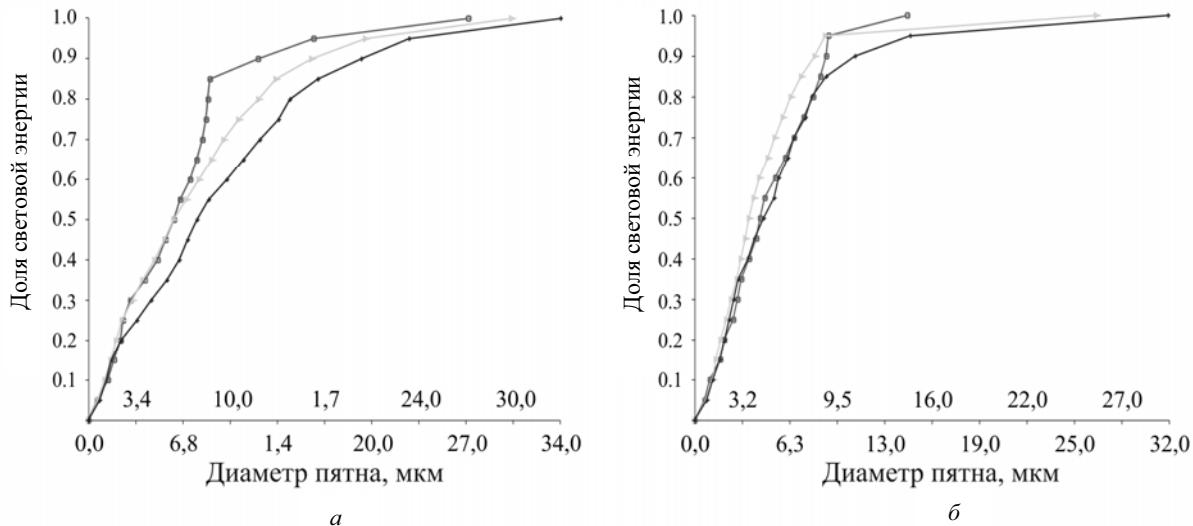


Рис. 5. Суммарное распределение световой энергии в изображении точечного источника света на оси и на угловом расстоянии $0,075^\circ$ и $0,15^\circ$ от нее:
а – распределение для первого варианта; б – распределение для второго варианта

При использовании других матричных фотоприемников, в зависимости от толщины и материала входного окна, следует пересчитывать положение плоскости наилучшей фокусировки.

Заключение. Рассчитанные нами варианты объектива сопровождения для лазерного дальномера позволяют получить в комбинированной схеме с расширителем лазерного пучка изображение точечного источника на оси размером 7,5 мкм (вариант с обычными оптическими стеклами) и 5,5 мкм (вариант с особыми стеклами, имеющими особый ход дисперсии). Для второго варианта качество изображения остается безабберационным на половине поля зрения. Комбинированная оптическая система позволяет минимизировать габаритные и массовые характеристики оптической составляющей лазерного спутникового дальномера.

Фокус Куде позволяет использовать стационарно установленную аппаратуру, т. е. для нее практически нет ограничения по весу.

Рассчитанные системы позволяют коллимировать лазерный пучок в диапазоне от 400 до 2000 нм без дополнительной перефокусировки. Благодаря этому возможно использование двулучевой локации космических аппаратов, что позволяет определить поправку в определении среднего коэффициента преломления атмосферы дисперсионным методом.

Упрощению и удешевлению процесса изготовления оптических компонентов объектива способствует отсутствие асферических поверхностей; наиболее употребительные радиусы кривизны для сферических поверхностей из списка ГОСТ 1807–75; марки оптического стекла для линз, которые выбраны из каталога отечественного производителя.

Библиографические ссылки

1. Аксёнов Е. П., Вашковъяк С. Н., Емельянов Н. В. Определение элементов орбит ИСЗ по фотографическим и лазерным наблюдениям // Труды Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга. 1980. Т. 49. С. 90–115.
2. Degnan J. J. Millimeter Accuracy Satellite Laser Ranging // A Review Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Technology / D. E. Smith and D. L. Turcotte (Eds.). AGU Geodynamics Series. 1993. Vol. 25. Pp. 133–162.
3. Козинцев В. И., Белов М. Л., Орлов В. М. Основы импульсной лазерной локации. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. 571 с.
4. Лазерные приборы и методы измерения дальности / В. Б. Бокшанский [и др.]. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. 92 с.
5. Лазерная дальномерия / Л. А. Аснис [и др.]. М. : Радио и связь, 1995. 256 с.
6. Четырехосный полуавтоматический спутниковой лазерный дальномер ЛД-2. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Рига, 1983.
7. Лазерный дальномер «Сажень-ТМ-Д» [Электронный ресурс] // АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения» : сайт. 2015. URL: <http://www.npk-spp.ru/deyatelnost/lazernaya-set/115-2009-04-13-11-00-28.html> (дата обращения: 24.11.2015).
8. Project to Optimize the Simeiz-1873 LSR Optical System / O. A. Minin [et al.] // Bull. of the Crimean Astrophys. Obs. 2008. Vol. 104, No. 1. P. 199–203.
9. Пат. 157295, МПК G 02 B 23/02 (2006.1). Зеркально-линзовый расширитель лазерного пучка / Лапухин Е. Г., Владимиров В. М., Границкий Л. В. 2015119688/28 ; заявл. 25.05.2015 ; опубл. 27.11.2015, Бюл. № 33.
10. Glass type LK7 [Электронный ресурс]. URL: http://lzos.ru/glass_pdf/LK7.pdf (дата обращения: 24.11.2015).
11. Glass type K8 [Электронный ресурс]. URL: http://lzos.ru/glass_pdf/K8.pdf (дата обращения: 24.11.2015).
12. Glass type TF10 [Электронный ресурс]. URL: http://lzos.ru/glass_pdf/TF10.pdf (дата обращения: 24.11.2015).
13. Glass type OF1 [Электронный ресурс]. URL: http://lzos.ru/glass_pdf/OF1.pdf (дата обращения: 24.11.2015).
14. Glass type OK4 [Электронный ресурс]. URL: http://lzos.ru/glass_pdf/OK4.pdf (дата обращения: 24.11.2015).
15. ГОСТ 1807–75. Радиусы сферических поверхностей оптических деталей. Ряды числовых значений. Введ. 01.01.1977. М. : Изд-во стандартов. 19 с.
16. Catalogue of glass LZOS [Электронный ресурс]. URL: <http://lzos.ru/content/view/77/29/> (дата обращения: 24.11.2015).
17. Матричный ФПЗС ELCM1079 [Электронный ресурс] // ЗАО «НПП «ЭЛАР» : сайт. 2015. URL: <http://www.npp-alar.ru/upload/ELCM1079r.pdf> (дата обращения: 24.11.2015).

References

1. Aksenov E. P., Vashkov'yak S. N., Emel'yanov N. V. [Definition of elements of orbits of an artificial satellite on photographic and laser observations]. *Trudy gosudarstvennogo astronomicheskogo instituta im. P. K. Shternberga*. 1980, Vol. 49, P. 90–115 (In Russ.).
2. Degnan J. J. Millimeter Accuracy Satellite Laser Ranging: A Review, in Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Technology, D. E. Smith and D. L. Turcotte (Eds.), *AGU Geodynamics Series*, 1993, Vol. 25, P. 133–162.
3. Kozintsev V. I., Belov M. L., Orlov V. M. *Osnovy impul'snoy lazernoy lokatsii* [Bases of a laser location]. Moscow, MGTU Publ., 2010, 571 p.
4. Bokshanskiy V. B., Bondarenko D. A., Vyazovikh M. V. at al. *Lazernye pribory i metody izmereniya dal'nosti* [Laser devices and methods of measurement of range]. Moscow, MGTU Publ., 2012, 92 p.
5. Asnis L. A., Vasil'ev V. P., Volkonskiy V. B. *Lazernaya dal'nometriya* [Laser distances measurement]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1995, 256 p.
6. *Chetyrekhosnyy poluavtomaticheskiy sputnikovyy lazernyy dal'nomer LD-2. Tekhnicheskoe opisanie i instruktsiya po ekspluatatsii* [Semi-automatic satellite laser range finder of LD-2]. Riga, 1983.
7. *Lazernyy dal'nomer "Sazhen'-TM-D"* [Laser ranger Sazhen'-TM-D] (In Rus). Available at: <http://www.npk-spp.ru/deyatelnost/lazernaya-set/115-2009-04-13-11-00-28.html> (accessed: 15.09.2015).
8. Minin O. A., Neyachenko D. I., Artyomov I. V., Dmitrovska A. I. Project to Optimize the Simeiz-1873 LSR Optical System. *Bull. of the Crimean Astrophys. Obs.* 2008. Vol. 104, No. 1, P. 199–203.
9. Lapukhin E. G., Vladimirov V. M., Granitskiy L. V. *Zerkal'no-linzovyy rasshiritel' lazernogo puchka* [Catadioptric extender of laser bunch]. Patent RF, No. 157295, 2015.
10. Glass type LK7. Available at: http://lzos.ru/glass_pdf/LK7.pdf (accessed: 24.11.2015).
11. Glass type K8. Available at: http://lzos.ru/glass_pdf/K8.pdf (accessed: 24.11.2015).
12. Glass type TF10. Available at: http://lzos.ru/glass_pdf/TF10.pdf (accessed: 24.11.2015).
13. Glass type OF1. Available at: URL: http://lzos.ru/glass_pdf/OF1.pdf (accessed: 24.11.2015).
14. Glass type OK4. Available at: http://lzos.ru/glass_pdf/OK4.pdf (accessed: 24.11.2015).
15. *GOST 1807-75. Radiusy sfericheskikh poverkhnostey opticheskikh detaley. Ryady chislovykh znacheniy* [State Standard 1807–75. Radiiuses of spherical surfaces of optical details. Ranks of numerical values]. Moscow, IPK Standartinform Publ., 1989, 19 p.
16. Catalogue of glass LZOS. Available at: <http://lzos.ru/content/view/77/29/> (accessed: 24.11.2015).
17. Matrichnyj-fpzs ELCM1079. Available at: <http://www.npp-alar.ru/upload/ELCM1079r.pdf> (accessed: 24.11.2015).

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДИАМЕТРА ВОЗДУШНОГО ВИНТА
НА АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ЛЕГКОГО САМОЛЕТА**

П. А. Мошков^{*}, В. Ф. Самохин

Центральный аэрогидродинамический институт имени проф. Н. Е. Жуковского
Российская Федерация, 140180, г. Жуковский, Московская область, ул. Жуковского, 1
^{*}E-mail: moshkov89@bk.ru

Представлены результаты выполненных расчетно-экспериментальных исследований влияния диаметра воздушного винта на акустические характеристики винтомоторной силовой установки (СУ) легкого самолета с целью определения метода снижения шума на местности данного класса самолетов за счет изменения диаметра воздушного винта при условии сохранения аэrodинамического и геометрического подобия винтов и неизменности частоты вращения. Экспериментальный метод основан на сравнительном анализе измеренных в статических условиях акустических характеристик силовых установок легких винтовых самолетов МАИ-223М и F30, отличающихся только диаметрами винтов и, соответственно, окружными скоростями при постоянной частоте вращения винтов. Расчетная оценка базируется на полуэмпирическом методе расчета шума воздушных винтов. В результате выполненных исследований установлено, что незначительное уменьшение диаметра винта на 3,3 % приводит к снижению суммарного шума силовой установки легкомоторного самолета на 1,5 дБ. При этом ожидаемое расчетное значение величины снижения гармонического шума винта от аэrodинамической нагрузки составляет 1,2 дБ. Различие расчетных и экспериментальных данных объясняется тем, что при расчете не учитывалась составляющая шума винта от вытеснения. На основании полуэмпирической модели шума воздушного винта получено соотношение для определения влияния диаметра винта на гармоническую составляющую шума винта от аэrodинамической нагрузки при условии геометрического и аэrodинамического подобия винтов, а также при условии постоянства частоты вращения. Сравнение уровней звуковой мощности высокочастотного широкополосного излучения (1000–5000 Гц) СУ самолетов МАИ-223М и F30, имеющих аэrodинамически подобные винты разного диаметра, показало, что различие в уровнях звуковой мощности может быть связано не только с различием в диаметрах винтов, но и с наличием дополнительных источников генерации шума, связанных с компоновкой винтомоторной силовой установки на самолете (в частности, обтекание индуктивным потоком от винта воздухозаборника маслорадиатора двигателя).

Ключевые слова: шум воздушного винта, шум винтомоторной силовой установки, шум легких винтовых самолетов, шум самолета на местности.

Vestnik SibGAU
Vol. 17, No. 1, P. 154–160

**EVALUATION OF THE INFLUENCE OF DIAMETER PROPELLER
ON THE ACOUSTICS CHARACTERISTIC OF THE POWER PLANT BY THE LIGHT AIRCRAFT**

P. A. Moshkov^{*}, V. F. Samokhin

Central Aerohydrodynamic Institute named after N. E. Zhukovsky
1, Zhukovsky Str., Zhukovsky, Moscow Region, 140180, Russian Federation
^{*}E-mail: moshkov89@bk.ru

The article presents the results of the performed computational and experimental studies of the influence of the propeller diameter on the acoustic characteristics of the power plant (PP) by the light aircraft to determine the method of community aircraft noise reduction of this class of aircraft by changing the diameter of the propeller while maintaining the aerodynamic and geometric similarity and propellers invariance of the rotation frequency. The experimental method is based on a comparative analysis of the measured under static conditions of acoustic characteristics by the power plants of light propeller aircraft MAI-223M and F30, differing only in the propeller diameter and thus tip speeds at a constant frequency of rotation propellers. Calculated estimate is based on semiempirical method for calculating propellers noise. As a result of the research it has been found that a slight decrease in the diameter of the propellers on the 3.3 % leads to the reduce of the total noise power plant light aircraft by 1.5 dB. At the same time the estimated value of the expected reduction of tonal loading propeller noise is 1.2 dB.

The difference between the calculated and experimental data is explained by the fact that the calculation does not take into account the thickness noise. Based on semiempirical model propeller noise ratio is obtained to determine the effect of the propeller diameter on the load propeller noise on the condition of the geometric and aerodynamic similarity propellers, and at a constant rotation frequency. Comparison of sound power levels of high-frequency broadband radiation (1000–5000 Hz) PP aircraft MAI-223M and F30, with aerodynamically similar propellers of different diameters, showed that the difference in the sound power level may be related not only to the difference in the diameter of the propellers but the presence of other sources of noise generation related to the arrangement of the power plant for propeller aircraft (particularly wrap inductive flow from the propeller the inlet oil cooler of the engine).

Keywords: propeller noise, propeller power plant noise, light propeller aircraft noise, community aircraft noise.

Введение. Проблема установления методов снижения шума на местности легкомоторных самолетов общего назначения является актуальной в связи с действием и постоянным ужесточением национальных и международных норм на предельно допустимые уровни шума таких самолетов на местности [1; 2]. Другой аспект актуальности проблемы снижения шума винтомоторных силовых установок заключается в снижении степени акустической заметности малоразмерных беспилотных летательных аппаратов с винтомоторной силовой установкой, используемых для решения задач специального назначения.

В зарубежных работах на сегодняшний день опубликованы следующие представления о влиянии диаметра на акустические характеристики воздушных винтов [3–5]. При увеличении диаметра винта нагрузка на лопасти уменьшается, что приводит к уменьшению гармонической составляющей шума от аэrodинамической нагрузки. Поэтому увеличение диаметра приводит к снижению шума на взлетном режиме работы СУ. В то же время при низкой окружной скорости следует ожидать более высокий КПД у винта с увеличенным диаметром, и поэтому для заданной тяги требуется меньшая располагаемая мощность силовой установки. Увеличение диаметра винта может сочетаться с уменьшением окружной скорости в концевом сечении лопасти винта для более существенного снижения шума.

В то же время подобные заключения справедливы при существенном изменении величины диаметра винта. Интересно рассмотреть ситуацию незначительного уменьшения или увеличения диаметра винта на 3–5 % и оценить при этом влияние диаметра винта на акустическое поле СУ при условии сохранения законов распределения по размаху лопасти основных геометрических параметров (хорда, крутка и толщина). Следует отметить, что при незначительном уменьшении диаметра необходимо незначительно увеличить шаг винта для обеспечения сохранения тяги на взлетном режиме работы СУ по сравнению с винтом большего диаметра.

Условия выполнения оценки влияния диаметра винта на акустические характеристики СУ. Оценка влияния диаметра на акустические характеристики винта в настоящей работе выполняется при следующих условиях сравнения:

- принцип равенства тяги сравниваемых винтов;
- принцип сохранения аэродинамического подобия (квазипостоянство числа Рейнольдса на относительном радиусе лопасти $\bar{r} = 0,75$ ($Re_{0,75}$));
- условие постоянства частоты вращения винтов.

Ниже проводится оценка влияния диаметра винта на его акустические характеристики с помощью экспериментального и расчетного методов. Экспериментальный метод основан на сравнительном анализе измеренных в статических условиях акустических характеристик силовых установок ЛВС, отличающихся только диаметрами винтов и, соответственно, окружными скоростями при постоянной частоте вращения винтов. Расчетная оценка базируется на полуэмпирическом методе расчета шума воздушных винтов [6; 7].

Экспериментальное исследование влияния диаметра винта на энергетические характеристики акустического излучения СУ. Сравнительный анализ акустических характеристик винтов разного диаметра проводится на примере силовых установок двух легких винтовых самолетов МАИ-223М и F30. Общий вид самолетов представлен на рис. 1 и 2. Силовые установки самолетов МАИ-223М и F30 включают в себя поршневые двигатели ROTAX-912ULS, заключенные в капот, и тянувшие трехлопастные воздушные винты фиксированного шага производства «Киев-Проп» диаметрами 1,8 и 1,74 м соответственно [8; 9]. Уменьшение диаметра составляет $\approx 3,3\%$. Законы распределения по размаху лопасти основных геометрических параметров (хорда, крутка и толщина) являются практически неизменными. Следует отметить, что шаг винта меньшего диаметра по данным разработчиков данных самолетов (ОСКБЭС МАИ) возрос до 1,3 в сравнении с 1,25 у винта большего диаметра. Незначительное увеличение шага винта необходимо для обеспечения сохранения неизменной тяги на взлетном режиме работы.

Акустические испытания проведены для шести различных режимов работы силовых установок самолетов, определяемых частотой вращения коленвала двигателя. Данные о режимах работы двигателя ROTAX-912ULS представлены в таблице.

Режимы работы двигателя во время испытаний

№ режима	Частота вращения коленвала, об/мин
1	4000
2	4200
3	4400
4	4600
5	4800
6	5000



Рис. 1. Общий вид самолета МАИ-223М



Рис. 2. Общий вид самолета F30

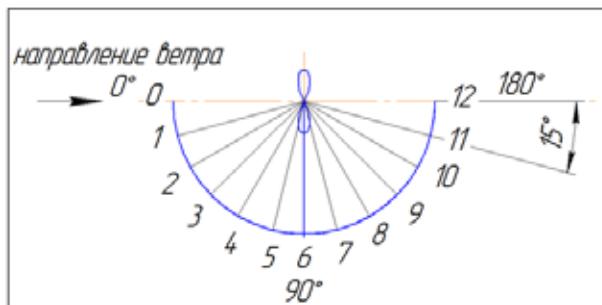


Рис. 3. Схема расположения точек измерения шума на дуге окружности радиусом 30 м

Во время испытаний измерялось звуковое давление в 13-ти точках акустического поля, расположенных на дуге окружности радиусом 30 м и с шагом 15° (рис. 3). Центр окружности совпадал с проекцией втулки винта на земную поверхность. Направление 0° соответствовало излучению в переднюю полусферу в плоскости, проходящей через ось винта, а направление 90° соответствовало направлению излучения в плоскости диска винта. Измерительные точки располагались на уровне земной поверхности, что позволяло исключить влияние интерференции звука на измеряемые уровни шума.

Для регистрации акустических измерений и последующей обработки данных использовалась измерительная система PORTABLE. Основные параметры регистрации сигнала на цифровом магнитофоне: частота квантования сигнала – 51200 Гц, протяженность записи на одном режиме – 30 с, регистрация полезного сигнала осуществлялась параллельно с 13-ти измерительных каналов. Обработка измеренного звукового давления включала в себя получение узкополосных

спектров с шириной полосы 1,56 Гц в диапазоне частот 0–10000 Гц и третьоктавных спектров звукового давления в диапазоне частот 16–10000 Гц.

Во время испытаний проводилось измерение параметров атмосферы (температуры, давления и относительной влажности), а также скорости и направления ветра.

Поскольку диаметры у рассматриваемых винтов различаются незначительно (расхождение не превышает 3,5 %), то можно ожидать, что обобщенные пространственные и спектральные характеристики винтов на сходных режимах работы также будут близкими. Поэтому ниже представлены результаты анализа влияния диаметра винта только на энергетические характеристики акустического излучения силовой установки.

Энергетический анализ акустического излучения силовой установки самолета выполнен на основании измеренных в 13-ти точках акустического поля третьоктавных и узкополосных спектров уровней звукового давления. Суммарный уровень звуковой мощности

СУ, а также уровни звуковой мощности отдельных составляющих излучения воздушного винта рассчитывались в соответствии с соотношением [10]:

$$L_w = 10 \lg(\pi R^2 \int_0^\pi 10^{L/10} \sin(\phi) d\phi), \quad (1)$$

где R – расстояние от источника до точки измерения шума; ϕ – угол направления излучения и соответствующий ему уровень звукового давления L .

На рис. 4 показаны для статических условий зависимости суммарных уровней звуковой мощности СУ самолетов MAI-223M с винтом диаметром 1,8 м и F30 с винтом диаметром 1,74 м от режима работы СУ, характеризуемого частотой вращения воздушного

винта. Можно видеть, что на сходственных режимах работы СУ суммарный уровень звуковой мощности СУ с винтом диаметром 1,8 м на ~1,5 дБ выше, чем суммарный уровень звуковой мощности СУ с винтом диаметром 1,74 м, и это соотношение справедливо для всех рассматриваемых режимов.

На рис. 5 представлены зависимости уровней звуковой мощности излучения на частотах, кратных частоте следования лопастей винта (L_{W1B} , L_{W2B} , L_{W3B}), а также уровней суммарной звуковой мощности первых шести гармоник шума вращения винта (L_{W1-6B}) от режима работы СУ при различных значениях диаметра винта.

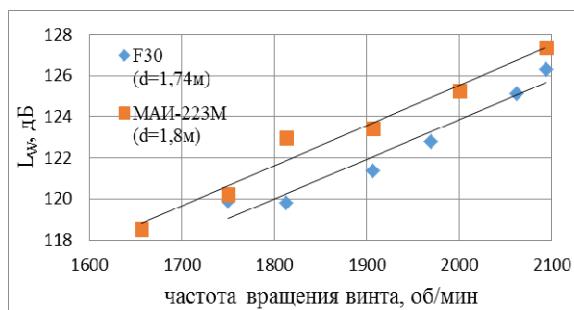


Рис. 4. Снижение суммарного уровня звуковой мощности винта при уменьшении его диаметра при условии сохранения неизменными тяги и частоты вращения при различных режимах работы СУ

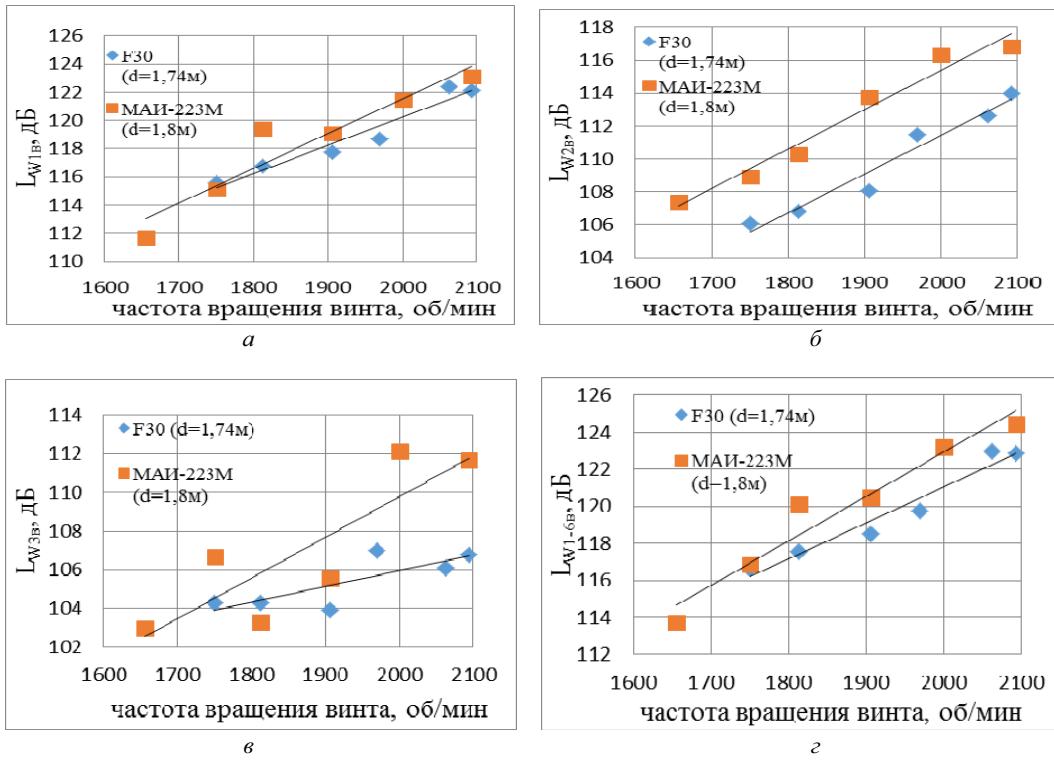


Рис. 5. Снижение суммарного уровня звуковой мощности отдельных составляющих излучения воздушного винта при уменьшении его диаметра при условии сохранения неизменными тяги и частоты вращения при различных режимах работы СУ: *а* – уровни звуковой мощности излучения на частоте 1-й гармоники шума вращения винта, L_{W1B} ; *б* – уровни звуковой мощности излучения на частоте 2-й гармоники шума вращения винта, L_{W2B} ; *в* – уровни звуковой мощности излучения на частоте 3-й гармоники шума вращения винта, L_{W3B} ; *г* – уровни суммарной звуковой мощности первых шести гармоник шума вращения винта, L_{W1-6B}

Можно видеть (рис. 5, а, в), что при данных условиях сравнения уменьшение диаметра приводит к уменьшению уровней звуковой мощности излучения на частоте первой и третьей гармоник шума вращения на 0–2 и 1–5 дБ соответственно, в зависимости от режима работы СУ. При этом уменьшение уровня звуковой мощности излучения на частоте второй гармоники шума вращения винта составляет 4 дБ, и это соотношение справедливо во всем диапазоне рассматриваемых режимов работы (рис. 5, б). В то же время уменьшение суммарного уровня звуковой мощности первых шести гармоник шума винта составляет 1–2 дБ (рис. 5, г), что свидетельствует о доминирующей роли первой гармоники в гармонической составляющей шума вращения винта.

На рис. 6 рассмотрены графики изменения уровня звуковой мощности широкополосного высокочастотного излучения в диапазоне частот 1000–5000 Гц силовых установок самолетов МАИ-223М и F30 при различных режимах работы СУ. Можно видеть, что у самолета АИ-223М суммарные уровни звуковой мощности широкополосного излучения превышают на 1,5–4 дБ соответствующие уровни звуковой мощности самолета F30. Возможно, что доминирующим источником широкополосного акустического излучения в случае СУ самолета МАИ-223М является обтекание воздухозаборника радиатора двигателя индуктивным потоком от винта, габариты которого заметно больше, чем у самолета F30 (см. рис. 1 и 2).

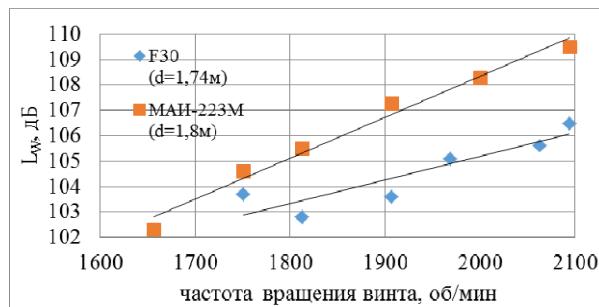


Рис. 6. Снижение суммарного уровня звуковой мощности широкополосного излучения (1000–5000 Гц) воздушного винта при уменьшении его диаметра при условии сохранения неизменными тяги и частоты вращения при различных режимах работы СУ

Ранее было показано [11–15], что среди основных источников шума воздушного винта выделяется так называемый шум вращения, источником которого является действующая на лопасть винта аэродинамическая нагрузка, шум, обусловленный вытеснением среды телом лопасти, а также шум вихревого происхождения, одним из источников которого является турбулентный след за лопастями. В шуме винтомоторной СУ самолета, помимо винта и двигателя, может иметь место дополнительный источник акустического излучения, связанный с обтеканием индуктивным потоком от винта элементов конструкции планера самолета (например, обтекание воздухозаборника радиатора (см. рис. 1)). Сравнение уровней звуковой мощности высокочастотного широкополосного излучения (1000–5000 Гц) СУ самолетов МАИ-223М

и F30, имеющих аэродинамически подобные винты разного диаметра, показало, что различие в уровнях звуковой мощности может быть связано не только с различием в диаметрах винтов, но и с наличием дополнительных источников генерации шума, связанных с компоновкой винтомоторной силовой установки.

Расчетная оценка влияния диаметра винта на его звуковую мощность. Ранее при анализе полуэмпирической модели шума винта [6; 7; 14] было установлено, что мощность акустического излучения ма-лонагруженного воздушного винта, у которого доминирующими являются источники дипольного типа от аэродинамической нагрузки, пропорциональна числу Маха характерной скорости обтекания профиля лопасти в восьмой степени $\dot{E}_{\text{1,ed}}^8$, квадрату коэффициента тяги винта α^2 и коэффициенту мощности β :

$$W_{\bar{P}} = c_1 \frac{\rho a^3}{c_0^3} \left[\alpha^2 + \frac{\beta}{(2\pi r)^2} \right] \frac{M_{\text{1,ed}}^2}{z^3 b_y} n^6 d^8, \quad (2)$$

где c_1 – эмпирический коэффициент пропорциональности; d – диаметр винта, м; a – максимальная толщина аэродинамического профиля винта на эффективном радиусе, м; r – относительный радиус винта; c_0 – скорость звука, м/с; z – число лопастей; b_y – хорда лопасти в эффективном сечении, м; ρ – плотность воздуха, кг/м³; n – частота вращения воздушного винта, об/с.

Отметим, что винты рассматриваемых самолетов являются геометрически и аэродинамически подобными, а режимы их работы соответствуют автомодельным режимам. В этом случае, используя выражение (2), можно оценить влияние диаметра на звуковую мощность гармонической составляющей шума вращения воздушного винта от аэродинамической нагрузки.

Основным условием сравнения акустических характеристик двух винтов является равенство их тяг на сходственных режимах работы, т. е.:

$$\frac{\alpha_2 n_2^2 d_2^4}{\alpha_1 n_1^2 d_1^4} = 1. \quad (3)$$

У винта самолета F30 при меньшем диаметре d_1 шаг увеличен на 4 %, и, следовательно, выше значение коэффициента тяги, т. е. $\alpha_1 > \alpha_2$. Если допустить, что в соотношении (3) увеличение шага винта самолета F30 на 4 % полностью компенсируется соответствующим уменьшением диаметра на 3,3 %, то при равенстве частот вращения $n_2 = n_1$ число Маха окружной скорости винта $\left(M_{\text{1,ed}} = \frac{\pi d n}{c_0} \right)$ самолета F30 также уменьшится на 3,3 %. В этом случае, в соответствии с соотношением (2), для составляющей шума вращения винта от аэродинамической нагрузки отношение мощностей акустического излучения винтов самолетов МАИ-223М и F30 будет равно:

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{\alpha_2^2 M_{\text{1,ed}2}^2 n_2^6 d_2^8}{\alpha_1^2 M_{\text{1,ed}1}^2 n_1^6 d_1^8} = \frac{d_2^2 U_2^6}{d_1^2 U_1^6}. \quad (4)$$

При условии, что малое изменение диаметра не влечет за собой заметного изменения пространственных и частотных характеристик акустического

излучения винта, ожидаемое расчетное изменение уровня интенсивности шума за счет изменения диаметра винта и соответствующего изменения окружной скорости при условии постоянства частоты вращения винтов ($n_1 = n_2$) и тяги будет равно:

$$\Delta L_W = L_{W2} - L_{W1} = 20 \lg \frac{d_2}{d_1} + 60 \lg \frac{U_2}{U_1}, \quad (5)$$

где $U_1 = \pi d_1 n_1$, $U_2 = \pi d_2 n_2$ – окружные скорости сравниваемых винтов.

После подстановки в выражение (5) значений диаметров воздушных винтов самолетов МАИ-223М ($d_1 = 1,8$ м) и F30 ($d_2 = 1,74$ м) и окружных скоростей получим, что для рассматриваемых условий сравнения ожидаемое расчетное снижение уровня звуковой мощности составляющей шума вращения от аэrodинамической нагрузки винта самолета F30 по сравнению с винтом самолета МАИ-223М составляет ~1,2 дБ.

Эффект снижения шума вращения винта от аэrodинамической нагрузки при постоянстве частоты вращения за счет уменьшения диаметра заключается, по-видимому, в снижении интенсивности шума источников дипольного типа за счет уменьшения окружной скорости (в общем случае интенсивность шума диполя пропорциональна окружной скорости винта в шестой степени), а также, возможно, за счет некоторого смещения точки приложения равнодействующей аэrodинамической нагрузки ближе к втулке винта непосредственно вследствие уменьшения диаметра.

Экспериментально установленное снижение суммарного уровня звуковой мощности силовой установки самолета F30 по сравнению с винтом самолета МАИ-223М (см. рис. 4) составляет ~1,5 дБ. Расчетное значение снижения шума винта за счет уменьшения диаметра и соответствующего уменьшения окружной скорости несколько ниже полученного в эксперименте. Это, возможно, связано с тем, что в расчетной оценке не учитывалась роль составляющей шума вращения винта от «вытеснения».

Заключение. Мощность акустического излучения СУ легкого винтового самолета с тянувшим винтом зависит от интенсивности акустического излучения винта двигателя и от аэrodинамической компоновки агрегатов двигателя. Для самолета F30 значительное снижение суммарного уровня звуковой мощности силовой установки по сравнению с СУ самолета МАИ-223М на величину до 1,5 дБ при прочих равных условиях объясняется снижением шума винта от аэrodинамической нагрузки. При этом расчетное ожидаемое снижение уровня звуковой мощности гармонической составляющей шума вращения винта от аэrodинамической нагрузки, связанной с уменьшением диаметра винта на 0,06 м и соответствующим уменьшением окружной скорости в концевом сечении лопасти винта, при постоянной частоте вращения винта составляет 1,2 дБ. Некоторое расхождение расчетных и экспериментальных данных объясняется, возможно, тем, что при расчетной оценке не учитывалась роль составляющей шума винта от «вытеснения».

Таким образом, применение на самолете МАИ-223М воздушного винта меньшего диаметра по сравнению со штатным можно рассматривать как конструктивный способ снижения шума на местности данного самолета. При этом необходимо учитывать также влияние компоновки агрегатов двигателя на генерацию широкополосного акустического излучения СУ в целом.

На основании полуэмпирической модели шума винта получено соотношение для определения влияния диаметра винта на уровень звуковой мощности СУ при условии геометрического, аэродинамического подобия винтов и постоянстве частоты вращения.

Библиографические ссылки

1. Охрана окружающей среды. Приложение 16 к Конвенции о международной гражданской авиации. Т. 1. Авиационный шум. 6-е изд., ИКАО. 2011.
2. Авиационные Правила. Часть АП-36. Сертификация воздушных судов по шуму на местности / Межгосударственный авиационный комитет, 2003.
3. Aeroacoustics of flight vehicles: Theory and Practice. Vol. 1. Noise sources. NASA References Publication 1258. Vol. 1. WRDC. Technical report 90-3052. 1991.
4. Hanson D. B. Influence of propeller design parameters on far field harmonic noise in forward flight // AIAA Journal. 1980. Vol. 18, No. 2. P. 1313–1319.
5. Prediction procedure for near-field and far-field propeller noise, AIR 1407. Soc. of Automotive Engineers, Inc., 1977.
6. Самохин В. Ф. Об одном подходе к расчету дальнего акустического поля воздушного винта // Труды ЦАГИ. 1988. Вып. 2355. С. 65–75.
7. Самохин В. Ф. Полуэмпирический метод прогноза шума воздушного винта // Инженерно-физический журнал. 2012. Т. 85, № 5. С. 1064–1072.
8. Руководство по технической эксплуатации самолета МАИ-223М. М. : МАИ, 2013. 138 с.
9. Flight manual. F30 Brio. F. G. model. 147 р.
10. Расчеты и измерения характеристик шума, создаваемого в дальнем звуковом поле реактивными самолетами / под. ред. Л. И. Соркина. М. : Машиностроение, 1968. 99 с.
11. Самохин В. Ф., Мошков П. А. Акустические характеристики легкого винтового самолета с двигателем внутреннего сгорания [Электронный ресурс] // Труды МАИ. 2012. Вып. 57. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=30715>. Дата публикации 30.06.2012.
12. Самохин В. Ф., Мошков П. А. Исследование акустических характеристик легкого винтового самолета «Вильга-35А» на режимах горизонтального полета // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21, № 2, С. 55–65.
13. Мошков П. А. Некоторые результаты экспериментального исследования акустических характеристик силовой установки сверхлегкого самолета в статических условиях // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 6. С. 265–270.

14. Самохин В. Ф., Мошков П. А. Экспериментальное исследование акустических характеристик силовой установки самолета Ан-2 в статических условиях // Труды МАИ. 2015. Вып. № 82. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=58711>. Дата публикации 26.06.2015.
15. Мошков П. А. Классификация источников шума легких винтовых самолетов на местности // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 4. С. 101–106.

References

1. *Okhrana okruzhayushchey sredy. Prilozhenie 16 k Konvensii o mezhdunarodnoy grazhdanskoy aviacii. Tom 1. Aviatsionnyy shum.* [Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation: Environmental Protection. Vol. I. Aircraft Noise]. 6th ed., ICAO Publ., 2011.
2. *Aviatsionnye Pravila. Chast' 36. Sertifikatsiya vozdushnykh sudov po shumu na mestnosti* [Aviation Regulations. Pt. 36. Aircraft noise received on the ground certification]. Moscow, Interstate Aviation Committee, Aviaizdat Publ., 2003. 122 p.
3. Aeroacoustics of flight vehicles: Theory and Practice. Vol. 1: Noise sources. NASA References Publication 1258, Vol. 1, WRDC, Technical report 90-3052, 1991.
4. Hanson D. B. Influence of propeller design parameters on far field harmonic noise in forward flight, 1980, *AIAA Journal*, Vol. 18, No. 2, P. 1313–1319.
5. Prediction procedure for near-field and far-field propeller noise, AIR 1407, Soc. of Automotive Engineers, Inc., 1977.
6. Samokhin V. F. [An approach to the calculation of the far-field propeller noise]. *Trudy TsAGI*. 1988, No. 2355, P. 65–75 (In Russ.).
7. Samokhin V. F. Semiempirical method for estimating the noise of a propeller. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2012, Vol. 85, No. 5, P. 1157–1166.
8. *Rukovodstvo po tekhnicheskoy ekspluatatsii samoleta "MAI-223M".* [Manual operation of the aircraft "MAI-223 M"]. 2013, Moscow, MAI Publ., 138 p.
9. Flight manual "F30 Brio". F. G. model. 147 p.
10. Sorkin L. I. *Raschety i izmereniya kharakteristik shuma, sozdavayemogo v dal'nem zvukovom pole reaktivnymi samoletami.* [Calculations and measurements of the characteristics of the noise generated at the far sound field by jet aircraft]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968, 99 p.
11. Samokhin V. F., Moshkov P. A. [Acoustic characteristics of a light propeller aircraft with internal combustion engine]. *Trudy MAI*, 2012, No. 57 (in Russ.). Available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=30715> (accessed 30.06.2012).
12. Samokhin V. F., Moshkov P. A. [Research of acoustic characteristics by light propeller aircraft "Vilga-35A" on the conditions level flight]. *Vestnik Moskovskogo aviationsnogo instituta*, 2014, Vol. 21, No. 2, P. 55–65 (In Russ.).
13. Moshkov P. A. [Some results of experimental research of acoustic characteristics by the powerplant ultralight aircraft in static conditions]. *Nauchno-tehnicheskiy vestnik Povolzh'ya*. 2014, No. 6, P. 265–270 (In Russ.).
14. Samokhin V. F., Moshkov P. A. [Experimental study of the acoustic characteristics of the powerplant by the aircraft An-2 in static conditions]. *Trudy MAI*, 2015, No. 82 (In Russ.). Available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=58711> (accessed 26.06.2015).
15. Moshkov P. A. [Classification of community noise sources by light propeller aircrafts]. *Nauchno-tehnicheskiy vestnik Povolzh'ya*. 2015, No. 4, P. 101–106 (In Russ.).

УДК 629.78.03: 621.472

Вестник СибГАУ
Том 17, № 1. С. 161–169

ВЫБОР ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ СОЛНЕЧНОГО ТЕПЛОВОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

С. Л. Финогенов*, А. И. Коломенцев

Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет) "МАИ"
Российская Федерация, 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4
*E-mail: sfmai2015@mail.ru

Рассматривается солнечный тепловой ракетный двигатель (СТРкД) с тепловым аккумулятором (ТА), использующим фазопереходные высокотемпературные теплоаккумулирующие материалы (ТАМ) с высокой удельной теплотой плавления, обладающие определенными энергетическими преимуществами над твердотельными графитовыми аккумуляторами. ТА конструктивно совмещен с системой «концентратор–приемник» (КП) и предназначен для накопления тепловой энергии от зеркального солнечного концентратора в периоды пассивного движения космического аппарата (КА) по переходным орбитам многовитковой траектории выведения, при которой включение СТРкД осуществляется в апсидальных областях орбит за счет теплового разряда ТА, нагревающего рабочее тело (водород) до высоких температур, обеспечивая высокие значения удельного импульса. При этом обеспечивается независимость процессов точной ориентации системы КП на Солнце в периоды пассивного движения КА для заряда ТА и управления вектором тяги при разряде аккумулятора. Области включения СТРкД при этом не зависят от условий освещенности. Рассматриваются такие тугоплавкие ТАМ, как оксид бериллия и бинарные эвтектики B^*Si и $3BeO^*2MgO$ с температурой плавления выше 2000 К и удельной энергоемкостью более 2 МДж/кг. Рассматривается задача межорбитальной транспортировки КА с низкой стартовой орбиты на геостационарную орбиту в течение 60 суток. В качестве критерия эффективности задачи выведения принята масса полезной нагрузки (ПН), которая максимизируется путем оптимизации релевантных параметров системы КП–ТА. К таким параметрам можно отнести, в частности, соотношение масс концентратора и ТА и параметр точности псевдопараболоидного концентратора. Проведена совместная оптимизация релевантных параметров, показаны их целесообразные значения для каждого ТАМ. Показано, что при использовании в ТА сплава B^*Si масса ПН может быть больше по сравнению с остальными рассмотренными теплоаккумулирующими материалами. Условия ориентации системы КП на Солнце при этом достаточно соответствуют современным техническим возможностям. Выигрыши в массе ПН может более чем в 1,5 раза превышать эффективность современных средств выведения с ЖРД, что позволяет использовать ракеты-носители (РН) более легкого класса.

Ключевые слова: солнечный тепловой ракетный двигатель, тепловой аккумулятор, фазопереходные теплоаккумулирующие материалы, высокотемпературная система «концентратор–приемник», геостационарная орбита, масса полезной нагрузки.

Vestnik SibGAU
Vol. 17, No. 1, P. 161–169

THE CHOICE OF HEAT-ACCUMULATING MATERIALS FOR SOLAR THERMAL PROPULSION

S. L. Finogenov*, A. I. Kolomentsev

Moscow Aviation Institute
(National research university) "MAI"
4, Volokolamskoe shosse, A-80, GSP-3, Moscow, 125993, Russian Federation
*E-mail: sfmai2015@mail.ru

Solar thermal propulsion (STP) with thermal energy storage (TES) using high-temperature heat-accumulating materials (HAM) with high specific heat of fusion is considered. These HAM possess power advantages over solid-state graphitic accumulators. TES is structurally combined with “concentrator-absorber” system (CAS) and is intended to accumulation of thermal energy from the mirror-image solar concentrator during the periods of space vehicle motion at passive legs of multi-burn trajectory. Firings of the STP are realized at apsidal areas of the transfer orbits at the expense of the thermal discharge of the TES, heating the propulsive mass (hydrogen) up to high temperatures and providing high specific impulse. Independence of processes of precise orientation of the CAS to the Sun during the

*periods of passive motion of the space vehicle for charge of TES, and thrust vector control is thus provided at accumulator discharge at active legs of the trajectory. Areas of firings of the STP thus do not depend on illuminance conditions. Such refractory HAM as beryllium oxide and binary eutectic B*Si and 3BeO*2MgO with fusion temperature above 2000 K and specific heat of fusion higher than 2 MJ/kg are considered. The problem of inter-orbital transfer of space vehicle from LEO to GEO within 60 days is observed. Payload mass as a criterion of efficiency flight is maximized by optimization of relevant parameters of CAS and TES. It is possible to consider such relevant parameters as the ratio of masses of the concentrator and the TES and parameter of accuracy of the pseudo-paraboloid concentrator. Joint optimization of relevant parameters is conducted. Their expedient values for each of the considered HAM are shown. It is shown that at use of B*Si alloy the payload mass can be higher in comparison with other considered materials. The CAS tracking conditions to the Sun thus corresponds enough to modern technical feasibilities. The gain in payload mass can exceeds 1.5 times of efficiency of launchers with the state-of-the-art upper stages, and allows to use of smaller class launchers.*

Keywords: solar thermal propulsion, thermal energy storage, heat-accumulating materials, high-temperature “concentrator–absorber” system, geostationary orbit, payload mass.

Введение. Снижение стоимости выведения полезных грузов на высокие орбиты является актуальной задачей, решение которой может быть осуществлено путем использования ракет-носителей более легкого класса, оснащенных энергетически более эффективными, чем традиционные, верхними ступенями (разгонными блоками). К таким средствам выведения можно отнести разгонные блоки с двигательными установками, использующими внешние ресурсы космического пространства, в частности, солнечную энергию как наиболее доступную.

Ранее было показано, что разгонный блок с солнечным тепловым ракетным двигателем (СТРкД) позволяет значительно (до двух раз) повысить полезную нагрузку (ПН), выводимую, например, на геостационарную орбиту (ГСО) [1; 2]. Время выведения при этом составляет 30–60 суток с использованием множественных прерывистых траекторий при включении двигателя периодически в перигее каждой переходной орбиты и затем, после формирования геопереходной орбиты, при включении СТРкД в апогее каждый раз для формирования ГСО [1–4]. В случае использования обычного СТРкД возникают вопросы выбора полностью освещенных апсидальных активных участков, а также необходимость одновременного управления вектором тяги и достаточно точного наведения системы «концентратор–приемник» (КП) на Солнце в течение каждого активного участка. Это представляет отдельную серьезную техническую проблему, требующую целого комплекса достаточно сложных технических решений.

В работах [2; 5] рассмотрены варианты СТРкД с системой КП, включающей тепловой аккумулятор (ТА) в составе светоприемника, накапливающий тепловую энергию на освещенных пассивных участках каждой переходной траектории и отдающий ее рабочему телу (водороду) в момент включения двигателя в апсидальных областях. Это обеспечивает упрощение задач выбора активных участков вне зависимости от условий освещенности и упрощает требуемое наведение системы КП на Солнце.

В качестве аккумулятора тепла могут быть использованы такие материалы, как силицированный графит типа МПГ-6, запасающий тепло за счет теплопроводности, а также высокотемпературные фазопереходные теплоаккумулирующие материалы (ТАМ), накап-

ливающие тепловую энергию за счет высокой удельной теплоты плавления [6; 7].

Разработки солнечной энергодвигательной установки с ТА на основе графита проводятся в Центре им. Келдыша [3; 4], а также в США (NASA, Boeing и др. [2]). Это объясняется более простой конструкцией твердотельных ТА по сравнению с фазопереходными аккумуляторами. Тем не менее, фазопереходные ТАМ обладают существенными энергетическими преимуществами по сравнению с графитовой теплоаккумулирующей матрицей (см., например, [7; 8]). Следует, однако, отметить и недостатки самих фазопереходных ТАМ, связанные с их коррозионной активностью в расплавленном состоянии, значительным изменением объема в циклах «плавление–затвердевание», низкой теплопроводностью и неоднородностью распределения расплава в капсуле ТА в условиях невесомости, что может привести к перегреву оболочки ТА, сожмированному с приемником концентрированного солнечного излучения. Работы в этом направлении ведутся в ГосНИИ НПО «Луч», НПО «Квант» и др. [8; 9].

В настоящей работе рассматривается эффективность использования фазопереходных ТАМ как обладающих высокими энергетическими показателями и не меняющих рабочую температуру во время активной работы двигателя при разряде ТА.

Использование ТА в составе СТРкД. Представленные ранее работы по оценке эффективности СТРкД с ТА [5; 10] показали его высокую эффективность как средства межорбитальной транспортировки. Такой двигатель имеет систему КП меньшей размерности, а при его включениях гравитационные потери скорости могут снижаться по сравнению с базовым СТРкД без ТА вследствие возможного быстрого разряда аккумулятора и большей располагаемой тяги.

Вместе с тем существует проблема выбора целесообразных ТАМ как обеспечивающих наилучшее решение задачи доставки полезного груза на высокие орбиты. Так, необходимо выбрать ТАМ, температура плавления которого приближена к оптимальной температуре нагрева водорода, определяемой доступной точностью зеркального параболоидного концентратора. При этом параметр точности зеркала [11] также является одним из оптимизируемых параметров, от которого зависит масса полезного груза. Удельная

теплота плавления ТАМ должна быть достаточно высокой для сохранения конкурентных преимуществ такого СТРкД как средства межорбитальной транспортировки по сравнению с другими перспективными двигателями космического назначения.

В работах [5; 7; 10; 12] рассмотрены такие фазопереходные материалы, как оксид бериллия, бинарная эвтектика $3\text{BeO} \cdot 2\text{MgO}$, металлический бериллий, гидрид лития и другие материалы с высокой удельной энергоемкостью. Характеристики рассматриваемых в настоящей работе высокотемпературных ТАМ для СТРкД представлены в таблице.

Характеристики высокотемпературных фазопереходных ТАМ

ТАМ	Температура плавления, К	Удельная теплота плавления, кДж/кг
$3\text{BeO} \cdot 2\text{MgO}$	2153	2088
B^*Si	2320	2540
BeO	2804	2840

Рассматриваемые высокотемпературные ТАМ имеют преимущество над менее тугоплавкими веществами вследствие более высокого удельного импульса СТРкД, светоприемник-аккумулятор которого работает при повышенных температурах. Однако это не означает, что здесь находится зона оптимума нагрева рабочего тела, поскольку при высоких температурах увеличиваются требуемая точность зеркального концентратора и его удельная масса, снижается КПД системы КП и, соответственно, возрастает площадь и полная масса зеркала, что уменьшает массу выводимого груза. Как показывает проведенный анализ, поиск ТАМ с оптимальными температурами плавления следует производить в области между высокотемпературными ТАМ типа оксида бериллия и менее тугоплавкими веществами типа эвтектики $3\text{BeO} \cdot 2\text{MgO}$. К таким веществам с промежуточной температурой плавления и высокой удельной энергоемкостью может быть отнесен, в частности, сплав бора с кремнием B^*Si . Поэтому в данной работе рассматривается возможность преимущественного использования в том числе и этого фазопереходного материала в СТРкД в сравнении с другими высокотемпературными ТАМ при выполнении межорбитальных маневров.

Моделирование СТРкД с ТА в составе космического аппарата. Задача выбора оптимальных параметров СТРкД с ТА в составе космического аппарата (КА) является системной, учитывающей часто противоречивые требования к разработке двигателя с системой КП, теплового аккумулятора и КА (разгонного блока), поэтому правильно выбрать схему и параметры возможно только при их комплексной оптимизации как единой технической системы совместно с функциями и параметрами управления на активных участках траектории. В отличие от традиционного межорбитального перелета, когда за счет импульсной аппроксимации активных участков в первом приближении возможно независимое рассмотрение задач

выбора траектории и основных проектных параметров КА [13], при наличии в составе космического аппарата СТРкД эти задачи взаимозависимы [1].

Математическая модель задачи межорбитальной транспортировки с солнечной верхней ступенью включает уравнения движения, зависимости, связывающие характеристики и параметры КА, СТРкД и ТА, а также соответствующие ограничения и граничные условия. Для решения задачи необходимо выбрать основные проектные параметры КА с СТРкД и управления, оптимальное сочетание которых обеспечивает наилучшие показатели эффективности выполнения транспортной задачи. В качестве основных показателей полета на этапе поисковых исследований рассматриваются энергетические и массовые характеристики КА с СТРкД. Так, например, показателем эффективности межорбитальной транспортировки может служить масса затраченного топлива или начальная масса КА. Однако для более полной оценки транспортных возможностей КА естественно использовать в качестве показателя эффективности массу ПН, доставляемой на целевую орбиту. В случае чисто водородного СТРкД этот подход может оказаться более правильным, поскольку здесь необходимо учитывать значительную долю как водородного бака, так и ТА в конечной массе КА и оценивать выводимую массу за вычетом массы топливного отсека, теплового аккумулятора, двигателя с системой КП и вспомогательных систем и элементов конструкции. Следует также учесть, что заправленная масса водорода, являясь определяющим параметром для расчета массы топливного отсека, зависит от удельного импульса СТРкД, который, в свою очередь, определяется температурой нагрева газа в ТА, масса которого может быть значительной. Учитывая рассмотренные тесные взаимосвязи проектных параметров КА и СТРкД с ТА, выбор в качестве показателя эффективности полета массы ПН является достаточно очевидным.

Вектор входных параметров математической модели СТРкД в составе КА включает начальную массу КА, тягу СТРкД или начальную тяговооруженность КА, удельный импульс, зависящий от рабочей температуры ТА, оптико-геометрические параметры системы КП, удельную теплоту плавления ТАМ, а также параметры начальной и конечной орбит. Масса ПН определяется как разность между стартовой массой КА на исходной орбите и суммой составляющих массы топлива, ТА и конструкции КА с СТРкД. Основные составляющие массы КА с СТРкД на этапе предварительного проектирования включают массу ПН, полную массу заправленного топлива, массу топливного отсека с арматурой и системой подачи, массу двигателя с системой КП и ТА, массу системы управления (может размещаться на ПН) и массу прочих (неучтенных) систем.

Следует отметить, что собственно система КП с ТА может быть включена в массу ПН для энергоснабжения на орбите назначения. Для этого в состав ТА необходимо включить преобразователи энергии, например термоэмиссионные, работающие при высоких температурах. Тогда общая полетная эффективность СТРкД с ТА заметно возрастет.

При определении экстремума целевой функции для выбранной траектории полета выделяются основные параметры двигателя и проводится их совместная оптимизация. Определение оптимального сочетания параметров СТРкД с ТА и КА в настоящей работе проводится методом покоординатного спуска [1; 13]. При оценке энергомассовой эффективности КА с СТРкД существенными (релевантными) по отношению к изменению критерия эффективности параметрами СТРкД могут быть выбраны, в частности, параметр точности концентратора и отношение массы концентратора к массе ТА при заданных значениях температуры плавления ТАМ и его удельной энергоемкости. Релевантные параметры должны оптимизироваться совместно. Температура нагрева рабочего тела в системе «светоприемник–ТА» в данном случае не оптимизируется, а фиксируется на уровне температуры плавления конкретного ТАМ. Тяга СТРкД, в отличие от традиционных ракетных двигателей, не является оптимизируемым параметром. Это объясняется монотонно убывающим характером зависимости массы ПН от тяги вследствие опережающего роста массы ТА и концентратора по сравнению с уменьшением массы рабочего топлива из-за снижения гравитационной составляющей характеристической скорости полета.

Оценка эффективности использования различных ТАМ в составе СТРкД. Применительно к СТРкД сравним энергоаккумулирующие материалы, обладающие высокой скрытой теплотой плавления при температурах выше 2000 К – оксид бериллия, эвтектику 3BeO*2MgO и эвтектику B*Si (см. таблицу). Все выделенные ТАМ обладают высокой удельной теплотой плавления, превышающей 2 МДж/кг, что положительно сказывается на массогабаритных характеристиках ТА с этими материалами.

При оценке полетной эффективности СТРкД с ТА в общем случае решается обратная проектно-баллистическая задача выведения космического аппарата на ГСО, когда начальная масса ступени задана. Это может быть достаточно оправданно, поскольку применительно к конкретному носителю и географической точке запуска масса аппарата на орбите выведения обычно заранее известна. Масса ПН максимизируется при ограничении на время выполнения задачи межорбитального перехода. Начальная масса разгонного блока с СТРкД на стартовой орбите в рассматриваемой задаче соответствует массе верхней ступени ракеты-носителя «Союз-2» при пуске с космодрома Куру.

Будем рассматривать СТРкД с пленочным концентратором солнечной энергии, например надувного типа, с возможным отверждением поверхности после его формирования на орбите. В качестве варианта можно рассматривать зеркало, выполненное из алюминизированного каптона, армированного кевларом, или ламината, состоящего из склеенных между собой слоев алюминизированного каптона, алюминиевой фольги и каптона, армированного кевларом [14]. Удельная масса такого концентратора достаточно подходит для выполнения космических задач. Учитывая разделенность во времени процессов накопления энергии и разряда ТА, вопросы деформации концен-

тратора при запуске двигателя и время возвращения его к исходной псевдопараболоидной форме представляются не слишком критичными.

Рассмотрим зависимость массы ПН от соотношения масс концентратора и ТА для высокотемпературных ТАМ, определяемую согласно описанной математической модели с точностью, достаточной для принятия решения по выбору рациональных альтернатив и их последующей детальной проработки [1; 13]. Время межорбитального перехода на ГСО приемлем равным 60 суткам как рациональное, уменьшение которого приводит к снижению массы ПН, а увеличение не приводит к заметному ее росту [1; 5]. При уточненном расчете массы ПН на этапе технического предложения следует дополнительно учитывать потери удельного импульса на неравновесность истечения и другие виды потерь [1; 13]. Как следует из рис. 1, для каждого ТАМ существует максимум массы ПН в определенной области отношения массы зеркала к массе ТА. Так, для композиции 3BeO*2MgO оптимум соответствует отношению массы концентратора к массе ТА в пределах 20–25 %. С повышением рабочей температуры этот оптимум сдвигается в сторону увеличения этого соотношения, составляя 30–40 % в случае эвтектики B*Si и достигая 80–90 % в случае высокотемпературного оксида бериллия. Представленные результаты можно объяснить увеличением требуемой точности зеркального концентратора для зарядки ТА с более тугоплавкими ТАМ, обладающими повышенной теплотой плавления и соответствующим ростом массы зеркала.

Влияние точности параболоидного концентратора на массу ПН показано на рис. 2, откуда следует, что существуют области оптимальных или целесообразных значений параметра точности, зависящих от температуры плавления конкретного ТАМ. По мере увеличения температуры плавления ТАМ оптимальный параметр точности снижается (повышается оптимальная концентрация солнечного излучения). Так, если для эвтектики 3BeO*2MgO оптимальный параметр точности соответствует $0,6^\circ$ – $0,7^\circ$, то для эвтектики B*Si оптимум параметра точности смешается влево и находится на уровне $0,5^\circ$ – $0,6^\circ$. Для оксида бериллия оптимальная точность концентратора соответствует $0,25^\circ$. Это объясняется тем, что большая точность резко увеличивает удельную массу зеркала, снижая массу ПН за счет роста массы двигательной установки, а уменьшение точности снижает КПД системы КП, что требует большей площади и массы зеркала и также приводит к падению массы ПН. Следует отметить, что меньшему значению параметра точности (т. е. большей точности зеркала и концентрации солнечного излучения) соответствуют меньшие допустимые углы разориентации системы КП при слежении за Солнцем. В этом отношении использование ТАМ с более низкой температурой плавления позволяет менее точное наведение на Солнце. Так, при оптимальном параметре точности при использовании эвтектики B*Si, равном $0,5^\circ$ – $0,6^\circ$, угол динамического слежения за Солнцем может составлять 1° – $1,2^\circ$, что вполне выполнимо современными техническими средствами [11; 12].

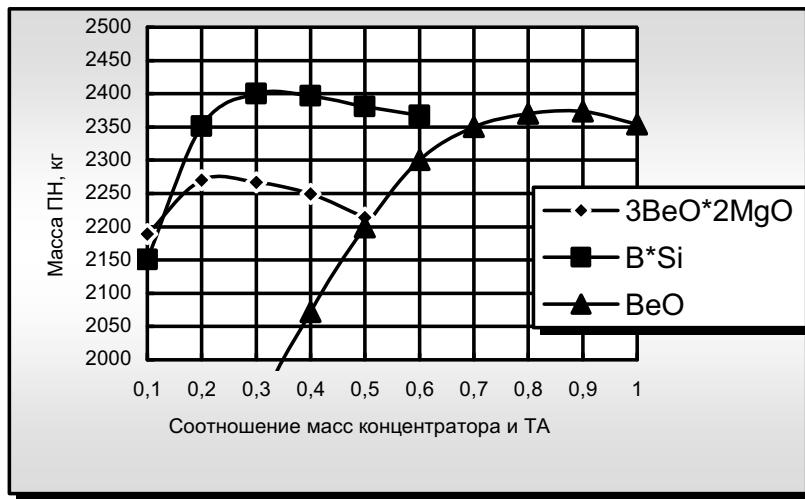


Рис. 1. Зависимость массы ПН от соотношения масс концентратора и ТА для высокотемпературных ТАМ

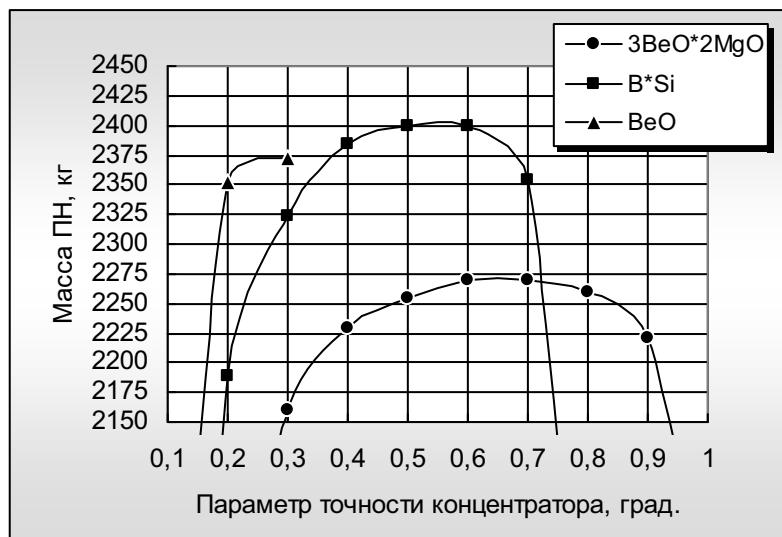


Рис. 2. Зависимость массы ПН от параметра точности зеркала

Зависимости размеров параболоидного концентратора от времени выведения ПН с низкой стартовой орбиты на ГСО для рассматриваемых ТАМ показаны на рис. 3. Как следует из графиков, эти зависимости близки друг к другу, являясь практически эквидистантными. Следует отметить несколько большие габариты концентратора в случае эвтектики B^*Si . Отметим также, что требуемая площадь концентратора при использовании ТА в составе СТРкД значительно меньше по сравнению с обычным СТРкД без теплового аккумулирования, что объясняется разделением этапов продолжительного заряда ТА и его быстрого разряда.

Чрезмерное снижение размеров концентратора приводит к увеличению времени аккумулирования тепла, что на начальном этапе выведения может сопровождаться ростом числа витков пассивного полета для обеспечения полного заряда ТА. Программа изменения полного импульса тяги (увеличение продолжительности каждого последующего активного участка), являющаяся наряду со статическими парамет-

рами двигателя объектом оптимизации, в некоторых задачах может быть реализована путем неполного расплавления ТАМ на начальных этапах полета.

Можно отметить, что в СТРкД с ТА возможно использование осевой схемы построения системы КП, поскольку она может автономно ориентироваться на Солнце без учета требований к ориентации в момент включения двигателя. Этим он отличается от обычного СТРкД, для которого может быть более целесообразна внеосевая (например, двухконцентрическая) схема [2; 15; 16].

Существенное снижение размеров зеркала с увеличением времени выведения, определяемое расположенным временем заряда ТА, может стать важным фактором для выбора целесообразного времени полета, поскольку концентратор представляет собой один из наименее отработанных элементов СТРкД. Его габариты во многом определяют требования к системе слежения за Солнцем и характеризуют инерционные свойства КА, в частности, требования к его управлению и ориентации.

Рассматривая зависимости массы ТА от времени выведения (рис. 4), также можно отметить эквидистантность кривых, монотонно снижающихся с ростом продолжительности полета. Здесь также можно сделать выводы о рациональном времени выполнения транспортной задачи, учитывая существенное снижение массы ТА с увеличением времени выведения. Наибольшая масса ТА соответствует использованию оксида бериллия, что в сочетании с высокой тугоплавкостью делает этот ТАМ менее привлекательным по сравнению с другими. Наиболее выгодным с позиции оценки массогабаритных показателей является ТА с использованием сплава B^*Si . Следует отметить, что вопросы определения массовых характеристик элементов ТА (в частности, массы контейнера ТА и его теплоизоляции), как и вопросы, касающиеся тепловых процессов в аккумуляторе на режимах плавления и затвердевания ТАМ, требуют дополнительного изучения и проведения широкого комплекса экспериментальных исследований [7; 8; 12]. Так, в работах ГосНИИ НПО «Луч» (см., например, [8]) анализ тепловых процессов в ТА проводится с помощью нестационарной двухмерной теплогидравлической модели. Результаты моделирования будут использованы при последующей углубленной проработке ТА на этапе технического предложения.

Рассмотрим зависимости выводимой массы ПН от времени перелета на ГСО (рис. 5). Из приведенных графиков следует, что наибольшей массовой эффективностью в диапазоне 30–60 суток обладает разгонный блок с СТРкД, использующий в качестве ТАМ эвтектику B^*Si . Масса ПН при этом может составлять около 2400 кг. При использовании современных ЖРД в рассматриваемой задаче масса ПН составляет до 1580 кг [4]. По этому показателю ракета-носитель среднего класса типа «Союз-2» с рассматриваемым СТРкД в задаче выведения на ГСО приближается к тяжелому носителю серии «Протон» с жидкостной верхней ступенью; стоимость выведения при этом может быть значительно уменьшена.

По сравнению с эвтектикой $3BeO \cdot 2MgO$ при времени выведения, равном 60 суткам, выигрыш в массе ПН в случае использования сплава B^*Si составляет свыше 100 кг. При дальнейшем увеличении времени полета целесообразным может стать использование оксида бериллия, однако выигрыш здесь слишком мал для того, чтобы рассматривать использование этого ТАМ, учитывая более жесткие требования к точности концентратора и, как следствие, условия ориентации системы КП на Солнце.

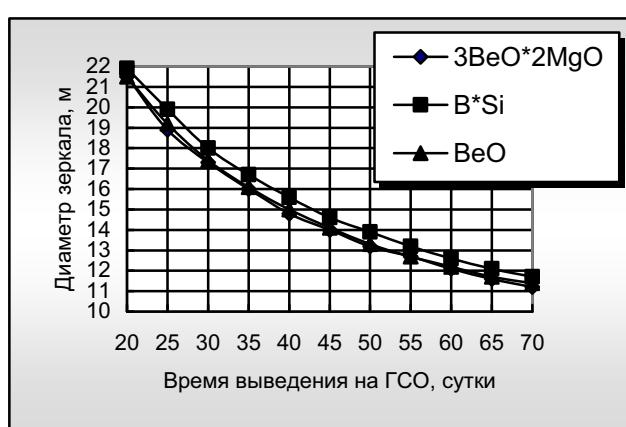


Рис. 3. Зависимость диаметра концентратора от времени выведения на ГСО

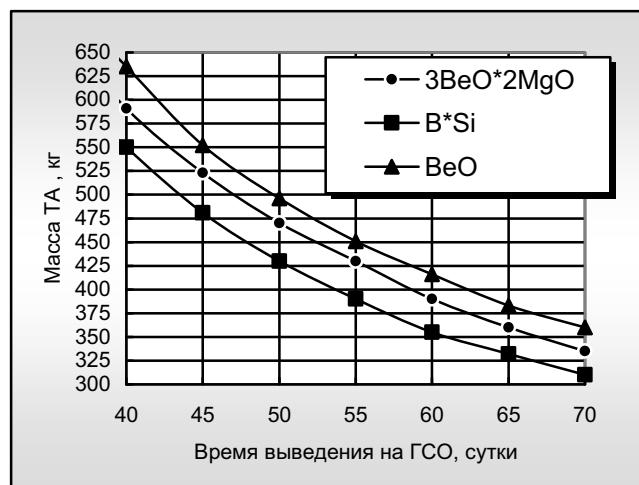


Рис. 4. Зависимость массы ТА от времени выведения на ГСО

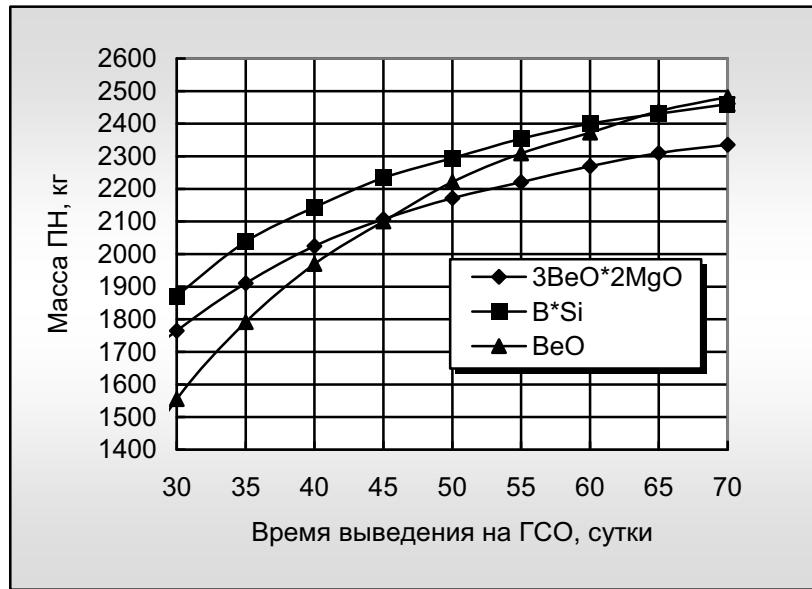


Рис. 5. Зависимость массы ПН от времени выведения

Увеличение располагаемого времени выведения приводит к росту массовой эффективности СТРкД со всеми рассмотренными ТАМ, однако при этом характер роста массы ПН приближается к асимптотическому. Уменьшение времени выведения приводит к резкому снижению массовой эффективности разгонного блока с СТРкД, что объясняется существенным ростом массы системы КП и ТА.

Следует также учесть, что большим временем выведения (от полугода и более) лучше соответствуют электроракетные двигатели с их значительно более высоким удельным импульсом. Поэтому СТРкД занимает временную нишу в 30–60 суток как целесообразную при заданных ограничениях на время полета.

Перспективы дальнейших исследований СТРкД с ТА. Можно выделить следующие возможные этапы перспективных исследований СТРкД с ТА. Так, ступенчатая система «светоприемник–ТА», например с двумя ступенями нагрева с различными ТАМ, может приводить к повышению общей эффективности использования двигателя в задачах межорбитальной транспортировки. Пример такого СТРкД показан в работе [5]. КПД такой системы будет заметно повышен за счет неоднородности нагрева светоприемника-аккумулятора, что позволит использовать концентратор с меньшей требуемой точностью и площадью. Требования к ориентации такой системы на Солнце могут быть заметно упрощены.

Здесь следует обратить внимание на расширение номенклатуры фазопереходных материалов, в том числе учитывая возможность использования эвтектики B*Si и других перспективных ТАМ. Конструкторская задача состоит в обеспечении надежного теплообмена между расплавом в каждой ступени и водородом, последовательно проходящим через разные ступени ТА, постепенно нагреваясь до конечной температуры. Требует решения задача обеспечения зарядки ТА при невысоких коэффициентах теплопроводности ТАМ в каждой ступени. Здесь можно предложить

использование металлических теплопроводящих реber или специальных присадок к ТАМ.

Перспективным является использование ТАМ, перегретых выше температуры плавления. Для этого могут подходить оксиды легких металлов, эвтектики различных ТАМ, металлический бериллий. Таким образом, возможно создание системы «светоприемник–ТА» с несколькими ступенями нагрева, содержащими соответствующие ТАМ. Распределение температур нагрева (перегрева) ступеней ТА при этом должно соответствовать закону распределения плотности потока сконцентрированной солнечной энергии на поверхности светоприемника, совмещенного с разными частями ТА. Это обеспечивает высокую степень неоднородности нагрева, что повышает энергетическую эффективность системы КП и упрощает требования к слежению концентратора за Солнцем во время пассивного движения по переходным орбитам во время заряда ТА.

Целесообразно рассмотрение СТРкД с ТА при дожигании нагретого водорода различными окислителями, например кислородом [1; 3; 11; 17], а также фтором или перекисью водорода, образующими с водородом высокоэнергетические топливные пары с более высоким стехиометрическим соотношением компонентов [1; 18]. В этом случае масса ТА и размер концентратора значительно снижаются, что может привести к улучшению массогабаритных показателей СТРкД и возможному повышению его полетной эффективности.

Следует отметить возможность создания высокотемпературных спектрально-селективных покрытий светоприемника-аккумулятора, позволяющих более существенно повысить его КПД, что упрощает создание концентратора солнечного излучения, снижает его требуемую точность и массу и существенно упрощает требования к точности слежения за Солнцем. Как показано в работе [11], параметр селективности возрастает с температурой нагрева таких поверхностей.

Поэтому потери на обратное собственное излучение светоприемника здесь могут быть сведены к минимуму. Задача при этом состоит в создании высокотемпературных спектрально-селективных покрытий, способных сохранять свои свойства в течение достаточно продолжительного времени (30–60 суток).

Заключение. Учитывая, что для солнечного теплового ракетного двигателя достаточно критичными являются режимы периодических апсидальных включений при необходимости одновременного управления вектором тяги и точного слежения системы КП за Солнцем, целесообразно рассмотрение СТРкД с тепловым аккумулятором, позволяющим разделить этапы периодического накопления энергии на пассивных участках многовитковых переходных орбит и включений двигателя в апсидальных областях. Поскольку фазопереходные ТАМ имеют определенные энергетические преимущества перед твердотельными ТАМ типа графита, рассмотрены вещества с температурой плавления выше 2000 К и удельной энергоемкостью более 2 МДж/кг. Предложены такие ТАМ, как BeO и бинарные эвтектики B^*Si и $3BeO^*2MgO$. В задаче выведения КА на ГСО оценивается эффективность использования рассмотренных ТАМ при выборе массы ПН в качестве критерия эффективности полетной задачи и ограничении на время полета до 60 суток.

Выбраны релевантные проектные параметры системы КП–ТА, к которым можно отнести отношение масс концентратора и ТА, а также параметр точности концентратора. Произведена их совместная оптимизация и представлены целесообразные значения этих параметров. Показано, что в случае использования тугоплавких ТАМ оптимальные соотношения масс концентратора и ТА смещаются в большую сторону с ростом рабочей температуры. Так, для композиции $3BeO^*2MgO$ оптимум соответствует 20–25 %. С повышением рабочей температуры этот оптимум сдвигается в сторону увеличения этого соотношения, составляя 30–40 % в случае эвтектики B^*Si и достигая 80–90 % в случае высокотемпературного оксида бериллия.

В отношении точности концентратора показано, что оптимальный параметр точности снижается (повышается оптимальная концентрация солнечного излучения) при повышении температуры плавления ТАМ. Так, если для эвтектики $3BeO^*2MgO$ оптимальный параметр точности соответствует $0,6^\circ$ – $0,7^\circ$, то для эвтектики B^*Si оптимум смещается влево и находится на уровне $0,5^\circ$ – $0,6^\circ$. Для оксида бериллия оптимальная точность концентратора не превышает $0,25^\circ$.

Использование в качестве ТАМ эвтектики B^*Si позволяет обеспечить максимум массы ПН в рассмотренной задаче при не слишком жестких требованиях к точности системы КП и слежения за Солнцем.

Показано, что масса ПН при использовании СТРкД с рассмотренными ТАМ более чем на 50 % превышает массу ПН при использовании современных жидкостных средств выведения. По отношению к остальным рассмотренным ТАМ использование эвтектики B^*Si заметно повышает массу ПН. Таким

образом, ракета-носитель среднего класса «Союз-2» с рассматриваемым СТРкД в задаче выведения на ГСО по грузоподъемности приближается к тяжелому носителю серии «Протон» с жидкостной верхней ступенью. Стоимость выведения при этом значительно уменьшается.

Показаны перспективы последующих разработок СТРкД с ТА, позволяющие повысить эффективность системы КП с ТА и увеличить массу ПН в задачах межорбитальной транспортировки. К ним можно отнести использование ступенчатой системы «светоприемник–ТА», дожигание нагреветого в ТА водорода, а также использование спектрально-селективных поверхностей нагрева светоприемника-аккумулятора.

Библиографические ссылки

1. Финогенов С. Л., Кудрин О. И. Принципы системности в проектировании солнечного теплового ракетного двигателя // Системный анализ в технике : тематический сб. науч. тр. М. : Вузовская книга, 2005. Вып. 8. С. 36–80.
2. Frye P. E., Kennedy F. G. Reusable Orbital Transfer Vehicles (ROTV) Applications of an Integrated Solar Upper Stage (ISUS) // AIAA Paper, 1997. № 97-2981.
3. Солнечная энергодвигательная установка с электронагревным тепловым аккумулятором и дожиганием рабочего тела / В. Н. Акимов [и др.] // Полет. 1999. № 2. С. 20–28.
4. Коротеев А. С. Концепция солнечной энергодвигательной установки с электронагревным тепловым аккумулятором и дожиганием рабочего тела // Вестник МАИ. 2000. Т. 7, № 1. С. 60–67.
5. Кудрин О. И., Финогенов С. Л. Солнечный ракетный двигатель со ступенчатой системой «приемник – тепловой аккумулятор» // Полет. 2000. № 6. С. 37–41.
6. Бекман Г., Гилли П. Тепловое аккумулирование энергии : пер. с англ. М. : Мир, 1987. 272 с.
7. Левенберг В. Д., Ткач М. П., Гольстрэм В. А. Аккумулирование тепла. Киев : Техніка, 1991. 112 с.
8. Федик И. И., Степанов В. С., Якубов В. Я. Аккумуляторы электрической и тепловой энергии на основе фазовых переходов // Сб. науч. докладов II Междунар. совещания по проблемам энергоаккумулирования и экологии в машиностроении, энергетике и на транспорте. М. : ИМАШ РАН, 2001. С. 17–25.
9. Федик И. И., Попов Е. Б. Двигательно-энергетическая установка на солнечных тепловых аккумуляторах // Сб. науч. докладов III Междунар. совещания по проблемам энергоаккумулирования и экологии в машиностроении, энергетике и на транспорте. М. : ИМАШ РАН, 2002. С. 282–292.
10. Кудрин О. И., Финогенов С. Л. Гидрид лития как теплоаккумулирующее вещество солнечного ракетного двигателя импульсного включения // Полет. 2000. № 8. С. 17–20.
11. Кудрин О. И. Солнечные высокотемпературные космические энергодвигательные установки. М. : Машиностроение, 1987. 247 с.

12. Грилихес В. А., Матвеев В. М., Полуэктов В. П. Солнечные высокотемпературные источники тепла для космических аппаратов. М. : Машиностроение, 1975. 248 с.
13. Сафранович В. Ф., Эмдин Л. М. Маршевые двигатели космических аппаратов. Выбор типа и параметров. М. : Машиностроение, 1980. 240 с.
14. Textile composites and inflatable structures II / E. Onate, B. Kroplin (eds.). Berlin : Springer, 2008. 272 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-6856-0 (Ser. Computational Methods in Applied Sciences; vol. 8).
15. McClanahan J. A., Frye P. E. Solar Thermal Propulsion Transfer Stage Design for Near-Term Science Mission Applications // AIAA Paper. 1994. № 94-2999.
16. Emrich W. J. Jr. Design Considerations for Space Transfer Vehicles Using Solar Thermal Propulsion // AIAA Paper. 1995. № 95-2634.
17. Kudrin O. I., Finogenov S. L., Nickolenko V. V. Solar Thermal Rocket Engine with Post-Burning: the Possibility of Its Usage in Space // Space Technology. 1996, Vol. 16, No. 1. Pp. 15–19.
18. Финогенов С. Л., Коломенцев А. И., Кудрин О. И. Использование различных окислителей для дожигания водорода, нагреваемого в ракетном двигателе за счет солнечной энергии // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 3. С. 680–689.

References

1. Finogenov S. L., Kudrin O. I. [Principles of systems analysis for solar thermal propulsion design]. *Systems analysis in engineering*. Moscow, Vuzovskaya kniga Publ., 2005, Vol. 8. P. 36–80 (In Russ.).
2. Frye P. E., Kennedy F. G. Reusable Orbital Transfer Vehicles (ROTV) Applications of an Integrated Solar Upper Stage (ISUS). AIAA Paper 1997, no. 97-2981.
3. Akimov V. N., Arhangel'skij N. I., Koroteev A. S., Kyz'min E. P. [Solar power propulsion plant with electrically-heated thermal storage and working medium afterburning]. *Polyot*, 1999, no. 2, P. 20–28 (In Russ.).
4. Koroteev A. S. [conception of solar power propulsion plant with electrically-heated thermal storage and working medium afterburning]. *Vestnik MAI*. 2000, Vol. 7, No. 1, P. 60–67 (In Russ.).
5. Kudrin O. I., Finogenov S. L. [Solar thermal propulsion with staged system “absorber–thermal storage”]. *Polyot*, 2000, No. 6, P. 37–41 (In Russ.).
6. Bekman G., Gilli P. *Teplovoe akkumulirovaniye energii*. [Thermal energy storage]. Moscow, Mir Publ., 1987, 272 p.
7. Levenberg V. D., Tkach M. P., Gol'strem V. A. *Accumulirovaniye tepla*. [Heat accumulating]. Kiev, Tehnika Publ., 1991, 112 p.
8. Fedik I. I., Stepanov V. S., Yakubov V. Ya. [Accumulators of electrical and thermal energy based on phase transitions]. *Sbornik dokladov II Mezhdunarodnogo soveshchaniya po problemam energoakkumulirovaniya i ekologii v mashinostroenii, energetike i na transporte* [Proc. II Int. Conference on problems of energy storage and ecology in mechanical engineering, energetic and transport]. Moscow, IMASH RAS, 2001, P. 17–25 (In Russ.).
9. Fedik I. I., Popov E. B. [Power-propulsion plant based on solar thermal storage]. *Sbornik dokladov III Mezhdunarodnogo soveshchaniya po problemam energoakkumulirovaniya i ekologii v mashinostroenii, energetike i na transporte* [Proc. III Int. Conference on problems of energy storage and ecology in mechanical engineering, energetic and transport]. Moscow, IMASH RAS, 2002, P. 282–292 (In Russ.).
10. Kudrin O. I., Finogenov S. L. [Lithium hydride as heat accumulating material for solar thermal propulsion of impulse burn]. *Polyot*, 2000, no. 8, P. 17–20 (In Russ.).
11. Kudrin O. I. *Solnechnye vysokotemperaturnye kosmicheskie energodvigatel'nye ustanovki*. [Solar high-temperature space power plants]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987, 247 p.
12. Grilihes V. A., Matveev V. M., Poluehktov V. P. *Solnechnye vysokotemperaturnye istochniki tepla dlya kosmicheskikh apparatov* [Solar high-temperature heat sources for space vehicles]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 248 p.
13. Safranovich V. F., Emdin L. M. *Marshevye dvigateli kosmicheskikh apparatov. Vybor tipa i parametrov* [Sustainer engines for space vehicles. Choice of type and parameters]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980, 240 p.
14. Textile composites and inflatable structures II. Onate E., Kroplin B. (eds.). Berlin: Springer, 2008, 272 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-6856-0 (Ser. Computational Methods in Applied Sciences; vol. 8).
15. McClanahan J. A., Frye P. E. Solar Thermal Propulsion Transfer Stage Design for Near-Term Science Mission Applications. AIAA Paper 1994, No. 94-2999.
16. Emrich W. J. Jr. Design Considerations for Space Transfer Vehicles Using Solar Thermal Propulsion. AIAA Paper 1995, No. 95-2634.
17. Kudrin O. I., Finogenov S. L., Nickolenko V. V. Solar Thermal Rocket Engine with Post-Burning: the Possibility of Its Usage in Space. *Space Technology*. 1996, Vol. 16, No. 1, P. 15–19.
18. Finogenov S. L., Kolomentsev A. I., Kudrin O. I. [Use of different oxidizers for afterburning of hydrogen heated in rocket engine by solar energy]. *Vestnik SibGAU*, 2015, Vol. 16, No. 3, P. 680–689 (In Russ.).

**КОМПОНЕНТЫ ВЫСОКОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА
ДЛЯ СВЕРХНИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР (4,2 К) СИСТЕМЫ АДАПТАЦИИ
ТРАНСФОРМИРУЕМОЙ КОСМИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ**

А. В. Юсов^{1*}, С. А. Козлов¹, М. Ю. Архипов², Е. А. Костров²

¹ООО «Прикладная механика»

Российская Федерация, 105203, г. Москва, ул. Парковая 15-я, 5

²ФГБУН ФИАН им. П. Н. Лебедева

Российская Федерация, 119991, г. Москва, просп. Ленинский, 53

*E-mail: yusov@amech.ru

Поставлена проблема создания криогенных исполнительных механизмов для трансформируемых космических конструкций. Отмечены основные вопросы, связанные с реализацией задачи создания описываемых устройств. Показана широкая область применения и востребованность высокоточных низкотемпературных механизмов. Отдельно отмечена востребованность в рассматриваемых изделиях отечественных проектов, таких как «Миллиметрон». Представлены прототипы, являющиеся основой для развития тематики, на их примере показана преемственность результатов, позволяющая сократить издержки при переходе к проектированию и производству опытных образцов изделий с новыми свойствами. В качестве первого этапа развития заявленной тематики предлагается переработка хорошо зарекомендовавшего себя и подходящего по ряду признаков двигателя, применявшегося ранее в изделиях со схожим назначением, но другого температурного диапазона. Сообщено о проведенных работах, вариантах исполнения опытных образцов, о первых испытаниях в среде жидкого азота, проверке работоспособности.

В продолжение исследований в заявлном направлении сообщено о проведённых опытах, показывающих работоспособность опытных образцов в условиях жидкого гелия. Описана установка, представлена схема и последовательность испытаний в условиях жидкого гелия. Проведены сравнения электрических параметров образцов в разном исполнении. Оба образца показали перспективность принятых проектных и конструкторских решений.

Поставлена задача и определены перспективы развития высокоточных низкотемпературных вакуумных линейных электромеханических приводов на ближайшее будущее.

Сообщено о результатах проектирования и испытаниях опытных образцов при гелиевых температурах (4,2 К).

Ключевые слова: линейный привод, двигатель, сверхнизкие гелиевые температуры, гексапод.

Vestnik SibGAU
Vol. 17, No. 1, P. 170–175

**COMPONENTS OF HIGH-PRECISION ELECTROMECHANICAL ACTUATOR
FOR SYSTEM OF ADAPTATION TRANSFORMABLE SPACE TELESCOPE
FOR ULTRA-LOW TEMPERATURES (4.2 K)**

A. V. Jusov^{1*}, S. A. Kozlov¹, M. Ju. Arkhipov², E. A. Kostrov²

¹LLC “Applied mechanics”

5, Parkovaya 15-ya Str., Moscow, 105203, Russian Federation

²P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences

53, Leninskiy Av., Moscow, 119991, Russian Federation

*E-mail: yusov@amech.ru

The problem was set up of creation of cryogenic actuating mechanisms for transformable space structures. The main issues were emphasized relating to the implementation of the task to create the described devices. The wide area of application and the demand for high-accuracy low-temperature mechanisms were demonstrated. The relevance of the described articles for domestic projects, such as Millimetron, was separately noted. The prototypes forming the basis for the development of the subject matter were demonstrated, and with their examples the consistency of the results was illustrated enabling to reduce costs to be incurred at the time of transition to the design and manufacture of test samples of the product with new properties. As the first stage of development of the claimed subject matter the

reworking was proposed of a well-proven engine which is suitable in terms of a number of features and had been used previously in articles with a similar purpose but with a different temperature range. The completed works, the options of embodiment of test samples, the first test in the liquid nitrogen environment, and the functionality check were reported.

Further to the research in the claimed area, the conducted experiments showing the functionality of test samples in the liquid helium environment were reported. The unit was described; the diagram and sequence of tests in the liquid helium environment were demonstrated. Comparisons were performed between the electric parameters of samples of different design. Both samples demonstrated the prospective viability of the adopted design and engineering solutions.

The problem was set up and the prospects were defined for the nearest future of development of high-accuracy low-temperature vacuum linear electromechanical drives.

The results of designing and testing of test samples at helium temperatures (4.2 K) were reported.

Keywords: Electromechanical actuator, ultra-low temperatures (4.2 K).

Введение. Перспективные космические трансформируемые конструкции, работающие при сверхнизких температурах (4,2 К), требуют решения целого ряда сложных инженерных задач. Концепция таких конструкций подразумевает наличие комплекса высокоточных (порядка 1 мкм) линейных электромеханических приводов, работающих при температурах жидкого гелия и сопутствующих факторах космического пространства (ФКП).

Проблематика создания таких приводов затрагивает в первую очередь вопросы проектирования, конструирования, производства, испытания, накопления и переработки опыта. Ключевым фактором успешного решения комплекса задач является определение приоритета параметров такого привода и реализация приоритета параметров при проектировании и конструировании привода для данных условий. Привычные параметры, стоящие в приоритете при проектировании привода для нормальных условий или для условий воздействия ФКП, отходят на второй план. Также немаловажными являются вопросы специального материаловедения [1; 2], применимости и совместимости материалов, изученности свойств материалов. Неотъемлемой частью проектирования является учет особенностей электротехники низких температур.

Область применения. Предпосылками к применению низкотемпературных высокоточных механизмов в крупногабаритных трансформируемых конструкциях в частности и космической технике вообще послужили требования к освоению миллиметрового и инфракрасного диапазонов длин волн. При этом одной из сфер применения низкотемпературных высокоточных механизмов являются научные и прикладные приборы для наблюдения в миллиметровом и инфракрасном диапазонах длин волн. Глубокое охлаждение приемников и вспомогательных механических систем в этих диапазонах необходимо для обеспечения требуемых уровней чувствительности. В состав приемников часто входят механические элементы юстировки и настройки, которые должны функционировать при криогенных температурах [3]. В качестве успешного проекта можно привести пример космической обсерватории «Гершель» (ЕКА), имевшей в составе гетеродинного приемника для дальнего инфракрасного диапазона (HIFI) прецизионный криогенный переключающий механизм [4]. Еще одним примером применения прецизионного криогенного механизма для перспективного космического

телескопа является проект SAFARI imaging spectrometer [5]. Кроме того, высокие требования к точности оптических систем из-за малых длин волн требуют дополнительной юстировки отдельных оптических элементов, составляющих отражающую поверхность главного зеркала, особенно в случае их больших габаритов. В частности, космическая обсерватория JWST (планируемая дата запуска – 2018 г.) имеет главное зеркало габаритом 6 м, в состав которого входит 18 юстируемых элементов, каждый из которых требует 7 прецизионных криовакуумных механизмов линейного перемещения [6]. Кроме того, еще 6 механизмов линейного перемещения входят в систему настройки (гексапод) вторичного зеркала. Юстировку планируется проводить при температурах порядка 40 К. В проекте российской обсерватории «Миллиметрон» предполагается использование еще большего количества низкотемпературных высокоточных механизмов линейного перемещения [7]. Также в качестве примера актуальности рассматриваемой задачи можно упомянуть об использовании актиоаторов в конструкциях систем точного позиционирования в высоком вакууме при криогенных температурах, которые применяются в установках лазерного термоядерного синтеза, например в NIF (США) [8], HiPER (ЕС) [9].

В качестве источников движения, используемых в криогенных и вакуумных механизмах, наибольшее распространение получили шаговые электромоторы производства Phytron Electronik GmbH [10]. Кроме того, имеются моторы, основанные на использовании пьезоэлектрического эффекта [11; 12].

Актуальность. Актуальность проблемы при реализации отечественных проектов в различных областях науки и техники высокая. В сложившихся обстоятельствах доступность импортного оборудования по наукоёмким направлениям сократилась. Успешная реализация задачи разработки, производства и внедрения отдельных компонентов и законченных низкотемпературных вакуумных высокоточных механизмов поможет решить часть вопросов импортозамещения в данной области.

Предшествующий опыт. Проблематика задач высокоточного перемещения в условиях воздействия факторов космического пространства стала исследоваться в коллективе для реализации механизма 6-координатного позиционирования полезной нагрузки. На данном этапе стали актуальны проблемы компоновки, жесткости, выбора материалов пар трения,

теплового режима, стойкости к ФКП, загрязнения вакуума. Наряду с проблемами механики и технологии производства, потребовали особого внимания проблемы согласованного управления шестью высокоточными линейными приводами с ограниченными возможностями обратных связей. Ранее разработанный в коллективе математический аппарат механизмов параллельной структуры типа «гексапод» был адаптирован для реализации высоких точностей согласованного перемещения. В результате проведения комплекса исследовательских и проектно-конструкторских работ получил реализацию манипулятора 6-степенной вакуумного исполнения радиационно стойкий «Гексапод-ПМ-мкм-3» (рис. 1) [13].

Опыт, полученный при создании серии высокоточных манипуляторов вакуумного исполнения, в том числе опыт отработки и производства высокоточных линейных исполнительных механизмов, опыт варьирования параметров и адаптации электромашин, позволил обратиться к проблематике высокоточных электромеханических приводов вакуумного исполнения для сверхнизких температур (4,2 К).

Постановка задачи. Для предоставления возможности потребителям решения области задач перемещения, позиционирования, юстировки в условиях сверхнизких (порядка 4,2 К) температур, необходимо разработать и изготовить комплекс компонентов, механизмов и систем управления для данных условий.

Реализация. На первом этапе реализации поставленной задачи решено начать с разработки и проверки работоспособности опытного образца электродвигателя (рис. 2) как ключевого компонента электромеханического привода. В качестве базовых компонентов первого опытного образца решено применять части электродвигателя, хорошо зарекомендовавшего себя

в условиях вакуума при разработке и испытании изделия «Гексапода-ПМ-мкм-3». Компоненты двигателя выполнены из подходящих материалов, корпус выполнен из титана, обладающего низким коэффициентом линейного температурного расширения (КЛТР), вал – из нержавеющей стали. Все применённые материалы стойкие к температурам жидкого гелия, а изготовленные из них детали показали удовлетворительную работоспособность.

В процессе переработки компонентов штатного двигателя было получено 2 варианта двигателя с разными обмотками. Обмотки отличались от штатной применяемыми материалами изоляции. Были опробованы 3 типа изоляции на основе полиимида и фоторопласта. Длина и сопротивления обмоток отличались от штатной и друг от друга на промежуточных этапах в 300 раз.

Исследовались в процессе плавного и ударного замораживания в жидком азоте клеи для сборки статора. Исследовались возможности бесклееевой сборки. Рассмотрены на опыте предшествующих образцов возможности фиксации элементов сваркой лазером. По результатам проверки свойств после воздействия низких температур на данном этапе клеевая сборка статора остается основной.

В качестве опорных узлов ротора двигателя исследовались подшипники качения и подшипники скольжения с компенсацией радиального биения вала за счет подпружиненной конической втулки.

Проверялась работоспособность двигателя в среде жидкого азота после плавного и ударного замораживания. Проверялась работоспособность после погружения в жидкий азот в атмосфере в условиях обледенения (рис. 3).



Рис. 1. Манипулятор «Гексапод-ПМ-мкм-3» ООО «Прикладная механика»

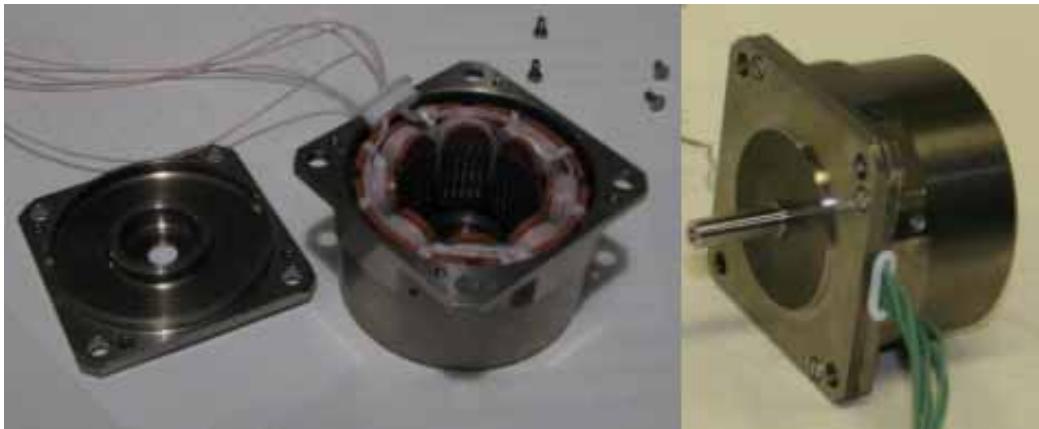


Рис. 2. Общий вид двигателя



Рис. 3. Двигатель в процессе обледенения после извлечения из емкости с жидким азотом

На втором этапе образцы двигателей проверялись на работоспособность в условиях жидкого гелия. Для определения наличия движения была собрана система контроля вращения с дублированием каналов разными методами измерения.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 4. Испытания проводились следующим образом.

Двигатель 1 помещался в гелиевый объем 3 криостата КГ300/60. Перед началом испытаний гелиевый объем заполнялся газообразным гелием и подсоединялся к газгольдеру. Затем объем 5 заполнялся жидким азотом, что приводило к медленному (в течение нескольких часов) понижению температуры двигателя до приблизительно 100 К за счет теплообмена излучением с тепловым экраном 4, при этом в гелиевом объеме при помощи газгольдера поддерживалось постоянное давление выше атмосферного. Данная схема охлаждения позволила избежать попадания атмосферного воздуха на детали двигателя, что могло привести к его повреждению при вращении, а также избежать высокого градиента температур на внешних и внутренних частях конструкции за счет малой скорости

охлаждения. Далее гелиевый объем 3 заполнялся жидким гелием. Для контроля уровня жидкого гелия использовался угольный термометр сопротивления ТВО 2 [14] и температурный регулятор для криогенных температур Lakeshore 336 [15]. После завершения испытаний двигатель находился в гелиевой атмосфере до тех пор, пока он не достиг комнатной температуры.

Испытания в среде жидкого гелия (по сравнению с испытаниями в вакууме) являются более «мягкими» для двигателей, поскольку обеспечивается жидкая смазка пар трения, а также более равномерные температурные поля в конструкции.

Контроль функционирования осуществлялся для двигателя № 1 – вакуумным магнитным контактом и датчиком с сухим контактом, для двигателя № 2 – только вакуумным магнитным контактом.

Каждый двигатель успешно прошел 4 цикла запуска-останова. В ходе испытаний кроме проверки функционирования были исследованы изменения сопротивления обмоток двигателей (см. таблицу) при захолаживании.

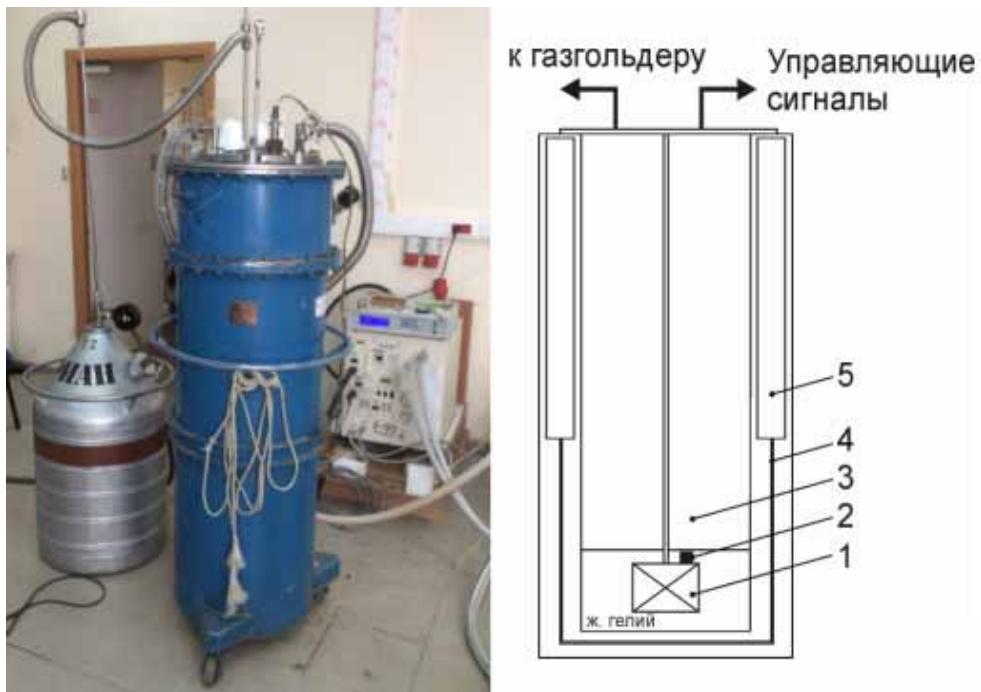


Рис. 4. Криостат для испытаний в жидкем гелии:
слева – общий вид установки; справа – схема испытаний

Сопротивление обмоток двигателей, Ом

T, K	Двигатель № 1		Двигатель № 2	
	Обмотка № 1	Обмотка № 2	Обмотка № 1	Обмотка № 2
293	309	306	6	6
100	76	74	2,4	2,4
4,5	7,5	6,2	1,2	1,2
4,5 (повторный залив гелия)	7,5	6,2	1,2	1,2

Заключение. В рамках решения задач проектирования, конструирования, а также подтверждения правильности принятых решений, созданы опытные образцы шаговых двигателей для гелиевых температур с различными тестовыми параметрами конструкции. Комплекты прошли последовательное испытание при азотных температурах, а впоследствии и при гелиевых температурах (4,2 К). Двигатели и компоненты контроля движения показали работоспособность при заданных условиях.

Таким образом, опираясь на полученный результат опытных испытаний при сверхнизких температурах двигателей и на опыт проектирования высокоточных линейных приводов, можно планировать получить криовакуумный линейный электромеханический привод для различных систем перспективных космических конструкций.

Решение задачи актуально как для наземного [3], так и для космического исполнения [4].

Библиографические ссылки

- Малков М. П. Справочник по физико-техническим основам криогеники. М. : Энергоатомиздат, 1985. 230 с.
- Новицкий Л. А. Теплофизические свойства материалов при низких температурах. М. : Машиностроение, 1975. 91 с.
- Cryogenic actuators in ground-based astronomical instrumentation / R.-R. Rohloff [et al.] ; Max-Planck-Institut für Astronomie. Heidelberg, 2004, P. 2.
- Cryogenic mechatronic design of the HIFI Focal Plane Chopper / R. Huisman [et al.] ; SRON Netherlands Institute for Space Research, Groningen, The Netherlands, Institute for Technology, Engineering & Management. Groningen, 2011. P. 1.
- Cryogenic actuator testing for the SAFARI ground calibration setup / C. de Jonge [et al.] ; SRON Netherlands Institute for Space Research. Groningen, 2011. P. 2.
- Gardner J. P., Mather J. C. The James Webb Space Telescope // *Space Science Reviews*. 2006. № 123. P. 485–606.
- Space mission Millimetron for terahertz astronomy / N. S. Kardashev [et al.] // *Optical, Infrared, and Millimeter Wave: Proc. SPIE 8442*, Space Telescopes and Instrumentation 2012. 84424C (September 1, 2012).
- Moses E. I. Ignition on the National Ignition Facility // *Journal of Physics : Conference Series*. 2008. № 112. P. 01200.
- The HiPER project for inertial confinement fusion and some experimental results on advanced ignition schemes / D. Batani, M. Koenig [et al.] // *Plasma Phys. Control. Fusion* 53. 2011. 124041. 13 pp.
- Phytron Electronik GmbH [Электронный ресурс]. URL: <http://www.phytron.de> (accessed: 27.12.2015).

11. Sanguinetti B., Varcoe B. T. H. Use of a piezoelectric SQUIGGLE motor for positioning at 6 K in a cryostat / Quantum Optics Group, Department of Physics, University of Sussex. Brighton, 2006. P. 695.
12. Janssen precision engineering [Электронный ресурс]. URL: <http://www.jpe.nl> (accessed: 27.12.2015).
13. Applied mechanics [Электронный ресурс]. URL: <http://www.amech.ru> (accessed: 27.12.2015).
14. Datskov V. I., Weisend J. G. Characteristics of russian carbon resistance (TVO) cryogenic thermometers, Cryogenics. Supplement 1. 1994. Vol. 34. P. 425–428.
15. Lake Shore Cryotronics [Электронный ресурс]. URL: <http://lakeshore.com/Pages/Home.aspx> (accessed: 27.12.2015).

References

1. Malkov M. P. *Spravochnik po fiziko-tehnicheskim osnovam kriogeniki*. [Handbook of physical-technical fundamentals of cryogenics]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985, P. 230.
2. Novickiy L. A. *Teplofizicheskie svoystva materialov pri nizkikh temperaturakh* [Thermophysical properties of materials at low temperatures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 91 p.
3. Rohloff R.-R. et al. Cryogenic actuators in ground-based astronomical instrumentation. Max-Planck-Institut für Astronomie, Heidelberg, Germany, 2004, P. 2.
4. Huisman R. et al. Cryogenic mechatronic design of the HIFI Focal Plane Chopper. SRON Netherlands Institute for Space Research, Groningen, The Netherlands, Institute for Technology, Engineering & Management, Groningen, The Netherlands, 2011, P. 1.
5. De Jonge C. et al. Cryogenic actuator testing for the SAFARI ground calibration setup. SRON Netherlands Institute for Space Research, Groningen, The Netherlands, 2011, P. 2.
6. Gardner J. P., Mather J. C. The James Webb Space Telescope. *Space Science Reviews*. 2006, Vol. 123, P. 485–606.
7. Kardashev N. S., Arkhipov M. Yu., Vinogradov I. S. et al. Space mission Millimetron for terahertz astronomy. Proc. SPIE 8442, Space Telescopes and Instrumentation 2012: *Optical, Infrared, and Millimeter Wave*, 84424C (September 1, 2012).
8. Moses E. I. Ignition on the National Ignition Facility. *Journal of Physics: Conference Series*. 2008, Vol. 112, P. 01200.
9. Batani D., Koenig M. et al. The HiPER project for inertial confinement fusion and some experimental results on advanced ignition schemes, *Plasma Phys. Control.* 2011, Fusion 53, P. 124041 (13pp).
10. Phytron Electronik GmbH. Available at: <http://www.phytron.de> (accessed 27.12.2015).
11. Sanguinetti B., Varcoe B. T. H. Use of a piezoelectric SQUIGGLE motor for positioning at 6 K in a cryostat. Quantum Optics Group, Department of Physics, University of Sussex, Brighton, United Kingdom, 2006, P. 695.
12. Janssen precision engineering. Available at: <http://www.jpe.nl> (accessed 27.12.2015).
13. Applied mechanics. Available at: <http://www.amech.ru> (accessed 27.12.2015).
14. Datskov V. I., Weisend J. G. Characteristics of Russian carbon resistance (TVO) cryogenic thermometers, Cryogenics. Supplement 1. 1994. Vol. 34. P. 425–428.
15. Lake Shore Cryotronics. Available at: <http://lakeshore.com/Pages/Home.aspx> (accessed 27.12.2015).

Раздел
PART
3



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ
И МАТЕРИАЛЫ

TECHNOLOGICAL
PROCESSES
AND MATERIALS SCIENCE

**МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ
ТОНКИХ ПЛЕНОК СИСТЕМЫ СО–РД**

Е. М. Артемьев, Л. Е. Якимов*

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

Изучение фазовых структурных превращений и их взаимосвязи с магнитными свойствами металлических систем и их сплавов является одной из важных задач космического материаловедения. Кроме фундаментального значения эти исследования позволяют в перспективе получать материалы со сложными заданными магнитными свойствами. Получены и исследованы тонкие пленки сплава системы Co–Pd, конденсированные при различных температурах подложек, идентифицированы фазовый состав и кристаллические метастабильные структуры, возникающие в пленках данного сплава. Исследованы намагниченность насыщения, магнитная кристаллографическая анизотропия, параметр обменного взаимодействия, константа перпендикулярной магнитной анизотропии полученных пленок. Обнаружен ряд метастабильных состояний, отсутствующих в объемных образцах. Поведение намагниченности насыщения показывает влияние магнитного порядка на величину обменного взаимодействия. Температурная зависимость константы магнитной кристаллографической анизотропии позволяет отнести составы с большим содержанием палладия к зонным ферромагнетикам. Проведено теоретическое обоснование наблюдаемого выхода намагниченности из плоскости пленки в двухфазных пленках (ГПУ, ГЦК) системы Co–Pd. Эта особенность потенциально означает возможность более плотной магнитной записи информации с использованием этих материалов.

Ключевые слова: сплав Co–Pd, тонкие пленки, магнитные свойства, анизотропия, двухфазные системы.

Vestnik SibGAU
Vol. 17, No. 1, P. 178–185

**MAGNETIC PROPERTIES AND PHASE COMPOSITION
OF THE THIN LAYERS OF CO–PD SYSTEM**

E. M. Artem'ev, L. E. Yakimov*

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

One of the most important areas of space material science and metallurgy is studying phase and structural transitions of the metallic systems and alloys in connection with their magnetic properties. It advances the fundamental science but also leads to producing materials of desired complex magnetic structure. This paper deals with preparation and study of the Co–Pd thin films of various stoichiometry, obtained at different substrate temperatures and regimes. We examined phase composition, crystalline structure and its variation, saturation magnetization, coercive force, magnetic crystallographic anisotropy, exchange interaction parameter, perpendicular magnetic anisotropy constant of the films made. The properties of the systems were studied in connection with the conditions and regimes of the film preparation. The results reveal a number of metastable states which are absent in the bulk samples of the same overall composition. The saturation magnetization behavior implies a magnetic interactions interplay which affects the exchange interaction. Magnetic crystallographic anisotropy constant of the films changes with the temperature so that rich-Pd samples appear to be mostly zone ferromagnetic. We suggest a theoretical model of two-phase Co–Pd system (with fcc and hcp regions). The calculated value of the torque acting upon the film is in agreement with the experiment. The model explains the effect of the easy magnetization axis becoming perpendicular to the film/substrate plane, which is the case for films with 0.5–0.55 palladium content. This unusual property favours the possible use of the materials for high density data recording.

Keywords: Co–Pd alloy, thin films, magnetic properties, anisotropy, two-phase systems.

Введение. Известно, что сплав Co–Pd, например, эквивалентного состава, имеющий в массивных образцах только ГЦК-решетку, в пленочных образцах может быть получен в ГПУ- и ТГЦ-модификациях, а также в нанокристаллическом состоянии [1].

В настоящей статье будут рассмотрены изменения магнитных свойств тонких пленок сплава Co–Pd при переходе его из одной модификации в другую.

Свойства системы Co–Pd. Область существования ГПУ-фазы значительно расширена в пленочных образцах и простирается от Co до $\text{Co}_{40}\text{Pd}_{60}$ по сравнению с массивными. Низкие температуры подложек при напылении способствуют образованию ГПУ-фазы, которая при отсутствии других фаз при комнатной температуре существует довольно длительное время. ГПУ-фаза сплава, конденсируясь на подложки, образует текстуру – базисная плоскость (001) параллельна плоскости подложки. Измерения намагниченности насыщения M_s дают при 20°C для однофазных ГПУ-пленок эквивалентного состава величину 1000 ± 80 Гс. Намагниченность насыщения ГЦК-однофазных пленок того же состава равна 800 ± 50 Гс, увеличиваясь при обогащении сплава кобальтом. Известно, что кобальт существует в двух модификациях в пленочных образцах при комнатной температуре: ГПУ ($a = 0,251$ нм, $C = 0,410$ нм) и ГЦК ($a = 0,355$ нм). Их намагниченность насыщения равна 1420 и 1370 Гс [2] соответственно, при 20°C изменяясь с понижением температуры до 4,2 К незначительно (1442 и 1390–1420 Гс соответственно, т. е. на 2 %).

Разницу в намагниченности насыщения однофазных ГПУ- и ГЦК-пленок одного и того же состава можно объяснить только тем, что дополнительный вклад в намагниченность ГПУ- и ГЦК-однофазных пленок одного и того же состава вносят атомы палладия. Из литературы известно [3], что палладий находится на грани того состояния, в котором металл становится ферромагнитным. В свободных атомах палладия внешние электроны имеют конфигурацию $4d^{10}$, и поэтому они магнитно-нейтральные (основное состояние атома $1s^0$). Однако из литературных данных [4] видно, что парамагнитная восприимчивость металлического палладия очень велика (при 300 K $\chi_A = 558 \times 10^6$, где χ_A – атомная магнитная восприимчивость). Это прямое следствие перекрытия энергетических зон 4d- и 5s-электронов в кристалле палладия. Согласно [4]

в среднем около 0,6 электрона на атом палладия переходит в 5s-зону и составляет столько же вакантных мест в 4d-зоне. Эти вакантные места (дырки) и вносят основной вклад в паулевскую парамагнитную восприимчивость металлического палладия, поскольку $\chi(T) = \chi_0/1-\lambda$, где $\lambda = \tau N(\xi_F)$; τ – обменный энергетический параметр; $N(\xi_F)$ – плотность состояний на уровне Ферми. Поскольку для палладия величина $\tau N(\xi_F)$ близка к единице, магнитная восприимчивость его очень велика.

Измерения намагниченности насыщения сплавов системы Co–Pd [5], которые являются ферромагнитными уже при содержании 0,1 % Co, свидетельствуют о вкладе атомов палладия в магнитный момент сплава, поскольку прямое обменное взаимодействие Co–Co

при такой низкой концентрации Co невозможно. Магнитный порядок в таких металлических системах, где прямой обмен между удаленными парамагнитными атомами практически отсутствует, обусловлен косвенным обменным механизмом, в котором активное участие принимают электроны проводимости матрицы. Качественно это можно объяснять тем, что добавление Co в матрицу Pd увеличивает перекрытие d- и s-зон, что соответственно увеличивает концентрацию дырок в 4d-зоне атома палладия, понижает энергию Ферми. Последнее вызывает повышение плотности состояний на уровне Ферми и приводит к появлению собственного магнитного момента атома палладия, а также к спонтанной намагниченности матрицы за счет косвенного обменного механизма. В статье [6] говорится, что при уменьшении межатомного расстояния в палладии обменный интеграл становится положительным, и палладий должен превратиться в ферромагнетик. Это вероятно, может наступить при комнатной температуре, если путем всестороннего сжатия обеспечить относительное изменение объема палладия приблизительно на 5 %. У однофазных пленок Co–Pd эквивалентного и близких к нему составов параметры решетки составляют $a = 0,258$ нм, $C = 0,428$ нм, а у однофазных ГЦК-пленок сплава того же состава $a = 0,376$ нм. Таким образом, расстояние между ближайшими соседями любого вида Pd–Pd, Pd–Co, Co–Co (поскольку в пленках обоих фаз после конденсации на подложку не наблюдается упорядоченное расположение атомов в решетке) в ГПУ-фазе равно 0,258 нм, а в ГЦК-фазе 0,266 нм. Зависимость магнитного момента на атом сплава от концентрации в ГПУ-однофазных пленках показана на рис. 1.

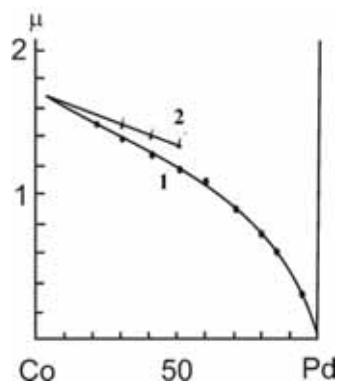


Рис. 1. Зависимость магнитного момента на атом сплава в единицах μ_B в зависимости от состава (1 – ГЦК-фаза, 2 – ГПУ-фаза)

Если сравнить ее с графиком концентрационной зависимости магнитного момента на атом ГЦК-фазы, то средний момент на атом в ГПУ-фазе больше, чем в ГЦК в исследованном интервале концентраций. Если считать, что магнитный момент атома Co в сплаве практически не меняется в зависимости от концентрации палладия и составляет 1,7 μ_B на атом, то увеличение намагниченности пленок ГПУ-фазы сплава связано с увеличением магнитного момента атомов Pd. Как показывает элементарный расчет, различие магнитного момента атома Pd в ГПУ-фазе от такового

в ГЦК-фазе того же состава равно 0,5–0,4 μ_B . Это, очевидно, связано с изменением электронной конфигурации атомов палладия из-за изменения решетки и, соответственно, симметрии окружения и расстояния до ближайших атомов.

Согласно двухзонной модели Мотта [7] качественно объяснить большую намагниченность ГПУ-фазы по сравнению с намагниченностью ГЦК-фазы одного и того же состава можно следующим образом. В переходных d-металлах уровень Ферми расположен ниже верхней границы d-зоны, которая только частично заполнена. Ширина d-зоны $W \sim 1/a$, где a – расстояние между ближайшими атомами (радиус первой координационной сферы). Поскольку $a(\text{ГЦК}) > a(\text{ГПУ})$, то $W(\text{ГЦК}) < W(\text{ГПУ})$.

Таким образом, перекрытие s- и d-зон в атомах палладия в ГПУ-фазе больше, чем в ГЦК, что соответствует большему количеству вакантных мест (дырок) в d-зоне атома в ГПУ-фазе и, следовательно, большему магнитному моменту палладия в этой фазе и большей суммарной намагниченности насыщения ГПУ-фазы по сравнению с ГЦК-фазой одного и того же состава.

Намагниченность насыщения двухфазных (ГПУ+ГЦК) пленок. Измерения намагниченности насыщения двухфазных (ГПУ+ГЦК) пленок осложняются тем, что для получения численных значений M_s каждой фазы надо знать количественные соотношения фаз, поскольку из измерений методом врачающих моментов получается значение MV , которое представляет сумму $M_1V_1 + M_2V_2$, где M_1 , M_2 и V_1 , V_2 – намагниченности насыщения и объемы ГПУ- и ГЦК-фаз соответственно. Из-за текстуированности образцов измерения объема фаз методом статистической обработки микрофотометрирования микрофотографий дают довольно большую погрешность, что соответственно оказывается на точности определения намагниченности насыщения фаз. Поэтому в данном случае логично говорить не о намагниченности насыщения ГПУ- и ГЦК-фаз, тем более, что и параметры этих фаз в двухфазной пленке отличаются от параметров однофазных ГПУ- и ГЦК-пленок того же состава, а о магнитном моменте на единицу объема пленки сплава, т. е. о намагниченности насыщения M_s пленки. Намагниченность насыщения двухфазных (ГПУ+ГЦК) пленок толщиной до 1500 Å лежит в области значений между намагниченностями насыщения ГПУ- и ГЦК-фаз того же состава (например, для эквиатомного состава 900–750 Гс). Величина M_s изменяется от пленки к пленке одного и того же состава в пределах, больших, чем ошибка измерений (5 %). Разброс значений M_s можно объяснить разным соотношением фаз в пленках одного и того же состава, изменением параметров решеток фаз в двухфазной системе.

Намагниченность насыщения однофазных ГЦК-пленок. ГЦК-однофазные поликристаллические и монокристаллические эпитаксиальные пленки, выращенные при $T_{\text{п}} 230$ – 260 °C, имеют намагниченность насыщения массивных образцов того же состава (рис. 1, 1). Высокотемпературные отжиги таких пленок эквиатомного и близких к нему составов позволяют получать атомно-упорядоченную структуру

с ТГЦ-решеткой типа L1₀ ($a = 0,416$ нм, $C = 0,334$ нм, $C/a = 0,81$). По мере исчезновения фазы с ГЦК-решеткой происходит уменьшение намагниченности насыщения до величины $M_s \sim 80$ Гс. Полностью фаза с ГЦК-решеткой не исчезает, поэтому малую намагниченность можно отнести за ее счет. Отсутствие намагниченности в фазе с ТГЦ-решеткой, возможно, обусловлено формированием в ней скомпенсированного антиферромагнетизма. Параметры a и C ТГЦ-решетки существенно зависят от режима термообработки [8]. Отношение C/a может достигать значения 0,80. Такое искажение решетки может привести к отрицательному знаку константы обменного взаимодействия и к антиферромагнитному упорядочению.

Намагниченность насыщения нанокристаллических пленок. Из литературных источников известно, что намагниченность насыщения аморфного материала весьма слабо меняется при его кристаллизации [9]. Намагниченность насыщения нанокристаллических пленок Co–Pd равна или несколько меньше (на 6–7 %) намагниченности насыщения кристаллической пленки того же состава. Это фиксируют измерения M_s до и после рекристаллизации одних и тех же образцов. Кроме того, наблюдается разброс значений M_s от пленки к пленке одного и того же состава (до 150 Гс). Наблюдающийся разброс значений M_s нанокристаллических пленок одного и того же состава, отличие этих значений от M_s кристаллических пленок можно объяснить относительно большим объемом переходных участков между областями с ГПУ- и ГЦК-симметрией взаимного расположения атомов. Переходные участки, очевидно, характеризуются флуктуациями межатомных расстояний, что может приводить к обменным взаимодействиям разного знака. Кроме того, это связано и с разным количественным соотношением объемов самих областей. Насыщение нанокристаллических пленок происходит в полях 100–800 Э.

Зависимость параметра обменного взаимодействия от структуры пленок сплава Co–Pd. Для экспериментальной оценки параметра обменного взаимодействия наибольший интерес представляет исследование низкотемпературных зависимостей намагниченности насыщения, где непосредственно выполняется закон $T^{3/2}$. Для расчета величины параметра обменного взаимодействия использовалось соотношение [10]

$$B = \frac{q\mu_A}{M_0} \left(\frac{k}{4\alpha\mu_A M} \right)^{\frac{3}{2}} F_{\frac{3}{2}} \left(\frac{T}{H} \right),$$

где величина B определялась непосредственно после перестройки экспериментальной кривой в координатах M от $T_{3/2}$. Интегральная функция Бозе–Эйнштейна $F_{3/2}(T/H)$ определяется выражением:

$$\begin{aligned} F_{3/2} \left(\frac{T}{H} \right) &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{x^{1/2} dx}{\exp \left(x + q\mu_A \frac{H}{kT} \right) - 1} = \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} n^{-3/2} \exp \left(-nq\mu_A \frac{H}{kT} \right). \end{aligned}$$

При $H = 0$ $F_{3/2}$ становится константой, независящей от температуры: $F_{3/2} = \xi(3/2) = 2,612$, где ξ – дзета-функция Римана.

Измерения $M(T)$ проводились в полях 22 кЭ. Величина намагниченности насыщения определялась экстраполяцией температурной зависимости намагниченности M от $T_{3/2}$ на ось 0 К.

Знание величины $B/F^{3/2}(T)$ и намагниченности насыщения дает возможность вычислить величину параметра обменного взаимодействия α [10]. Такие вычисления для пленок, обладающих ГПУ-, ГЦК- и нанокристаллической структурой, были проделаны, и на рис. 2 приведены значения вычисленного параметра обменного взаимодействия α , полученные для пленок сплава $\text{Co}_{50}\text{Pd}_{50}$. По оси ординат отложена величина $g\mu_B M$, т. е. D (ее размерность $\text{эВ}\cdot\text{\AA}^2$). Единицы измерения α – см². Нередко используют и другие системы единиц, например, в спектроскопических измерениях пользуются термином обменная жесткость $\eta = \alpha M$, размерность этого параметра см²·Э. Следовательно, α , η и D отличаются только постоянными множителями. Как видно на рис. 2, D увеличивается при изменении структурного состояния сплава $\text{Co}_{50}\text{Pd}_{50}$ от ГПУ-однофазных к нанокристаллическому и далее к ГЦК-однофазным пленкам. Из кривой $D(X)$ видно, что при фазовом переходе между кристаллическими твердыми растворами величина D меняется в 2,5 раза.

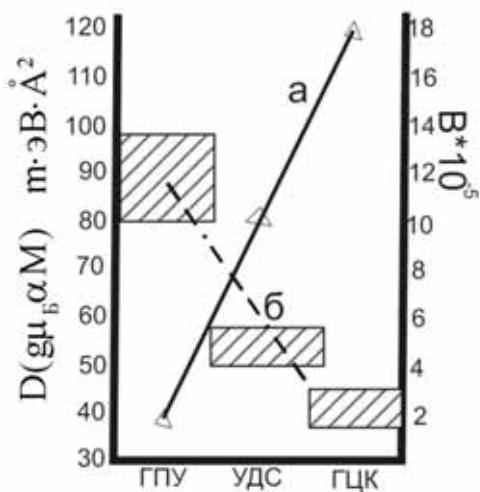


Рис. 2. Диаграмма состояния в координатах «обмен – структурное состояние» (а) и зависимость B от структуры $\text{Co}_{50}\text{Pd}_{50}$ (б)

Параметр обмена пленок с нанокристаллической структурой лежит между значениями для ГПУ- и ГЦК-кристаллических твердых растворов. Этот факт говорит о том, что нанокристаллическая структура представляет смесь нанокристаллических зародышей с ГПУ- и ГЦК-симметрией ближайшего окружения, поскольку для аморфных веществ параметр обмена, как видно из литературы [10–12], изменяется скачком при фазовом переходе «кристалл – аморфное состояние», и его значения не укладываются между значениями параметра обмена кристаллических модификаций сплава.

Магнитная кристаллографическая анизотропия пленок сплава Co-Pd . В работе [13] была исследована магнитная кристаллографическая анизотропия пленок сплава Co-Pd при 20 °C во всей концентрационной области составов. Было показано, что K_1 линейно спадает с увеличением концентрации палладия от $-6 \cdot 10^5$ эрг/см³ до нуля для палладия. В работе [14] была исследована магнитная кристаллографическая анизотропия монокристаллов сплава Co-Pd в концентрационном интервале от 5 до 30 ат. % Co. Показано, что ее первая константа K_1 при температуре жидкого гелия и состава $\text{Co}_{10}\text{Pd}_{90}$ достигает значения $1,7 \cdot 10^6$ эрг/см³ (рис. 3, кривая *a*). Это побудило провести исследования концентрационной зависимости K_1 при температурах жидкого азота (77 K) и 300 K как на монокристаллических пленках, выращенных на подложках MgO , так и на монокристаллических полусферах. Измерения первой константы кристаллографической анизотропии осуществлялись методом вращающих моментов. Напряженность магнитного поля при измерениях равнялась 18 кЭ. На рис. 3 приведены графики концентрационной зависимости K_1 при 300 K (рис. 3, *б*) и 77 K (рис. 3, *в*) для монокристаллических полусфер сплава Co-Pd . Измерения на пленках дают несколько другие значения K_1 , что, очевидно, связано с наличием напряжений и блочности эпитаксиальных монокристаллических пленок. Из приведенных на рис. 3 графиков видно, что при содержании в сплаве кобальта больше 50 ат. % зависимость K_1 от температуры слабая. С уменьшением содержания кобальта ниже 50 ат. % зависимость K_1 от температуры растет примерно до 10 ат. % кобальта. Таким образом, температурная зависимость K_1 сплавов Co-Pd существенным образом отличается от температурной зависимости сплавов «никель–палладий» [15].

Константа перпендикулярной анизотропии пленок ГПУ-фазы. Измерения K_1 свеженапыленных однофазных ГПУ-пленок толщиной 400–500 Å составов $\text{Co}_{1-x}\text{Pd}_x$, где $x = 0,45–0,55$, показывают, что ОЛН отклоняется от плоскости пленки, т. е. кристаллографическая анизотропия ГПУ-фазы больше, чем анизотропия формы пленки, равная $2\pi M_s^2 \sim 6 \cdot 10^6$ эрг/см³. С течением времени (несколько суток) хранения в комнатных условиях ОЛН укладывается в плоскость пленки. Это связано с диффузионными процессами, снятием напряжений и возникновением зародышей ГЦК-фазы.

Магнитная анизотропия двухфазных (ГПУ+ГЦК) пленок. В некоторых двухфазных (ГЦК+ГПУ) пленках наблюдается интересная особенность. В пленках $\text{Co}_{1-x}\text{Pd}_x$, где $x = 0,5–0,55$, помещенных в зазор электромагнита, наблюдается выход ОЛН из плоскости пленок, зависящий от величины приложенного магнитного поля. Для различных образцов поле анизотропии (при котором ОЛН находится в неустойчивом положении) меняется от 2 до 14 кЭ. Природа эффекта состоит в следующем. Образец (пленка) представляет собой гетерофазную систему, оси легкого намагничивания каждой из фаз которой отличаются своей ориентацией (рис. 4).

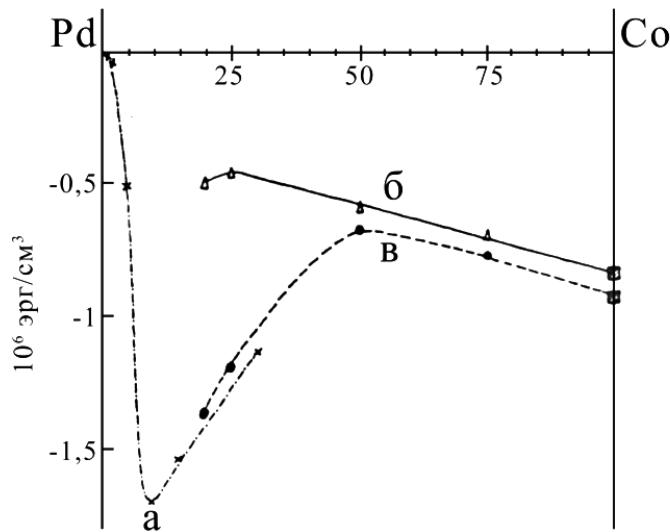


Рис. 3. Магнитная кристаллографическая анизотропия сплавов Co–Pd: по данным работам [16] (a); 300 К (б); 77 К (в)

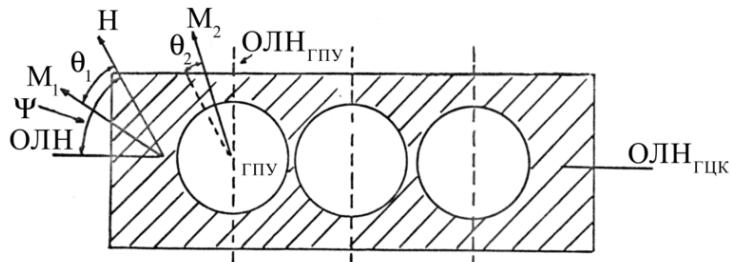


Рис. 4. Схематическое изображение двухфазной пленки (ГПУ+ГЦК):
круги – частицы ГПУ-фазы; M_1 – намагниченность ГЦК;
 M_2 – намагниченность ГПУ-фазы

Пренебрегая эффектами обменного взаимодействия на границах фаз, магнитную часть свободной энергии можно записать в виде суммы $F = f_1 + f_2$, где

$$f_1 = M_1 V_1 H \cos \Theta_1 + K_1 V_1 \sin^2(\Psi - \Theta_1),$$

$$f_2 = M_2 V_2 H \cos \Theta_2 + K_2 V_2 \sin^2(\Psi + \Theta_2),$$

M_1 и M_2 – намагниченности насыщения фаз; K_1 и K_2 – константы магнитной одноосной анизотропии; V_1 и V_2 – их парциальные объемы; Θ_1 и Θ_2 – отклонения векторов M_1 и M_2 от направления внешнего магнитного поля напряженностью H .

Уравнение

$$L_i = \frac{df_i}{d\Theta_i}$$

позволяет записать крутящие моменты фаз L_1 и L_2 :

$$L_1 = K_1 V_1 \sin 2(\Psi - \Theta_1),$$

$$L_2 = K_2 V_2 \sin 2(\Psi + \Theta_2).$$

Для случая $M_i H \gg K_i$ можно ограничиться линейным разложением L_i по Θ_i и, суммируя слагаемые, получить выражение для крутящего момента всей системы:

$$L = (K_1 V_1 - K_2 V_2) \sin 2\Psi - \frac{1}{2} \left(\frac{K_1^2 V_1}{M_1} + \frac{K_2^2 V_2}{M_2} \right) \sin 4\Psi.$$

Как видно из сопоставления теоретической (сплошная линия) и экспериментальной (точки) зависимости $L(H)$ на рис. 5, предложенная модель хорошо описывает результаты измерений.

Поле H' , при котором в случае фиксированного Ψ крутящий момент равен нулю, называется полем магнитной анизотропии и, как можно получить из предыдущего выражения, определяется выражением

$$H' = \frac{\left(\frac{K_1^2 V_1}{M_1} + \frac{K_2^2 V_2}{M_2} \right) \cos 2\Psi}{K_1 V_1 - K_2 V_2}.$$

Коэрцитивная сила пленок Co–Pd. Из литературных данных известно, что аморфные материалы обладают малой величиной H_c , которая в некоторых сплавах достигает сотых долей эрстеда. Кристаллизация повышает H_c . Например, сплав Co–Pd, имеющий в пленочных образцах в аморфном состоянии коэрцитивную силу от 2 до 25 Э, после кристаллизации приобретает H_c 300–600 Э. Измерения коэрцитивной

силы пленок сплава Co–Pd показывают, что H_c нанокристаллических пленок укладываются в интервале от 5 до 20 Э. H_c двухфазных и однофазных пленок больше на порядок и составляют 60–400 Э. Кристаллизация нанокристаллических пленок увеличивает коэрцитивную силу на порядок и больше. Все вышеизложенное говорит о том, что нанокристаллические пленки Co–Pd близки по строению к аморфным образцам, т. е. размеры структурных и химических неоднородностей в них малы и слабо препятствуют процессам перемагничивания.

H_s нанокристаллических пленок. В температурном интервале 20–420 °C были проведены исследования поля технического намагничивания H_s в пленках эквиватомного и близких к нему составов.

Измерения полей насыщения пленок (H_s) производились вдоль нормали к их плоскостям. Величина H_s для этого направления пленки определяется произведением $4\pi J^{\phi\phi} S$. На рис. 6 показаны графики зависимости H_s от температуры для пленок разного состава. График $H_s = f(T)$ для эквиватомного сплава имеет глубокий минимум в районе 340–360 °C. С увеличением в сплаве содержания Co глубина минимума уменьшается. Для сплава Co₆₈Pd₃₂ в этой же области наблюдается небольшой максимум H_s . Заметим, что при кристаллизации аморфных пленок Co₉₀P₁₀ наблюдается максимум H_s , который в работе [17] сопоставляется с максимумом на кривой температурной зависимости постоянной обменного взаимодействия $A(T)$, изменившейся методом СВР.

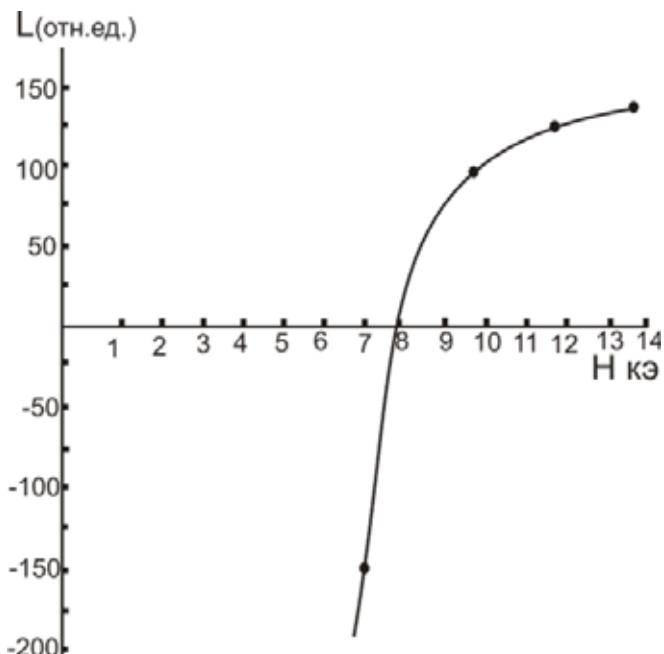


Рис. 5. Экспериментальная зависимость $L(H)$ (точки) для пленки Co₅₀Pd₅₀, 820 Å: расчет (сплошная линия) $\Psi = 47^\circ$, $V_{\text{ГПУ}} = 10\%$, $V_{\text{ГДК}} = 90\%$

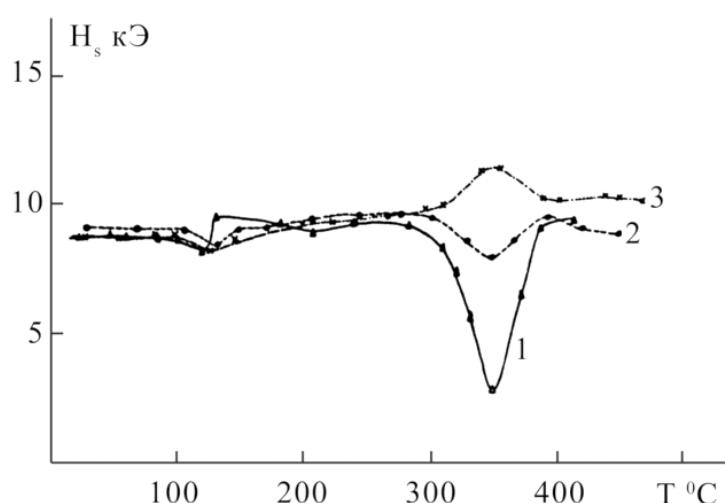


Рис. 6. Зависимость поля насыщения от температуры:
1 — пленка Co₅₀Pd₅₀ толщиной 520 Å; 2 — пленка Co₅₆Pd₄₄ толщина 600 Å; 3 — пленка Co₆₉Pd₃₁ толщина 470 Å

Последний факт дает нам основание предложить следующее объяснение кривым $H_s(T)$ нанокристаллических пленок Co–Pd. Вероятно, во время рекристаллизации пленки сплава Co₅₀Pd₅₀ в ней возникают отрицательные обменные взаимодействия, приводящие к образованию антиферромагнитного упорядочения спинов в некоторых локальных областях пленки. Общий магнитный момент J_s образца падает, поэтому образец насыщается в сравнительно малых внешних полях. При дальнейшем повышении температуры происходит стабилизация кристаллической структуры и замена отрицательного обменного взаимодействия положительным. С этих позиций становится понятным, почему при большом содержании в сплаве Co (68 ат. %) $H_s(T)$ имеет максимум. Очевидно, здесь, как и в случае кристаллизации аморфных пленок Co₉₀Pd₁₀, происходит увеличение постоянной положительного обменного взаимодействия.

Заключение. Метастабильная ГПУ-фаза в пленках Co–Pd имеет намагниченность насыщения выше, чем намагниченность насыщения массивного ГЦК-сплава того же химического состава. Этот факт объясняется тем, что атомы Pd в ГПУ-решетке вносят больший вклад в M_s , чем в ГЦК-решетке.

Рассчитанные на основе экспериментальных данных значения параметров обмена ГПУ- и ГЦК-однофазных пленок, а также нанокристаллических пленок, говорят о том, что нанокристаллическая система представляет собой смесь нанокристаллических зародышей с ГПУ- и ГЦК-симметрией ближайшего окружения.

Установлено, что с увеличением в сплаве содержания Pd свыше 50 ат. % характер температурной зависимости K_1 меняется: она приобретает черты температурной зависимости K_1 никеля. Отсюда делается вывод о том, что богатые Pd сплавы Co–Pd в значительной степени являются зонными ферромагнетиками.

В двухфазных пленках (ГПУ+ГЦК) в полях до 18 кЭ наблюдается зависимость положения ОЛН от величины приложенного поля (при определенных значениях H ОЛН отклоняется от плоскости пленки). Сделанный расчет вращающего момента, действующего на пленку в магнитном поле, согласуется с экспериментом.

Библиографические ссылки

1. Фазовые превращения в кобальт–палладиевых сплавах / Е. М. Артемьев [и др.] // УФЖ. 1984. Т. 29, № 3. С. 447–453.
2. Бозорт Р. Ферромагнетизм. М. : Иностр. лит., 1956. 784 с.
3. Гуденаф Д. Магнетизм и химическая связь. М. : Металлургия, 1968. С. 284.
4. Вонсовский С. В. Магнетизм. М. : Наука, 1971. С. 219–220.
5. Ferromagnetism in Dilute Solutions of Cobalt in Palladium / R. M. Bozorth [et al.] // Phys.Rev. 1961. Vol. 122. P. 1157–1160.
6. Кузменко П. П., Захаренко Н. И. Электронная структура и магнитные свойства сплавов системы Co–Pd // Вестник Киевского университета. 1977. № 18. С. 51–56.

7. Вонсовский С. В. Магнетизм. М. : Наука, 1971. С. 526–527.
8. Matsuo Y. Ordered Alloys in the Co-Pd System // J. Phys. Soc. of Jap. 1972. Vol. 32, No. 4. P. 972–978.
9. Альбен Р., Будник Дж. И., Каргилл Г. С. Магнитные структуры // Металлические стекла. М. : Металлургия, 1984. С. 235–238.
10. Исхаков Р. С., Попов Г. В., Карпенко М. М. Низкотемпературный ход намагниченности в аморфных и микрокристаллических сплавах. ФММ. 1983. Т. 56, В. 1. С. 85–93.
11. Hasegawa R., Ray R. Low temperature magnetization study of crystalline and glassy Fe–B alloys // Phys. Rev. 1979. Vol. 20, No. 1. P. 211–214.
12. Магнитные свойства аморфных и кристаллических сплавов Fe–Zn / Р. С. Исхаков [и др.] // Препринт ИФ СО–329Ф / Институт физики СО АН СССР. Красноярск, 1985. 12 с.
13. Вершинина Л. И. Магнитные свойства и кристаллическое строение пленок сплавов кобальт–палладий : дис. ... канд. физ.-мат. наук, Красноярск, 1979. 144 с.
14. Magnetic Anisotropy of Pd–Rich Pd–Co, -N, and -Fe alloys / H. Kadomatsu [et al.] // J. Phys. Soc. Japan. 1980. Vol. 49, No. 3. P. 1189–1190.
15. Пузей И. М., Мяликгулов Г., Джебаров Е. Температурная и полевая зависимость магнитной анизотропии сплавов никеля с палладием // ЖЭТФ. 1981. Т. 81, В 6(12). С. 2212–2217.
16. Артемьев Е. М., Бакшеев Н. В., Мушаилов Э. С. Ядерный магнитный резонанс в текстурированных пленках кобальта // ФММ. 1982. Т. 53, № 6. С. 1224–1226.
17. Исхаков Р. С., Бахридинов А. Температурная зависимость электрических и гальваниомагнитных свойств аморфных сплавов Co–P // Препринт ИФ СО–126Ф. Ин-т физики СО АН СССР. Красноярск. 1980. 16 с.

References

1. Artem'ev E. M., Vershinina L. I., Matysin Yu. V. et al. [Phase transitions in Cobalt–Palladium alloys]. *Ukrainskiy fizicheskiy zhurnal*. 1984, Vol. 29, No. 3, P. 447–453 (In Russ.).
2. Bozorth R. M. *Ferromagnetism* [Ferromagnetism]. Moscow, Inostrannaya Literatura Publ., 1956, 784 p.
3. Gudena D. *Magnitizm i khimicheskaya svyaz'* [Magnetism and chemical bond]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1968, P. 284.
4. Vonsovskiy S. V. *Magnitizm* [Magnetism]. Moscow, Nauka Publ., 1971, P. 219–220.
5. Bozorth R. M., Wolff P. A., Davis D. D. et al. Ferromagnetism in Dilute Solutions of Cobalt in Palladium. *Phys.Rev.* 1961, Vol. 122, P. 1157–1160.
6. Kuzmenko P. P., Zakharenko N. I. [Electronic structure and magnetic properties of CoPd system alloys]. *Vestnik Kievskogo Universiteta*. 1977, No. 18, P. 51–56 (In Russ.).
7. Vonsovskiy S. V. *Magnitizm* [Magnetism]. Moscow, Nauka Publ., 1971, P. 526–527.

8. Matsuo Y. Ordered Alloys in the Co-Pd System. *J. Phys. Soc. of Jap.* 1972, Vol. 32, No. 4, P. 972–978.
9. Al'ben R., Budnik Dzh. I., Kargill G. S. [Magnetic structures]. *Sb. Metallicheskie Stekla*, Moscow, Metallurgiya Publ., 1984, P. 235–238.
10. Iskhakov R. S., Popov G. V., Karpenko M. M. [Low temperature behavior of the magnetisation in amorphous and microcrystalline alloys]. *Fizika Metallov i Metallovedenie*. 1983, Vol. 56, No. 1, P. 85–93 (In Russ.).
11. Hasegawa R., Ray R. Low temperature magnetization study of crystalline and glassy Fe-B alloys. *Phys. Rev. B*, 1979, Vol. 20, No. 1, P. 211–214.
12. Iskhakov R. S., Brushtunov M. M., Turpanov I. A. et al. [Magnetic properties of amorphous and crystalline Fe-Zn alloys]. Krasnoyarsk, Preprint of Institute of Physics S0–329F, Institut fiziki SO AN USSR, 1985, 12 p.
13. Vershinina L. I. *Magnitnye svoystva i kristallicheskoe stroenie plenok splavov kobal't-palladiy: dis. kand. fiz.-mat. nauk.* [Magnetic properties and crystalline structure of Cobalt-Palladium alloy films. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Krasnoyarsk, 1979, 144 p.
14. Kadomarsu H., Kamimori T., Tokunaga T. et al. Magnetic Anisotropy of Pd-Rich Pd-Co, -N, and -Fe alloys. *J. Phys. Soc. Japan*, 1980, Vol. 49, No. 3, P. 1189–1190.
15. Puzey I. M., Myalikgulyev G., Dzhepbarov E. [Temperature and field dependence of magnetic anisotropy of Nickel and Palladium alloys]. *Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoy Fiziki*. 1981, Vol. 81, No. 6(12), P. 2212–2217 (In Russ.).
16. Artem'ev E. M., Baksheev N. V., Mushailov E. S. [Nuclear magnetic resonance in textured Cobalt films]. *Fizika Metallov i Metallovedenie*. 1982, Vol. 53, No. 6, P. 1224–1226 (In Russ.).
17. Iskhakov R. S., Bakhridinov A. [Temperature dependence of electric and galvanomagnetic properties of amorphous CoP alloys]. Krasnoyarsk, Preprint of Institute of Physics S0–126F, Institut fiziki SO AN USSR, 1985, 16 p.

© Артемьев Е. М., Якимов Л. Е., 2016

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ И НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ РЕЗИН ДЛЯ ШКИВОВ ГРУЗОПОДЪЕМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А. А. Ашайчик, В. Л. Полонский

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Российская Федерация, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
E-mail: aseichik52@mail.ru

В современном грузоподъемном и транспортном оборудовании на предприятиях аэрокосмической промышленности широко применяются полимерные тросы с грузоподъемностью до 60 т. Для создания требуемой тяговой способности поверхность стального шкива при контакте с полимерным тросом имеет резиновое покрытие. При этом к свойствам резин для покрытий предъявляется одновременно целый ряд требований: максимальный коэффициент трения (тяговая способность), высокая износостойкость (долговечность по износу), высокая нагрузочная способность (отсутствие катастрофического износа резины) и долговечность поверхностного слоя резины (отсутствие усталостных трещин за весь срок службы). Рассматривается контакт с резиновым покрытием троса из высокомодульного полизтилена (НМРЕ).

Экспериментально решены вопросы выбора составов резин для создания резиновых покрытий на рабочей поверхности тяжелонагруженных шкивов грузоподъемного и транспортного оборудования аэрокосмической промышленности при контакте с полимерным тросом. Составы резин оценивались по их трибологическим свойствам и нагрузочной способности. Описана конструкция стенда возвратно-поступательного движения и методика исследований коэффициента трения и износа резин. Конструкция стенда включает кривошипно-шатунную группу, систему нагружения образцов и систему измерения коэффициента трения. При испытаниях на стенде возможно изменение скорости возвратно-поступательного движения образцов от 0,02 до 0,5 м/с. В зависимости от веса грузов и размеров образцов давление на поверхности трения образцов может регулироваться в диапазоне от 0,2 до 20 МПа. Измерение коэффициента трения проводилось посредством тензобалки с тензодатчиками. Значение сигнала с выхода тензобалки измерялось цифровым запоминающим осциллографом PCS-500A, работающим в комплекте с компьютером. Износ резины определялся методом искусственных баз.

Получены экспериментальные зависимости коэффициента трения и интенсивности изнашивания от давления на контактирующих поверхностях резины и троса. Осмотр поверхностей резины после изнашивания и наблюдение за ходом экспериментов показали, что в данном случае происходит усталостное изнашивание резины, что соответствовало началу отделения макрочастич резины. Установлено, что при определенном давлении установившийся режим изнашивания (линейная зависимость) переходит в катастрофический. Определены величины критических давлений для всех исследованных резин.

Использование метода конечных элементов позволило создать конечно-элементную модель контакта троса с поверхностью резинового слоя на шкиве. На основании анализа этой модели изучены долговечность слоев различных резин с точки зрения образования усталостных трещин и их долговечность по изнашиванию.

Ключевые слова: резина, трос, шкив, интенсивность изнашивания, коэффициент трения, предельное контактное давление, метод конечных элементов.

Vestnik SibGAU
Vol. 17, No. 1, P. 186–193

RESEARCH OF WEAR RESISTANCE AND LOADING ABILITY OF RUBBERS FOR SHEAVES WITH THE RUBBER COVERING

A. A. Asheichik, V. L. Polonsky

Peter the Great St.-Petersburg polytechnical university
29, Polytechnicheskaya Str., St.-Petersburg, 195251, Russian Federation
E-mail: aseichik52@mail.ru

The polymeric cables with load-carrying capacity to 60 tons are widely applied in the modern lifting and transport equipment at the enterprises of the aerospace industry. The surface of a steel pulley at contact to a polymeric cable has a rubber covering for creation of demanded traction ability. Thus we have next requirements to properties of rubbers

for coverings simultaneously: the maximum value of friction coefficient (tractive ability), high wear resistance (wear life), high loading ability (absence of catastrophic wear of rubber) and lifetime of a surface layer of rubber (absence of fatigue cracks for all service life). The contact of rubber and cable made from high modulus polyethylene (HMPE) was considered in the given article.

Questions of a choice of structures of rubber for creation of rubber coverings on working surface heavy-loaded pulleys of the lifting and transport equipment of the aerospace industry at contact to a polymeric cable are experimentally solved. Structures of rubber were estimated on base of them frictional properties and loading ability. The design of the stand of back-and-forth motion and technique of researches of a friction coefficient and wear of rubbers is described. The stand design includes crank-and-rod mechanism, loading system of the samples and system of measurement of friction coefficient. At tests at the stand probably change of speed of back-and-forth motion of samples from 0.02 to 0.5 m/s. Pressure upon surfaces of a friction of samples can be regulated in a range from 0.2 to 20 MPa. It depends on weight of cargoes and the sizes of samples. Measurement of friction coefficient was spent by means of strain-gauge unit. Value of a signal from an exit strain-gauge unit was measured by digital remembering oscillograph PCS-500A working complete with the computer. The wear of rubber was defined by the method of artificial bases.

Experimental dependences of a friction coefficient and intensity of wear process at pressure upon contacting surfaces of rubber and a cable are received. Survey of surfaces of rubber after wear process and supervision over a course of experiments have shown that in this case there is a fatigue wear process of rubber that corresponded to the beginning of separation of rubber macro particles. It is established that at certain pressure the established mode of wear process (linear dependence) passes in the catastrophic. Sizes of critical pressure for all investigated rubbers are defined.

Use of a finite elements analysis has allowed creating certainly-element model of contact of a cable with a surface of a rubber layer on a pulley. On the basis of the analysis of this model are studied durability of layers of various rubbers from the point of view of formation of fatigue cracks and their durability on wear process.

Keywords: rubber, rope, sheave, wear intensity, coefficient of friction, limit contact pressure, finite element analysis.

Введение. Полимеры занимают одно из ведущих мест среди конструкционных материалов в машиностроении. Целесообразность их применения определяется улучшением массогабаритных характеристик, повышением долговечности, надежности и др. Область применения полимеров в наземных конструкциях аэрокосмической отрасли довольно широка: детали механических передач (зубчатые и червячные колеса, шкивы, подшипники скольжения и качения), направляющие, уплотнения, износостойкие и защитные покрытия и т. п. В частности, для повышения безопасности и надежности транспортировочных операций объектов аэрокосмического назначения применяются ее полимерные тросы и шкивы с резиновым покрытием с целью увеличения коэффициента трения и снижения динамических нагрузок. В данном случае с резиной контактировал трос из высокомодульного полиэтилена (HMPE), состоящий из 12×12 прядей. Диаметр шкива был равен 1,9 м.

Целью данной работы являлся выбор из 5 составов резин лучшего состава по критериям наибольшего коэффициента трения (тяговая способность), высокой износостойкости (долговечность по износу), нагрузочной способности (отсутствие катастрофического износа резины) и долговечности поверхностного слоя резины (отсутствие усталостных трещин за весь срок службы). Исследовались 4 резины российских производителей марок РМ, Л2-18, Л2-26, 1068 и одна норвежская резина марки 73979 [1].

Стенд для исследований и методика испытаний. Исследование износа и коэффициента трения резин проводилось на стенде возвратно-поступательного трения [1–4]. Схема стенда и общий вид узла трения приведены на рис. 1 и 2.

Конструкция стенда включает следующие основные узлы: кривошипно-шатунную группу и систему нагружения образцов. Привод стенда состоит из электрического двигателя 1, червячного редуктора 3 и двух упругих втулочно-палцевых муфт 2, 4. Кривошипно-ползунная группа включает эксцентрик 5 с подшипником качения, раму 6, движущуюся в направляющих 7, и ползун 9 на направляющих качения. На ползуне 9 неподвижно установлен держатель 10 для нижних образцов. Система нагружения состоит из рычага 14 с подвеской для грузов 15, клиновидного плунжера 13 и оправки 12 с установленным в ней держателем 11 для верхнего образца. Для испытаний в жидкой среде устанавливается ванна 16.

В процессе испытаний возможна замена эксцентрика 5, размер которого ограничен только внутренним диаметром подшипника. Это позволяет изменять скорость возвратно-поступательного движения образцов от 0,02 до 0,5 м/с. В зависимости от веса грузов и размеров образцов изменяется давление на поверхности трения. При максимальном весе груза давление может достигать 20 МПа. Измерение коэффициента трения проводилось посредством тензобалки 8 с тензодатчиками.

Пластинки из резины закреплялись в верхнем держателе 11. В держатель 10 помещался нижний образец. Он представлял собой пластину из стали с натянутыми на ней волокнами троса. Волокна смачивались водой с морской солью. Скорость скольжения – 0,08 м/с. Исследовался диапазон давлений от 1,5 до 10 МПа. Перед испытаниями каждого вида резины и при каждом удельном давлении нижний образец с волокнами троса заменялся на новый. Каждое испытание повторялось три раза.

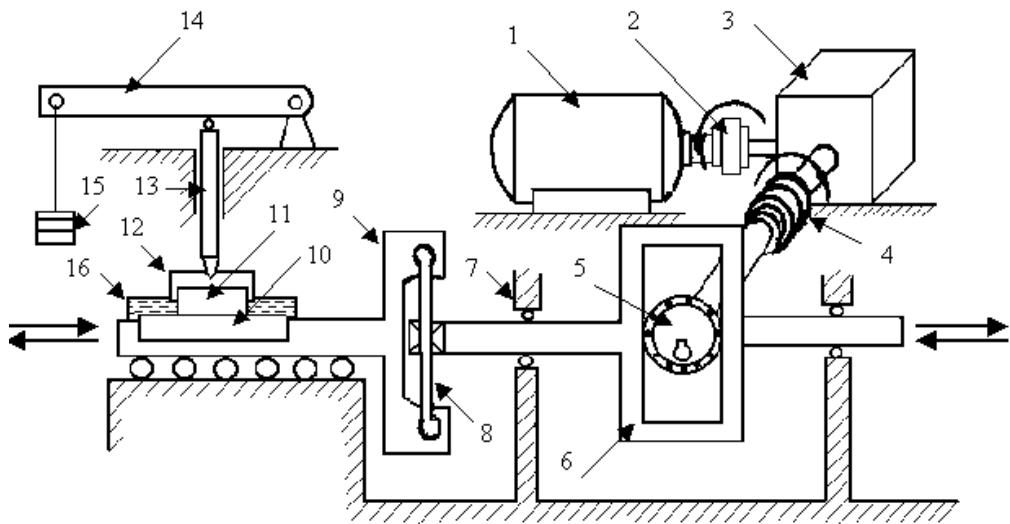


Рис. 1. Схема стенда для испытаний на трение и изнашивание



Рис. 2. Общий вид узла трения

В результате испытаний определялась интенсивность изнашивания [5–7]. Величина интенсивности изнашивания после испытаний на износ может быть рассчитана по формуле

$$I = \Delta h / L_s, \quad (1)$$

где Δh – износ резины, мм; L_s – путь трения, мм.

Путь трения рассчитывался по формуле

$$L_s = 10^3 \cdot V_s \cdot t_s, \quad (2)$$

где V_s – скорость скольжения на стенде, $V_s = 0,08$ м/с; t_s – продолжительность испытаний, с.

Износ резины определялся методом искусственных баз. При этом на поверхность резины на специальном устройстве нарезалась лунка радиусом R и шириной 0,1 мм. Длина лунки до испытаний на трение и после них измерялась на координатном столике под микроскопом с 16-кратным увеличением с точностью 0,01 мм.

При этом методе величина износа резины в результате трения может быть рассчитана по формуле

$$\Delta h = (l_1^2 - l_2^2) / 8R, \quad (3)$$

где l_1 и l_2 – длина лунки до и после трения, мм; R – радиус резца, которым сделана лунка, мм.

Результаты экспериментальных исследований. Точность определения износа при этом методе составляет 0,005 мм. Результаты испытаний в виде зависимости средних значений интенсивности изнашивания от удельного давления на поверхности трения резины по результатам трех испытаний приведены на рис. 3.

Для проведения дальнейших расчетов на стенде были получены также коэффициенты трения движения для всех резин (рис. 4). Осмотр поверхностей резины после изнашивания и наблюдение за ходом экспериментов показали, что в данном случае происходит усталостное изнашивание резины. При усталостном изнашивании происходит постепенное отделение многократного деформирования микрообъемов материала. Из теории трения и изнашивания известно, что интенсивность изнашивания при усталостном характере износа зависит от многих факторов [6]:

$$I = K_1 \cdot \alpha \cdot p^{(0,4t+1)} \cdot E^{(0,8t-1)} \cdot \Delta^{0,4t} \cdot (K_2 \cdot \mu / \sigma_0)^t, \quad (4)$$

где K_1 – коэффициент, зависящий от геометрической конфигурации микронеровностей трущихся поверхностей; α – коэффициент перекрытия, определяемый как отношение поверхности трения резины к поверхности трения троса, $\alpha = 0,144$; p – удельное давление на поверхности трения; E – модуль упругости;

Δ – комплексная характеристика шероховатости трущихся поверхностей; K_2 – коэффициент, характеризующий напряженное состояние на контакте, для высокоэластичных материалов, $K_2 = 2,5\text{--}3,5$; μ – коэффициент трения; σ_0 , t – значение параметра фрикционно-контактной усталости при трении в эмпирической кривой усталости Веллера:

$$N = (\sigma_0 / \sigma)^t, \quad (5)$$

где σ , σ_0 – действующее и разрушающее напряжение при однократном растяжении.

Непосредственные расчеты по формуле (4) затруднены, так как требуют целого ряда сложных физических экспериментов по определению K_1 , K_2 , t , σ_0 . Их величины связаны с адгезионными и другими физико-механическими свойствами материала [8–13]. Однако формула (4) дает возможность проанализировать влияние таких факторов, как удельное давление, модуль упругости резины, коэффициент трения и прочность резины на интенсивность изнашивания.

Анализ формулы (4) показывает, что при усталостном характере износа следует ожидать следующего влияния управляемых факторов:

1. При увеличении коэффициента трения интенсивность изнашивания резко увеличивается:

$$I \sim (\mu)^t. \quad (6)$$

Это связано с увеличением температуры в зоне трения. В данном случае показатель фрикционной усталости может быть определен из экспериментов

для одной резины при различных удельных давлениях. Он составляет для исследованных резин $t = 7\text{--}8$.

2. При увеличении модуля упругости резины интенсивность изнашивания увеличивается:

$$I \sim E^{(0,8t-1)}. \quad (7)$$

3. Увеличение удельного давления на поверхности резины приводит к увеличению ее интенсивности изнашивания:

$$I \sim p^{(0,4t+1)}. \quad (8)$$

4. Увеличение прочностных характеристик резины приводит к снижению интенсивности изнашивания:

$$I \sim (1/\sigma_0)^t. \quad (9)$$

Кроме перечисленных факторов следует также учитывать, что при определенных удельных давлениях установившийся процесс изнашивания может резко интенсифицироваться и перейти в катастрофический процесс изнашивания. При катастрофическом процессе изнашивания микроотделение частиц заменяется образованием макродефектов и отделением макрочастиц. Это связано с резким увеличением температуры в зоне трения при определенных давлениях. Удельное давление, при котором это происходит, называют критическим. Эксплуатация узла трения при давлениях выше критического не рекомендуется.

Коэффициенты трения движения, интенсивностей изнашивания и предельных контактных давлений представлены в таблице.

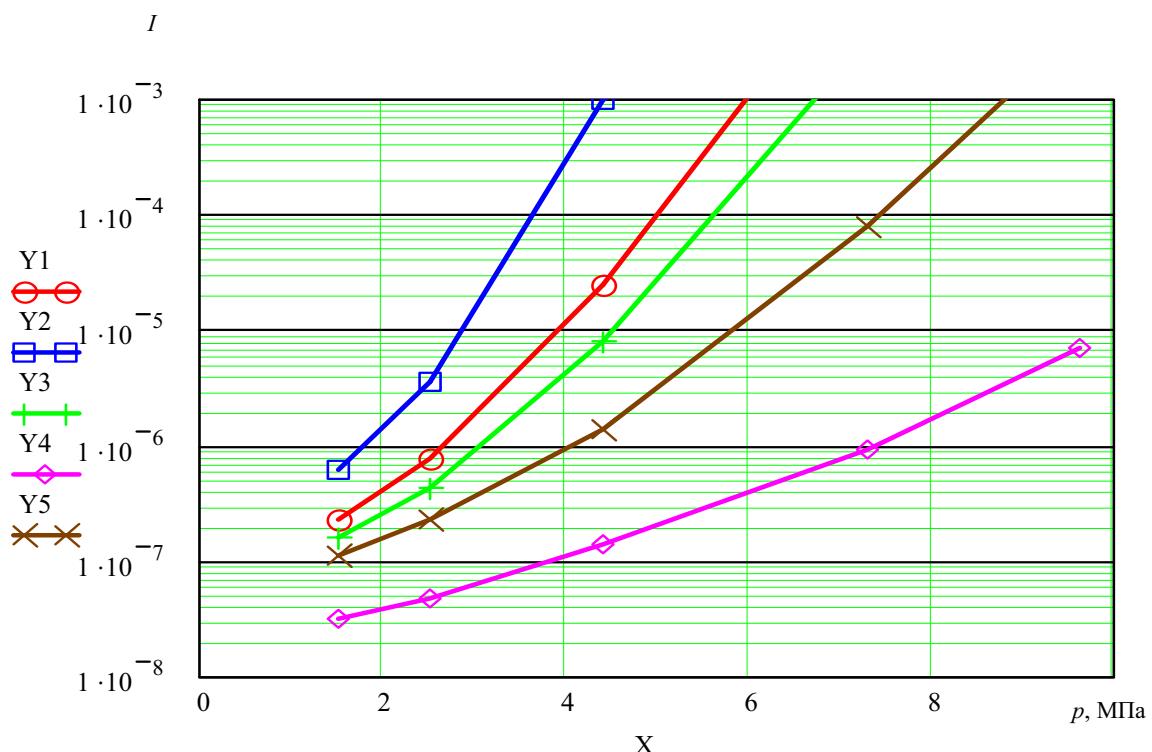


Рис. 3. Зависимости интенсивности изнашивания резин от давления:
Y1 – норвежская 73975; Y2 – резина PM; Y3 – резина Л2-18; Y4 – резина Л2-26; Y5 – резина 1068

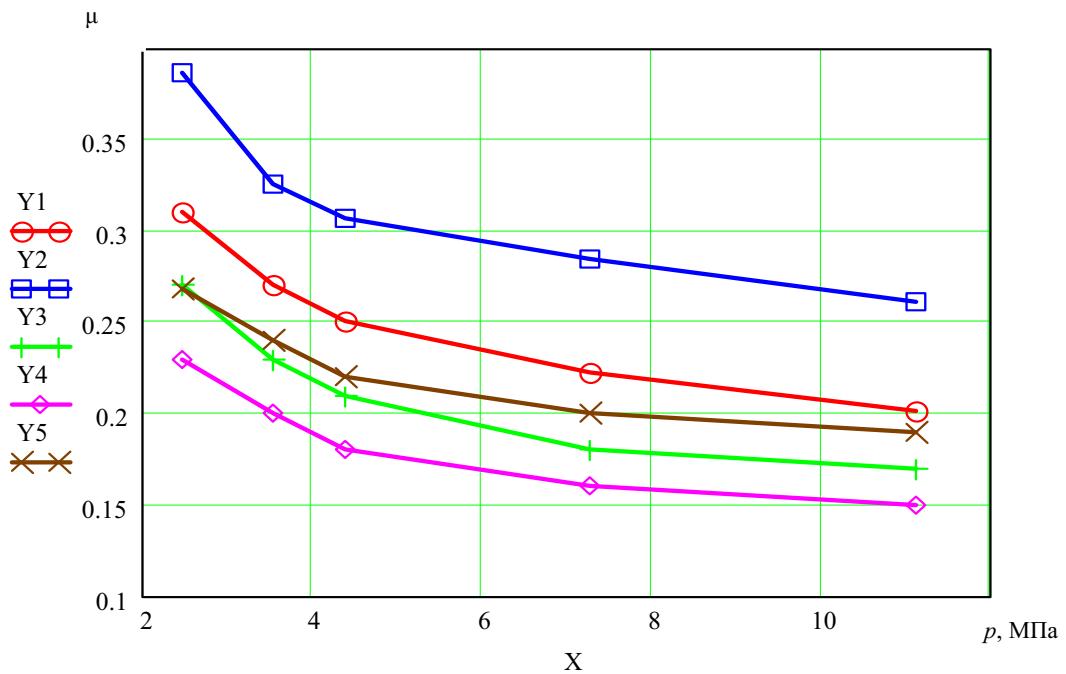


Рис. 4. Зависимости коэффициентов трения движения от давления:
Y1 – норвежская 73975; Y2 – резина PM; Y3 – резина Л2-18; Y4 – резина
Л2-26; Y5 – резина 1068

Результаты исследований коэффициентов трения и интенсивности изнашивания резин

Резина	Коэффициент трения, μ		Интенсивность изнашивания, I		Предельное давление $p_{\text{пред}}$, МПа
	$p = 2,5 \text{ МПа}$	$p = 4,4 \text{ МПа}$	$p = 2,5 \text{ МПа}$	$p = 4,4 \text{ МПа}$	
73975	0,31	0,25	$7,8 \cdot 10^{-7}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	3,9
PM	0,39	0,31	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$9,9 \cdot 10^{-4}$	2,8
Л2-18	0,28	0,22	$4,3 \cdot 10^{-7}$	$7,8 \cdot 10^{-4}$	4,5
Л2-26	0,24	0,19	$0,48 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$	10,2
1068	0,27	0,23	$2,3 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	5,9

Анализ результатов, представленных на рис. 3 и в таблице, показывает, что полученные зависимости интенсивности изнашивания от удельного давления в целом соответствуют вышеприведенным закономерностям:

- 1) резины, имеющие высокий коэффициент трения, изнашивались быстрее;
- 2) увеличение удельного давления приводит к увеличению интенсивности изнашивания;
- 3) при определенном давлении установившийся режим изнашивания (линейная зависимость) переходит в катастрофический.

Величина критического давления для исследованных резин приведена в таблице, где за критические давления условно были приняты давления, при которых интенсивность изнашивания достигала 10^{-5} . По нашим наблюдениям это соответствовало началу отделения макрочастиц резины. Следует отметить, что испытания на износ в данном случае проводились в более сложных условиях, чем резина работает на реальном объекте.

Это связано со следующими особенностями стенда:

1. Исследовалось возвратно-поступательное движение. Это более тяжелый температурный режим для

резины, чем при поступательном движении. На реальном объекте наблюдается поступательное движение.

2. Продукты износа не удаляются из зоны трения. На реальном объекте они удаляются. Присутствие продуктов износа ускоряет процесс изнашивания и наступление катастрофического режима изнашивания.

3. Скорость скольжения составляла 0,08 м/с, что примерно на порядок выше, чем на реальном объекте. Это тоже ускоряло процесс изнашивания и наступление катастрофического режима изнашивания из-за более жесткого температурного режима в зоне трения.

4. Так как модули упругости и показатели прочности исследованных резин были примерно одинаковы (кроме резины заказчика), то их влияние на интенсивность изнашивания не выявлено. Хотя резина заказчика и имела более высокие прочностные характеристики, однако из-за высокого коэффициента трения она имела большую интенсивность изнашивания и низкое предельное давление.

5. Критические давления для резин с высокими коэффициентами трения очень низкие. Наиболее высокой износстойкостью и высоким предельным давлением обладали резины с низким коэффициентом трения Л2-26 и 1068.

Все указанные особенности идут в коэффициент запаса по износостойкости при численном использовании результатов испытаний, представленных на рис. 3. Толщина слоя резины может быть определена по данным на рис. 3 следующим образом:

$$h_{\min} = 10^3 \cdot I_p \cdot L_p, \quad (10)$$

где h_{\min} – минимальная толщина слоя резины, мм; I_p – интенсивность изнашивания при заданном давлении; L_p – путь трения (ресурс) для данного режима работы, м.

Так, например, для давления $p = 2,5$ МПа для резины 73975 минимальная толщина слоя резины при пути трения 12500 м составит

$$h_{\min} = 10^3 \cdot 7,8 \cdot 10^{-7} \cdot 1250 = 9,75 \text{ мм}.$$

При этом коэффициент запаса, учитывающий наличие возвратно-поступательного движения, продуктов износа в зоне трения и увеличение скорости скольжения, на стенде составит 1,3–1,5.

Использование метода конечных элементов.

Использование метода конечных элементов (МКЭ) [14–16] позволило создать конечно-элементную модель контакта троса с поверхностью резинового слоя на шкиве. На основании анализа этой модели изучены

долговечность слоев различных резин с точки зрения образования усталостных трещин и их долговечность по изнашиванию. На рис. 5 в качестве примера приведено поле температур саморазогрева резины Л2-26 при толщине ее слоя 12 мм, а на рис. 6 – поле долговечности этой резины.

Созданные конечно-элементные модели с использованием программы STAR контакт троса с резиной при заходе троса на шкив на внешнем (рис. 7) и внутреннем краях шкива и сходе с него позволяют при наличии экспериментальных данных по коэффициентам трения (см. рис. 4) и интенсивностям изнашивания (см. рис. 3) оценивать износ резины через сдвиговые деформации слоев и рассчитать долговечность резинового покрытия шкива для всех резин с точки зрения износостойкости. Установлено также, что скольжение троса относительно всех резин нет. По всему шкиву наблюдается трение покоя. Однако в момент входа троса в контакт со шкивом и выхода из него будет относительное смещение (частичное проскальзывание резины и троса). Будет также скольжение в поперечном направлении. Все это и вызовет износ резины.

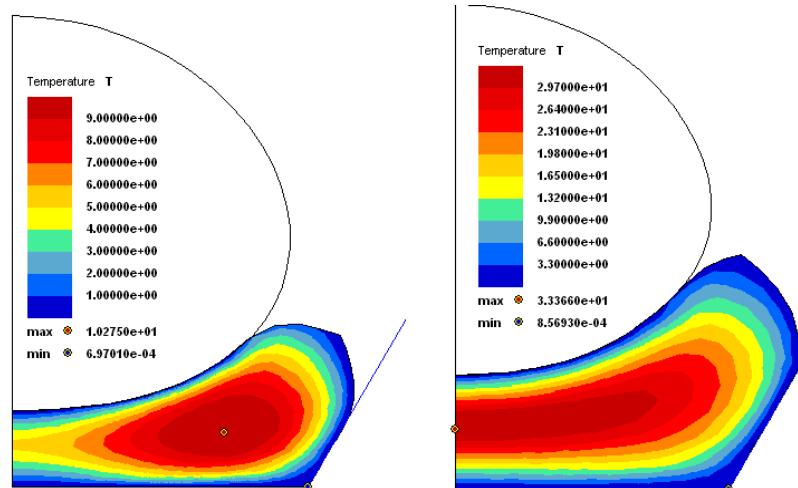


Рис. 5. Поля температур саморазогрева при толщине слоя резины Л2-26 12 и 26 мм

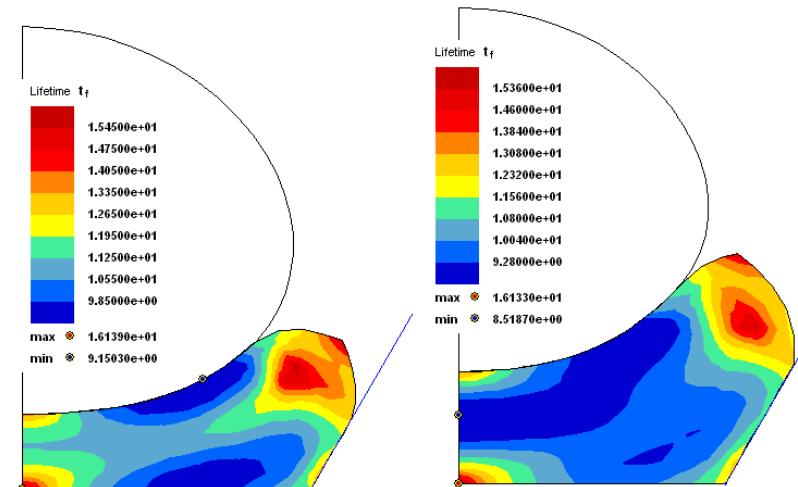


Рис. 6. Поля долговечности при толщине слоя резины Л2-26 12 и 26 мм

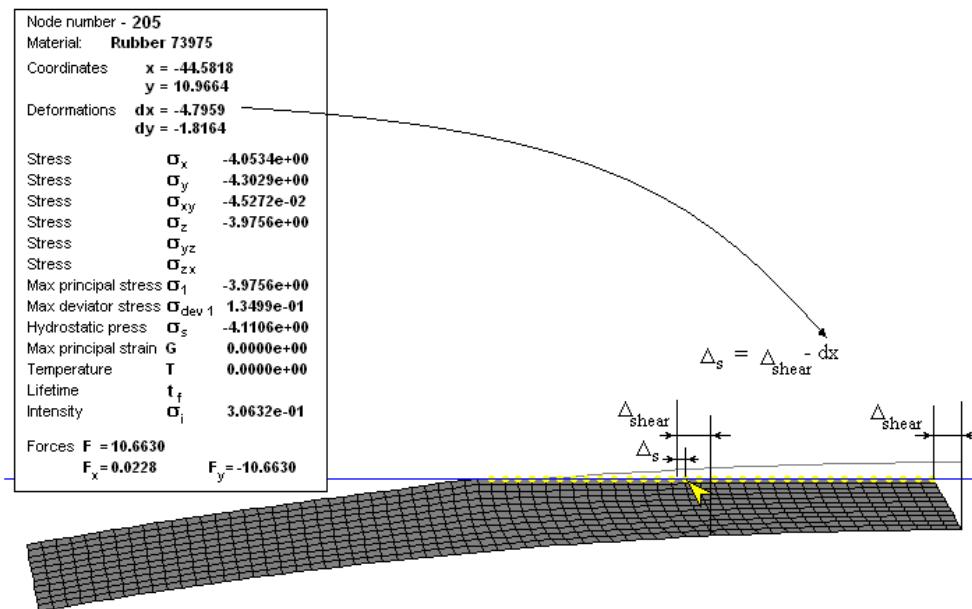


Рис. 7. МКЭ-модель изнашивания на внешнем краю шкива

Заключение. Таким образом, экспериментально-теоретическое исследование износостойкости и нагрузочной способности различных резиновых покрытий на шкивах позволило рекомендовать для наиболее нагруженных шкивов грузоподъемного и транспортного оборудования аэрокосмической промышленности при давлении на поверхности резины 4–9 МПа резину Л2-26, хотя она и имеет не самый высокий коэффициент трения (ниже 0,3). Для менее нагруженных шкивов при давлении на поверхности резины 2,5–4 МПа можно использовать резину 1068, которая обеспечит работоспособность с заданным ресурсом по пути трения и при этом даст большую тяговую способность, чем резина Л2-26, благодаря более высокому коэффициенту трения. Резину 73975 можно использовать только для малонагруженных шкивов при давлениях менее 2,5 МПа.

Для обеспечения безопасности в начале эксплуатации новых шкивов с резиной следует или эксплуатировать узел при неполном нагружении, или провести специальную приработку перед началом эксплуатации. При этом напряжения по ширине площадки контакта выравниваются и достигнут примерно средних значений.

Библиографические ссылки

1. Ашайчик А. А., Полонский В. Л. Экспериментальное исследование эластомеров и полимеров для нефтяной промышленности. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2015. 236 с.
2. Ашайчик А. А., Чулкин С. Г. Экспериментальная механика : учеб. пособие. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 107 с.
3. Ашайчик А. А., Полонский В. Л., Чулкин С. Г. Вычислительная механика. Расчет деталей машин методом конечных элементов : учеб. пособие. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 301 с.
4. Ашайчик А. А. Детали машин и основы конструирования. Справочные материалы : учеб. пособие. СПб. : изд-во СПбГПУ, 2014. 111 с.
5. Чулкин С. Г., Ашайчик А. А., Селин С. Н. Использование композитных материалов в узлах трения нефтяного оборудования // Вопросы машиностроения. 2012. № 4. С. 240–244.
6. Ашайчик А. А. Основы трибоники. СПб. : Изд-во СПбГПУ, 1995. 116 с.
7. Чулкин С. Г., Ашайчик А. А., Селин С. Н. Применение подшипников из углепластиков в судостроении, турбостроении, горнодобывающей технике // Современное машиностроение. Наука и образование : материалы Междунар. науч.-практ. конф. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та. 2012. С. 805–816.
8. Лысенков М. П., Чулкин С. Г. Работоспособность пар трения «эластомер–эластомер» // Вопросы материаловедения. 2006. № 2. С. 139–142.
9. Копченков В. Г. Виды и механизмы изнашивания резин в условиях контактно-динамического нагружения // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2010. № 6. С. 24–28.
10. Энергетический критерий оценки износостойкости и механизмы изнашивания резин / Н. С. Пенкин [и др.] // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2013. № 1. С. 10–19.
11. Ашайчик А. А., Полонский В. Л. Прогнозирование изменения физико-механических свойств эластомеров при термическом старении // Современное машиностроение. Наука и образование : материалы Междунар. науч.-практ. конф. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та. 2013. С. 265–272.
12. Ашайчик А. А., Полонский В. Л. Определение энергии активации эластомеров экспериментально-теоретическим методом // Современное машиностроение. Наука и образование : материалы Междунар. науч.-практ. конф. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та. 2014. С. 283–291.

13. Бартенев Г. М. Структура и релаксационные свойства эластомеров. М. : Химия, 1979. 287 с.
14. Образцов И. Ф., Савельев Л. М. Хазанов Х. С. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов. М. : Высш. шк., 1985. 392 с.
15. Лазарев С. О., Полонский В. Л., Ашайчик А. А. Вычислительная механика : учеб. пособие. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та. 2007. Ч 2. 122 с.
16. Design simulation of twisted cord-rubber structure using proe/ANSYS / R. M. Pidaparti [et al.] // Composite Structures. 2001. Vol. 52. No 3–4. Pp. 287–294.

References

1. Asheichik A. A., Polonskii V. L. *Eksperimental'noe issledovanie elastomerov i polimerov dlya neftyanoi promyshlennosti*. [Experimental research of elastomers and polymers for petroleum industry]. St.-Petersburg, St.-Petersburg polytechnical university Publ., 2015, 236 p.
2. Asheichik A. A., Chulkin S. G. *Eksperimental'naya mekhanika*. [The experimental mechanics]. St.-Petersburg, St.-Petersburg polytechnical university Publ., 2008, 107 p.
3. Asheichik A. A., Polonskii V. L., Chulkin S. G. *Vychislitel'naya mekhanika. Raschet detalei mashin metodom konechnykh elementov* [The computing mechanics. Calculation of machine elements by a finite elements method]. St.-Petersburg. St.-Petersburg polytechnical university Publ., 2011. 301 p.
4. Asheichik A. A. *Detali mashin i osnovy konstruirovaniya. Spravochnye materialy* [The machine elements and base of design]. St.Petersburg, St.-Petersburg polytechnical university Publ., 2014, 111 p.
5. Chulkin S. G., Asheichik A. A., Selin S. N. [Use of composite materials in subassembly of a friction of the oil equipment]. *Voprosy mashinostroeniya*, 2012, No. 4, P. 240–244 (In Russ).
6. Asheichik A. A. *Osnovy triboniki*. [Base of tribonics]. St.-Petersburg, St.-Petersburg polytechnical university Publ., 1995, 116 p.
7. Chulkin S. G., Asheichik A. A., Selin S. N. [Application of carbon fibre bearings in shipbuilding, turbine building, the mining equipment]. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: materialy mezhdunar. nauchn.-prakt. konferentsii*. [Modern mechanical engineering. Science and education: proceedings of the international scientifically-practical conference]. St.-Petersburg. St.-Petersburg polytechnical university Publ., 2012, P. 805–816 (In Russ).
8. Lysenkov M. P., Chulkin S. G. [Efficiency of elastomer – elastomer friction pairs]. *Voprosy materialovedeniya*, 2006, No. 2, P. 139–142 (In Russ).
9. Kopchenkov V. G. [Types and mechanisms of wear process of rubbers in conditions of contact-dynamic loading]. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmakh*, 2010, No. 6, P. 24–28 (In Russ).
10. Penkin N. S., Kopchenkov V. G., Serbin V. M., Penkin A. N. [The energy criterion of estimation of wear resistance and mechanisms of wear rubber]. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmakh*, 2013, No. 1, P. 10–19 (In Russ).
11. Asheichik A. A., Polonskii V. L. [The prediction of change of physic-mechanical properties of elastomers at thermal ageing]. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: materialy mezhdunar. nauchn.-prakt. konferentsii*. [Modern mechanical engineering. Science and education: proceedings of the international scientifically-practical conference]. St.-Petersburg, St.-Petersburg polytechnical university Publ., 2013, P. 265–272 (In Russ).
12. Asheichik A. A., Polonskii V. L. [The definition of energy of activation of elastomers an experimentally-theoretical method]. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: materialy mezhdunar. nauchn.-prakt. konferentsii*. [Modern mechanical engineering. Science and education: proceedings of the international scientifically-practical conference]. St.-Petersburg, St.-Petersburg polytechnical university Publ., 2014, P. 283–291 (In Russ).
13. Bartenev G. M. Struktura i relaksatsionnye svoistva elastomerov. [Structure and relax properties of elastomers]. Moscow, Khimiya Publ., 1979, 287 p. (In Russ).
14. Obraztsov I. F., Savel'ev L. M. Khazanov Kh. S. *Metod konechnykh elementov v zadachakh stroitel'noy mekhaniki letatel'nykh apparatov*. [The finite element analysis in problems of building mechanics of flying machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985, 392 p. (In Russ).
15. Lazarev S. O., Polonskii V. L., Asheichik A. A. *Vychislitel'naya mekhanika*. [The computing mechanics]. St.-Petersburg. St.-Petersburg polytechnical university Publ., 2007, 122 p.
16. Pidaparti R. M., Jayanti S., Henkle J., El-Mounayri H. Design simulation of twisted cord-rubber structure using proe/ANSYS. *Composite Structures*, 2001, Vol. 52, No. 3–4, P. 287–294.

**ПОЛУЧЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА
ЖИДКОЙ ШТАМПОВКОЙ ИЗ СПЛАВА АК7**

Г. Г. Крушенко

Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50
E-mail: genry@icm.krasn.ru

Описана практическая новая технология производства деталей в приложении к деталям летательной аппаратуры, изготавляемых из алюминиевых сплавов, сочетающая как подготовку расплава к литью, так и способ изготовления собственно детали. Исследование проведено на известном литейном алюминиево-кремниевом сплаве АК7ч, широко применяемемся в аэрокосмической отрасли для изготовления деталей силовых агрегатов, работающих в сложнонагруженных условиях. Подготовка расплава к литью, кроме общепринятых приемов, заключалась во введении в жидкую металлическую массу перед заливкой нанопорошка карбида бора B_4C , частицы которого имеют размеры нанодиапазона и отличаются высокой твердостью и температурой плавления, в связи с чем выполняют роль эффективных центров кристаллизации – так называемых модификаторов. Результатом их введения в расплав является изменение структуры сплава получаемых изделий, что приводит к повышению их механических свойств. Способ получения деталей из модифицированного карбида бора сплава заключается в применении для этой цели технологии жидкостной штамповки, суть которой заключается в заливке расплава в матрицу с последующим прессованием. Основной положительной характеристикой этого способа является подавление образования газово-усадочных пустот, что также способствует росту механических свойств прессованных деталей. Работа проведена на реальной детали летательной аппаратуры типа «переходник» силового агрегата. При этом в результате сочетания модификации расплава нанопорошком карбида бора и последующего его прессования были получены детали с более высокими механическими свойствами по сравнению со стандартной технологией: временное сопротивление повысилось на 8,37 %, а пластичность – в 2,1 раза.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, модификация, нанопорошок, жидкостная штамповка.

Vestnik SibGAU
Vol. 17, No. 1, P. 194–199

**THE MANUFACTURE OF PARTS OF THE VEHICLE BY LIQUID FORGING
OUT OF ALLOY AK7**

G. G. Krushenko

Institute of Computational Modeling SB RAS
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
E-mail: genry@icm.krasn.ru

This article describes a new technology for the production of parts in the application to the parts of aircraft equipment, manufactured from aluminum alloys, combining the preparation of the melt to the casting, and a method of manufacturing the actual details. The study was conducted on a known casting aluminum-silicon alloy AK7ч widely used in the aerospace industry, for the manufacture of power units parts operating in difficult-loaded conditions. Preparation of the melt to the casting, in addition to the conventional techniques, was introducing into the molten metal before pouring nanopowder of boron carbide B_4C , the particles of which have dimensions of the nano-range and high hardness melting temperature, and therefore perform the role of an effective crystallization centers – so-called modifiers. The result of their introduction into the melt is a refinement of the structure of the alloy of the products obtained, which leads to the improvement of their mechanical properties. The method of obtaining details of the modified boron carbide alloy is used for this purpose, the technology of liquid forging, the essence of which consists in pouring the melt into the matrix, followed by pressing. The main positive feature of this method is the suppression of education in the crystallized alloy gas-shrinkage cavities, which also contributes to increase the mechanical properties of the molded parts. The work has been done on a real part of the aircraft equipment type “adapter” power unit. In the result of a combination of inoculation of melt nanopowder of boron carbide and its subsequent pressing were the items received with higher mechanical properties compared to standard technology – temporal resistance increased to 8.37 per cent, and plasticity – in 2.1 times.

Keywords: aluminum alloy, inoculation, nanopowder, liquid forging.

Введение. Физико-механические свойства и эксплуатационные характеристики металлоизделий, получаемых в результате их формирования из жидкого состояния с применением различных способов литья, определяются степенью дисперсности кристаллической структуры: чем мельче структурные составляющие сплава в отлитой детали, тем ее характеристики выше. Общепринятые способы и средства, применяемые с целью измельчения (модифицирования) структуры отливок, заключаются во введении в расплав дополнительных центров кристаллизации в виде лигатур, представляющих собой двойные или тройные сплавы, состоящие из основного компонента сплава (до 90 % и больше) и модифицирующего средства [1–4]. Применяется большое количество веществ и способов модифицирования, однако суть их всех, в конечном счете, заключается во введении в металлический расплав частиц, которые по первому механизму либо служат самостоятельными центрами кристаллизации («прямое» гетерогенное зародышеобразование), либо образуют таковые в результате взаимодействия с расплавом, а по второму механизму блокируют рост возникающих в охлаждающемся расплаве кристаллических образований. В результате модифицирования измельчается либо макрозерно, либо структурные составляющие на микроуровне (возможно и сочетание обоих процессов), включая изменение геометрии выделений интерметаллических фаз с иглообразной, способствующей возникновению концентрации напряжений и развитию трещин, на глобуллярную или близкую к ней, что предотвращает опасность возникновения трещин. Результатом модифицирования металлических композиций является увеличение прочностных и пластических характеристик литых изделий.

Однако существенными недостатками лигатур, которые производятся в виде чешек (слитки массой в десятки килограмм), является, во-первых, их насыщенность газами ввиду перегрева расплава при их приготовлении, во-вторых, достаточно большая длительность их растворения в жидком металле и, в-третьих, присутствие в них потенциальных центров кристаллизации (обычно это химические соединения), которые имеют большой разброс по размерам, в связи с чем не все из них могут выполнять роль зародышей.

Наномодифицирование сплавов. В связи с этим в последние годы разработан более эффективный способ модифицирования [5–7], при котором в расплав вводятся нанопорошки (НП) тугоплавких химических соединений (нитриды, бориды, карбиды и др. – опробовано более 20 соединений), которые представляют собой сверхмелкозернистые кристаллические или аморфные образования с размерами, не превышающими 100 нм ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$) [5–7], получаемые методом плазмохимического синтеза [8]. Частицы НП представляют собой готовые центры кристаллизации [9].

При этом оказалось, что существующие способы введения порошкообразных добавок в металлические расплавы не могли быть приняты при использовании НП вследствие их особых свойств по сравнению с более крупными порошками. Так, частицы НП легко «слипаются», их окисление начинается при сравнительно низких температурах, и, что особенно важно для

выполнения роли центров кристаллизации, они плохо смачиваются жидким металлом. Несмотря на высокую плотность (от 1380 кг/м³ – TaN до 2510 кг/м³ – B₄C), НП легко образуют в воздухе пылевидную взвесь, при определенных условиях самовозгорающуюся и даже взрывоопасную. Все это делает практически невозможным прямое введение НП в расплавы.

Способ изготовления наномодифицирующего прутка. По указанным причинам и ряду других причин был разработан [5; 8; 10; 11] способ введения НП в расплав, обеспечивающий беспрепятственное проникновение частиц через окисную пленку на поверхности жидкого металла, исключение агрегирования и контролируемое дозирование.

С этой целью производили прессование прутков диаметром от 5,0 до 9,5 мм из композиции, состоящей из частиц алюминия или аллюминиевых деформируемых сплавов (порошки, крупка, гранулы, «сечка» из проволоки) и НП, приготовленной путем перемешивания в контейнере с горизонтальной эксцентричной осью вращения. Содержание НП в прутках составляло 1,5–2,7 мас. %, а при применении предварительной механоактивации прессуемой композиции в планетарной мельнице с применением стальных шариков – до 7,7 мас. % НП [12], что связано с раздроблением окисной пленки на частицах алюминия, в результате чего увеличивается количество частиц НП, внедрившихся в алюминий.

Полученные таким способом прутки имели тонкостенную оболочку (десятие доли мм), внутренний объем которых состоял из параллельных волокон [13] (рис. 1). Такая структура прутков объясняется тем, что из-за нахождения на поверхности частиц алюминия частиц НП в процессе экструзии частицы алюминия деформировались изолированно друг от друга, как бы в оболочке из частиц НП, что подтверждается результатами микроскопического изучения поверхности как частиц алюминия, так и волокон. Оказалось, что волокна полностью покрыты прочно внедрившимися в их поверхность частицами НП. При этом в прутках Ø 9,5 мм насчитывалось от 1100 до 1200 волокон сечением 0,005–0,075 мм². Расчет показал, что длина таких волокон в зависимости от размера частиц алюминия находилась в диапазоне 400–3200 мм. Очевидно, что суммарная площадь волокон имеет значительную величину, что обеспечивает равномерное распределение частиц НП по всему объему прутка. От размеров прессуемых частиц, т. е. от площади их поверхности, зависит содержание НП в объеме прутка. Чем они меньше, тем суммарная площадь находящихся в объеме контейнера частиц алюминия больше, следовательно, в прутке будет содержаться больше НП.

Все опробованные в качестве модификаторов нанопорошки, полученные как методом плазмохимического синтеза (AlN, Al₂O₃, B₄C, BN, Cr₂O₃, HfB₂, HfN, LaB₆, SiC, Si₃N₄, TaN, TiC_xN_y, TiC_xN_yO_z, TiN, TiO₂, Ti₅Si₃, VC, VCN, ZrB₂) [8], так и методом электродугового синтеза (Al₂O₃) [14], показали высокую степень измельчения структуры целого ряда аллюминиевых деформируемых и литьевых сплавов, чугунов и сталей [5–7].

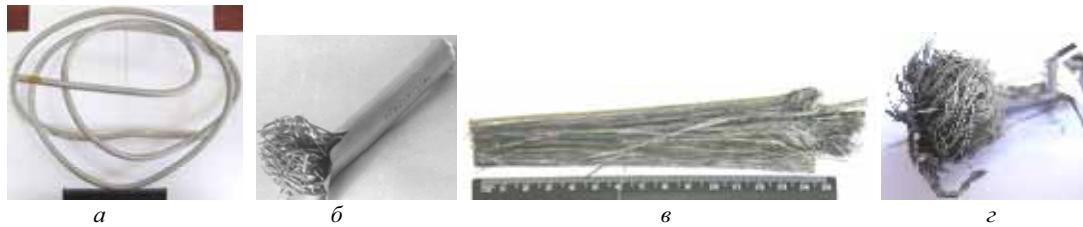


Рис. 1. Прутки, отпрессованные из композиции «частицы алюминия + нанопорошок», приготовленной при перемешивании в контейнере с горизонтальной осью вращения: *а* – \varnothing 9,5 мм, $L = 4,0$ м (черная полоска в нижней части – линейка длиной 160 мм); *б*, *в* – пруток \varnothing 9,5 мм со вспротой оболочкой; *г* – пруток \varnothing 5,0 мм со вспротой оболочкой, отпрессованный из механоактивированной композиции «порошок алюминия + нанопорошок»

При этом достаточное количество НП для получения максимального эффекта измельчения структуры сплавов и, как результат, повышения механических свойств литых изделий составляло 0,05–0,08 мас. % от массы сплава, а в отдельных случаях даже до 0,004 мас. %. Можно полагать, что универсальность модифицирующего воздействия НП на различные металлы и сплавы связана со свойствами используемых в работе для этой цели нанопорошков. Во-первых, все они имеют высокую твердость и высокую температуру плавления, во-вторых, они не обладают высокой реакционной способностью, в-третьих, они обладают высокой седиментационной устойчивостью в жидкостях. Если значение двух первых свойств достаточно понятно, то относительно третьей характеристики можно сказать следующее. Даже если вводимые в металлические расплавы известные модифицирующие агенты по известному набору характеристик [1–4] отвечают соответствующим требованиям, то не во всех случаях они работают достаточно эффективно из-за оседания под действием силы тяжести. Частицы же НП обладают исключительно высокой седиментационной устойчивостью из-за своих малых размеров и высокой удельной поверхности по причине, установленной еще в 1905 г. А. Эйнштейном [15], который показал, что для частиц размером до 1 мкм энергии броуновского движения достаточно для того, чтобы они находились в постоянном движении и не оседали под действием силы тяжести. Поэтому частицы НП, можно сказать, обладают двойным модифицирующим воздействием: во-первых, они служат центрами кристаллизации, во-вторых, будучи весьма многочисленными по количеству и находясь длительное время во взвешенном состоянии, блокируют диффузию соответствующих атомов (клластеров, блоков) к зарождающимся и растущим кристаллам, что, в конечном счете, и способствует формированию мелко-кристаллической структуры литых изделий. Кроме того, как уже было нами установлено [16], частицы НП могут упрочнять присутствующие в расплавах интерметаллические соединения. Все эти эффекты и ведут к повышению механических свойств литых изделий.

Жидкая штамповка деталей из наномодифицированного сплава. Однако, несмотря на повышение прочности механических литых деталей в результате модификации, в том числе и нанопорошками, не всегда удается избежать возникновения в отливках дефектов усадочного происхождения, присущих в виде рассеянных или сосредоточенных пустот,

что связано с недостатком питания жидким металлом затвердевающего металла [17; 18]. При этом в усадочные пустоты может выделяться и присутствующий в жидком металле водород, образуя так называемые газово-усадочные пустоты [19]. В результате чего уменьшается фактическое рабочее сечение деталей, что снижает их механические свойства, а в случае эксплуатации под давлением, например в составе двигателей летательных аппаратов, – и герметичность.

В связи с этим нами была разработана технология изготовления деталей, сочетающая как результат измельчение структуры с помощью нанопорошка, так и повышение плотности металла с помощью жидкой штамповки. Суть такой технологии заключается, во-первых, во введении в расплав НП (операция модификации), во-вторых, в заливке сплава в матрицу и последующем его прессовании (рис. 2) [20]. НП вводили в рассчитанной длине прутка, объем которого содержал требуемое его количество – до 0,05 мас. %. Применение жидкой штамповки для изготовления деталей известно еще с 50-х гг. прошлого столетия [21], включая применение этой технологии для получения деталей из различных цветных металлов и сплавов [22], в том числе и из алюминиево-кремниевых сплавов [23; 24]. Устройство типичного штампа, конструкция которого аналогична используемой в настоящей работе, приведено на рис. 3 [24].

Объектом исследования служила деталь типа «переходник» силового агрегата летательного аппарата массой 2,5 кг, работающая в условиях высоких нагрузок, для изготовления которой применяли алюминиево-кремниевый сплав АК7ч (6,0–8,0 % Si; 0,2–0,4 % Mg; 0,2–0,6 % Mn; ост. – Al), который готовили в индукционной печи в графитошамотовом тигле с рафинированием гексахлорэтаном C_2Cl_6 . Модификацию производили НП карбида бора B_4C , полученного методом плазмохимического синтеза [8], в результате его введения в жидкий металл (до 0,5 мас. %) в объеме предварительно отпрессованного прутка (\varnothing 5,0 мм). После растворения основы прутка (алюминия) сплав выдерживали 15–20 с и заливали его в матрицу при 953–973 К. Затем производили штамповку детали при удельном давлении $491 \cdot 10^6$ МПа.

Результаты испытаний механических свойств образцов, вырезанных из штамповок, термообработанных по режиму Т5, показали (табл. 1), что по сравнению со стандартной технологией подготовки расплава временное сопротивление σ_b модифицированного B_4C и затем отштампованного сплава возросло на 8,37 % (с 245,0 до 265,5 МПа), а относительное удлинение

δ – в 2,1 раза (с 4,9 до 10,1 %). При этом твердость НВ осталась на прежнем уровне – 620 МПа. По ГОСТ 1583–93 требуется $\sigma_b \geq 210$ МПа и $\delta \geq 2,0$ %. Изучение микроструктуры показало, что НП B_4C приводит к существенному измельчению дендритов первичного α -твердого раствора и эвтектики. Кроме того, по результатам рентгенопросвечивания и изучения шлифов темплетов, вырезанных из штамповок, пористость и газово-усадочные раковины не выявлялись.

Следует при этом отметить, что определенный вклад в эффект модификации вносит и оксид алюминия, присутствующий в виде пленки на частицах алюминия, которые являются основой композиции (частицы алюминия + НП), из которой прессуют

модифицирующий пруток, что нами установлено в работе [25], например, при полунепрерывном литье слитков $\varnothing 120$ мм из сплава Д1, когда в лунку кристаллизатора вводили отпрессованный из гранул этого же сплава пруток $\varnothing 9,5$ мм. Отлитые слитки прессовали в прутки $\varnothing 16$ мм. Испытания механических свойств этих прутков показали (табл. 2), что в результате введения в расплав прутка, отпрессованного из гранул сплава Д1, их прочностные свойства оказались выше свойств прутков, отпрессованных из слитков из сплава Д1, в который не вводили прутки из гранул. При этом также повышается и относительное удлинение, характеризующее пластичность сплава.

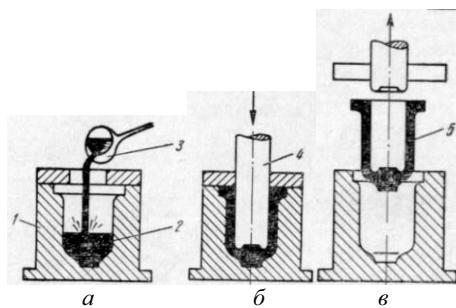


Рис. 2. Схема получения детали штамповкой жидкого металла: *a* – заливка жидкого металла; *b* – прессование; *c* – извлечение готовой детали; 1 – пресс-форма (матрица); 2 – жидкий металл; 3 – заливочный ковш; 4 – пуансон; 5 – отпрессованная деталь [20]

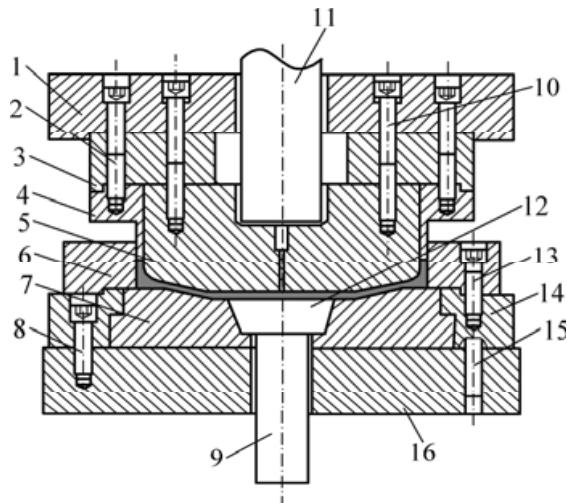


Рис. 3. Штамп для изготовления деталей из алюминиевых сплавов способом жидкой штамповки: 1 – верхняя плита штампа; 2, 8, 13 – винтовые болты; 3 – промежуточная плита; 4 – внешний пуансон; 5 – пуансон; 6, 14 – внутренние гильзы штампа; 7 – нижняя плита штампа; 9 – выталкиватель отштампованной детали; 10 – установочный болт; 11 – поршень; 12 – головка выталкивателя; 15 – установочный штифт; 16 – основная плита штампа; отштампованная деталь расположена между деталями штампа 5, 6, 7, 12 [24]

Влияние наномодифицирования и жидкой штамповки на механические свойства детали из сплава АК7Ч

Таблица 1

Технология литья	Временное сопротивление σ_b , МПа		Относительное удлинение δ , %	
	Величина	Прирост	Величина	Прирост
Стандартная технология	245,0	–	4,9	–
Модифицирование B_4C + жидккая штамповка	265,5	8,37 %	10,1	в 2,1 раза
ГОСТ 1583–89	210,0	–	–	–

Таблица 2

Механические свойства прутков Ø 16 мм, отпрессованных из слитков Ø 120 мм, отлитых полунепрерывным способом из сплава Д1, в зависимости от технологии воздействия на расплав

Технология литья слитка	Временное сопротивление σ_b	Предел текучести $\sigma_{0,2}$	Относительное удлинение δ
	Величина, МПа/прирост, %	Величина, МПа/прирост, %	Величина, %/прирост, %
Литье слитка по стандартной технологии	420/–	280/–	12,4/–
	465/10,71	335/19,64	13,8/11,11

Механизм этого эффекта заключается в следующем. В обычных условиях алюминий, включая и частицы алюминиевых сплавов, покрыт окисной пленкой толщиной всего 10^{-5} мм, которая представляет собой наиболее устойчивую форму окиси алюминия – модификацию $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, температура плавления которой составляет 2050 °C и которая обладает исключительно высокой твердостью – 30,2 ед HRC или 1000 МПа по Бринеллю, твердость по Моосу – 9 ед. При прессовании контейнера с гранулами в фильере пресса возникают значительные усилия (по расчетам для фильеры Ø 9,5 мм – 300 МПа), что приводит к раздроблению хрупкой окисной пленки $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ на дисперсные частицы, которые и могут служить дополнительными центрами кристаллизации. Равномерность распределения раздробленных частиц по объему слитка обеспечивается турбулентностью расплава в лунке кристаллизатора, что подтверждается структурой шлифа продольного сечения слитка, на котором выявляется четкая линия раздела, повторяющая контур лунки и отделяющая объем слитка, в который вводили пруток и который характеризуется однородной мелкокристаллической структурой по всему сечению, от структуры металла до введения прутка, которая характеризуется обычным для слитков строением: прилегающая к стенке водоохлаждаемого кристаллизатора наружная зона слитка имеет мелкокристаллическую структуру, затем следует зона столбчатой структуры с направлением кристаллов к центру слитка, и в центре слитка располагается зона крупных равноосных кристаллов.

Заключение. В результате выполненного исследования разработана комплексная двухэтапная технология получения деталей, комплектующих изделия летательной аппаратуры, заключающаяся на первом этапе (приготовление сплава) в модифицировании сплава путем введения в жидкий металл нанопорошка нитрида бора, и на втором этапе – в прессовании из этого сплава деталей, что привело к повышению их прочности (на 8,37 %) и пластичности (в 2,1 раза) по сравнению со стандартной технологией. При этом прочность оказалась выше требований ГОСТ 1583–89 на 26,2 %, а пластичность – в 5,0 раз.

Библиографические ссылки

1. Модифицирование силуминов. Киев : АН УССР, 1970. 179 с.
2. Крещановский Н. С., Сидоренко М. Ф. Модифицирование стали. М. : Металлургия, 1970. 296 с.
3. Бондарев Б. И., Напалков В. И., Таraryшкин В. И. Модифицирование алюминиевых деформируемых сплавов. М. : Металлургия, 1979. 224 с.
4. Гольдштейн Я. Е., Мизин В. Г. Модифицирование и микролегирование чугуна. М. : Металлургия, 1986. 272 с.
5. Крушенко Г. Г., Фильков М. Н. Модифицирование алюминиевых сплавов нанопорошками // Нанотехника. 2007. № 4. С. 58–64.
6. Крушенко Г. Г. Некоторые аспекты применения нанотехнологий // Нанотехника. 2008. № 1. С. 5–9.
7. Нанопорошковые технологии в машиностроении / В. В. Москвичев [и др.] / Сибирский федеральный университет. Красноярск. 2013. 186 с.
8. Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их применение для модифицирования металлов и сплавов / В. П. Сабуров [и др.]. Новосибирск : Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1995. 344 с.
9. Крушенко Г. Г. Роль частиц нанопорошков при формировании структуры алюминиевых сплавов // Металлургия машиностроения. 2011. № 1. С. 20–24.
10. А. с. 831840 СССР. Способ модифицирования литейных алюминиевых сплавов эвтектического типа / Г. Г. Крушенко, Ю. М. Мусоханов, И. С. Ямских и др. Бюл. № 19. 1981.
11. Крушенко Г. Г. Некоторые методы подготовки и введения нанопорошковых модификаторов в металлические расплавы // Нанотехника. 2008. № 2. С. 18–21.
12. Пат. 2475334 Российская Федерация. Способ получения модификатора для доэвтектических алюминиево-кремниевых сплавов / Крушенко Г. Г., Фильков М. Н. Опубл. 2013, Бюл. № 5.
13. Пат. 2348488 Российской Федерации. Способ изготовления алюминиевых волокон / Крушенко Г. Г., Москвичев В. В., Буров А. Е. Опубл. 2009, Бюл. № 7.
14. Пат. 2080961 Российской Федерации. Способ получения износостойких отливок из чугуна / Крушенко Г. Г., Пинкин В. Ф., Трошкин Б. И. и др. Опубл. 1997, Бюл. № 16.
15. Einstein A. Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen // Annalen der Physik. Mai 1905. (ser. 4). B. 17. P. 549–560.
16. Крушенко Г. Г., Балашов Б. А. Упрочнение частиц TiAl_3 в алюминиевом композиционном материале // Литейное производство. 1995. № 10. С. 16–17.
17. Гуляев Б. Б. Теория литейных процессов. Л. : Машиностроение, 1976. 216 с.
18. Simulation of unconstrained solidification of A356 aluminium alloy on distribution of micro/macro shrinkage / H. Bayani [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. 2014. Vol. 3, iss. 1. P. 55–70.

19. Knipp E. Fehlererscheinungen an Gusstücken. Dusseldorf : Giesserei. Verlag GmbH, 1961. 273 p.
20. Литьё цветных металлов под давлением [Электронный ресурс]. URL: <http://www.teh-lib.ru/tpip/lityo-cvetnih-metallov-pod-davleniem.html>.
21. Бобров И. И., Гречко Н. П. Опыт штамповки деталей из жидкого металла // Вестник машиностроения. 1945. № 6–7. С. 42–45.
22. Сергеев П. С. Штамповка жидких цветных металлов и сплавов. Л. : Судпромгиз, 1957. 88 с.
23. Murali S., Yong M. S. Liquid forging of thin Al-Si structures // Journal of Materials Processing Technology. 2010. Vol. 210, iss. 10. P. 1276–1281.
24. Homogenization on microstructure and mechanical properties of 2A50 aluminum alloy prepared by liquid forging / D.U. Zhi-ming [et al.] // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2011. Vol. 21, iss. 11. P. 2384–2390.
25. Пат. 2430807 Российская Федерация. Способ получения слитков из алюминиевых сплавов полуунпрерывным литьем / Крушенко Г. Г. Опубл. 2011, Бюл. № 28.

References

1. *Modifitsirovanie siluminov* [Modification of silumins]. Kiev, AN USSR Publ., 1970, 179 p.
2. Kreshchanovskiy N. S., Sidorenko M. F. *Modifitsirovanie stali* [Modification of steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970, 296 p.
3. Bondarev B. I., Napalkov V. I., Tararyshkin V. I. *Modifitsirovanie aljuminievykh deformiruemeykh splavor* [Modification of wrought aluminum alloy]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979, 224 p.
4. Gol'dshteyn Ya. E., Mizin V. G. *Modifitsirovanie i mikrolegirovanie chuguna* [Modification and microalloying of cast iron]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986, 272 p.
5. Krushenko G. G., Fil'kov M. N. [Modification of aluminum alloys by nanopowders]. *Nanotekhnika*, 2007, No. 4, P. 58–64 (In Russ.).
6. Krushenko G. G. [Some aspects of nanotechnology]. *Nanotekhnika*, 2008, No. 1, P. 5–9 (In Russ.).
7. Moskvichev V. V., Krushenko G. G., Burov A. E. et al. *Nanoporoshkovye tekhnologii v mashinostroenii* [Nanopowders technologies in machinery]. Krasnoyarsk, Siberia Federal University Publ., 2013, 186 p.
8. Saburov V. P., Cherepanov A. N., Zhukov M. F., Krushenko G. G. et al. *Plazmokhimicheskiy sintez ul'tradispersnykh poroshkov i ikh primenenie dlya modifitsirovaniya metallov i splavor* [Plasmachemical synthesis of ultradispersed powders and their application for modification of metals and alloys]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1995, 344 p.
9. Krushenko G. G. [The role of the nanopowder particles in the formation of the structure of aluminum alloys]. *Metallurgiya mashinostroeniya*, 2011, No. 1, P. 20–24 (In Russ.).
10. Krushenko G. G., Musohranov Ju. M., Jamskikh I. S. et al. *Sposob modifitsirovaniya liteynykh alyuminievykh splavor evtekticheskogo tipa* [The method of inoculation of cast aluminum alloys of eutectic type]. Patent RF, no. 831840, 1981.
11. Krushenko G. G. [Some methods of preparation and introduction of the nanopowder modifiers in metallic melts]. *Nanotekhnika*, 2008, No. 2, P. 18–21 (In Russ.).
12. Krushenko G. G., Fil'kov M. N. *Sposob poluchenija modifikatora dlya doevtekticheskikh alyuminievo-kremnievykh splavor* [The way to obtain a modifier for hypoeutectic aluminum-silicon alloys]. Patent RF, no. 2475334, 2013.
13. Krushenko G. G., Moskvichev V. V., Burov A. E. *Sposob izgotovleniya alyuminievykh volokon* [A method of manufacturing aluminum fibers]. Patent RF, no. 2348488, 2009.
14. Krushenko G. G., Pinkin V. F., Troshkin B. I. et al. *Sposob poluchenija iznosostoykikh otlivok iz chuguna* [A method of obtaining a wear-resistant castings from cast iron]. Patent RF, no. 2080961, 1997.
15. Einstein, Albert Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. *Annalen der Physik*, May 1905. (ser. 4). B. 17. P. 549–560.
16. Krushenko G. G., Balashov B. A. [Hardening of TiAl₃ particles in aluminum composite material]. *Liteynoe proizvodstvo*, 1995, No. 10, P. 16–17 (In Russ.).
17. Gulyaev B. B. *Teoriya liteynykh protsessov*. [The theory of foundry processes]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1976, 216 p.
18. Bayani H., Mirbagheri S. M. H., Barzegari M. et al. Simulation of unconstrained solidification of A356 aluminium alloy on distribution of micro/macro shrinkage. *Journal of Materials Research and Technology*, January–March 2014, Vol. 3, Iss. 1, P. 55–70.
19. Knipp E. Fehlererscheinungen an Gusstücken. Dusseldorf: Giesserei. Verlag GmbH. 1961. 273 p.
20. *Lit'e tsvetnykh metallov pod davleniem* [Casting of non-ferrous metals under pressure] (In Russ.). Available at: [http://www.teh-lib.ru/tpip/lityo-cvetnih-metallov-pod-davleniem.html/](http://www.teh-lib.ru/tpip/lityo-cvetnih-metallov-pod-davleniem.html) (accessed 13.11.2014).
21. Bobrov I. I., Grechko N. P. [Experience in stamping parts from liquid metal]. *Vestnik mashinostroeniya*, 1945, No. 6–7, P. 42–45 (In Russ.).
22. Sergeev P. S. *Shtampovka zhidkikh tsvetnykh metallov i splavor* [Stamping of liquid non-ferrous metals and alloys]. Leningrad, Sudpromgiz Publ., 1957, 88 p.
23. Murali S., Yong M. S. Liquid forging of thin Al-Si structures. *Journal of Materials Processing Technology*, 1 July 2010, Vol. 210, Iss. 10, P. 1276–1281.
24. D. U. Zhi-ming et al. Homogenization on microstructure and mechanical properties of 2A50 aluminum alloy prepared by liquid forging. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. November 2011, Vol. 21, Iss. 11, P. 2384–2390.
25. Krushenko G. G. *Sposob poluchenija slitkov iz alyuminievykh splavor polunepryvnym lit'em* [The method of producing ingots of aluminum alloy semi-continuous casting]. Patent RF, no. 2430807, 2011.

ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕХСЛОЙНЫХ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ В КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

Н. А. Тестоедов, В. Н. Наговицын, М. Ю. Пермяков*

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

В космической технике находят применение трехслойные сотовые конструкции с установленными в них закладными элементами. Трехслойная (сотовая) конструкция состоит из двух тонких обшивок (несущих слоев), между которыми размещается относительно легкий и менее прочный заполнитель, обеспечивающий совместную работу несущих слоев. Закладные элементы, установленные в трехслойную сотовую конструкцию, предназначены для установки оборудования, кабелей, волноводных сетей и соединения сотовых конструкций между собой. Необходимо учитывать ряд факторов: выбор высоты сотового пакета, толщины обшивки, размера сотов и подбор закладного элемента.

В различных литературных источниках и научных работах как российских, так и зарубежных исследователей данной проблеме практически не уделяется внимания, либо исследования не проводятся совсем.

Для грамотного решения данного вопроса необходимо провести ряд исследовательских работ в части испытаний сотовых конструкций с закладными элементами. Необходимо более подробно изучить влияние сотового заполнителя, несущих слоев, размеров закладных элементов на несущую способность трехслойной конструкции в целом, качественно обработать данные, полученные экспериментальным путем и ручным расчетом.

Данные, полученные в результате проведенных исследований, применяются при проектировании и изготовлении трехслойных сотовых конструкций космических аппаратов.

Ключевые слова: трехслойная сотовая конструкция, сотовый заполнитель, несущие слои, закладной элемент, испытания.

Vestnik SibGAU
Vol. 17, No. 1, P. 200–211

SPACECRAFT APPLICATION OF THREE LAYER HONEYCOMB STRUCTURES

N. A. Testoedov, V. N. Nagovitsin, M. Yu. Permyakov*

JSC “Information satellite system” named after academician M. F. Reshetnev”
52, Lenin Str., Jeleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
*E-mail: Permyakov@iss-reshetnev.ru

Honeycomb structures with potted inserts are extensively applied in various spacecrafts. Three layer honeycomb structure comprises two thin skins acting as load bearing layers with lightweight and less strong honeycomb core placed in between supporting the load bearing layers. The inserts potted into the three layer honeycomb structure are intended for equipment, harness and waveguide integration and panel to panel joints. It is necessary to consider a number of factors such as proper selection of the core height, skin thickness, core size and the insert itself.

There is either almost no attention paid to this matter in various reference sources and scientific papers both by Russian and international researchers, or no research is conducted in this area at all.

To acquire a reasonable solution to this matter it is necessary to perform research efforts related to testing the honeycomb structures with potted inserts. It is necessary to study in detail the effect of the honeycomb core, load bearing layers, insert dimensions on the load bearing capacity of the three layer structure in general. Also, it is necessary to perform proper processing of the experimental and estimation results.

The data resulting from this investigation will be employed in spacecraft three layer honeycomb structures design and manufacturing activities.

Keywords: three layer honeycomb structure, honeycomb, bearing layers, inserts potted, tests.

Введение. Повышение эффективности современных космических аппаратов неразрывно связано с поиском и реализацией новых конструктивно-технологических решений.

Одними из основных и наиболее важных направлений является применение трехслойных конструкций. Трехслойная конструкция представляет собой два несущих слоя и расположенный между ними легкий

заполнитель, наиболее ярким представителем которого является сотовый. Несущие слои воспринимают продольные нагрузки (растяжение, сжатие, сдвиг) в своей плоскости и поперечные изгибающие моменты.

Главная особенность трехслойной конструкции с заполнителем состоит в том, что в результате разнесения несущих слоев на некоторое расстояние друг от друга достигается большее отношение жесткости конструкции к ее массе. Если сравнить это с однослойной пластиной равной массы, то отношение жесткостей будет не менее 3 (табл. 1) [1; 2].

Для передачи нагрузки при креплении сотовых конструкций между собой и установки на них приборов используются закладные элементы. На рис. 1 представлен общий вид трехслойной конструкции.

В сотовых конструкциях существует тесная связь между применяемыми материалами и технологией изготовления. Изменение хотя бы одного из материалов без предварительной технологической и экспериментальной отработки недопустимо, так как может повлечь за собой резкое ухудшение эксплуатационных характеристик конструкции.

Особенностью расчета трехслойных конструкций является то, что его необходимо разделить на два равнозначных по важности расчета:

- во-первых, расчет общей прочности и устойчивости панели с выбором толщины несущих слоев и оптимальных параметров сотового заполнителя;
- во-вторых, расчет местной прочности и устойчивости, обусловленный граничными условиями, типом соединения панелей и видом приложения нагрузки.

Целью последнего расчета является определение местного усиления панелей, выбор типа и параметров соединения. К параметрам относятся размеры закладных элементов, зоны усиления заполнителя и обшивок [3; 4].

Сотовый заполнитель. Сотовые заполнители имеют регулярную пространственную структуру. При этом размеры ячеек сотовых заполнителей малы по сравнению с размерами трехслойных сотовых конструкций. Это позволило исследователям принимать сотовый заполнитель как некоторый условный, однородный по объему, анизотропный материал, упругие характеристики которого заданы. Эти характеристики стали называться приведенными. Такая гипотеза означает, что на практике вводится некоторый условный сплошной материал, наделенный всеми свойствами реального сотового заполнителя и занимающий тот же объем, что и сам заполнитель [5].

Выбор формы сот зависит от формы трехслойной конструкции и выполняемой ею функции. Механические свойства сотового заполнителя зависят главным образом от толщины стенок и размера грани ячеек [6].

Несущие слои. Несущие слои конструкций с сотовым заполнителем могут быть выполнены из металлических и неметаллических материалов. Толщины несущих слоев могут быть одинаковыми или разными. Толщина несущих слоев выбирается из условий необходимой прочности и жесткости конструкции. В конструкции несущие слои могут быть переменной толщины [7].

В kleеных конструкциях с сотовым заполнителем широко применяются несущие слои из алюминиевых сплавов, а также из композиционных материалов.

Композиционные материалы представляют собой сочетание волокон из высокопрочных материалов (элементы армирования) с различными матрицами (связующим). В качестве матрицы наряду с эпоксидными и другими полимерными связующими применяются вязкие и пластичные металлы и сплавы – алюминий, титан и др. Применение в качестве армирующих элементов волокон бора и углерода существенно повышают жесткость конструкции. Металлическая матрица увеличивает прочность на сдвиг [8; 9].

Характерной особенностью композитных материалов является сильная зависимость их прочностных свойств от технологии изготовления (рис. 2). Пути получения высоких и стабильных механических характеристик известны: это автоматизация производства, непрерывный контроль технологических процессов и качества продукции.

Наибольшие значения показателей механических свойств композиционные материалы имеют при нагружении вдоль однородных волокон ($\phi = 0$, рис. 2, а). При изменении угла армирования характеристики материала меняются (рис. 2, б) [10].

При нагружении вдоль волокон удельные прочность и модуль упругости композиционного материала превосходят аналогичные характеристики, например, конструкционных алюминиевых сплавов.

Закладной элемент. Закладной элемент – это часть разъемного фиксирующего устройства, обеспечивающая соединение между сотовыми трехслойными конструкциями. Закладной элемент обеспечивает установку оборудования, приборов, волноводных линий и кабелей. Закладные элементы, применяемые в конструкциях космических аппаратов, делятся на сквозные и односторонние (рис. 3) [11].

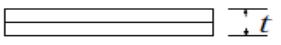
Сквозной закладной элемент – это элемент, состоящий из металлической вставки в форме катушки, которая устанавливается в сквозное отверстие, просверленное в сотовой трехслойной конструкции, и фиксируется внутри панели с помощью пенокомпауда [11].

Односторонний закладной элемент – это элемент, состоящий из металлической вставки в форме катушки, которая устанавливается в глухое отверстие, просверленное с одной стороны трехслойной конструкции, и фиксируется внутри конструкции с помощью пенокомпауда [11].

Закладные элементы могут быть изготовлены из алюминиевых и титановых сплавов. Применение этих материалов обусловлено обеспечением минимального веса, конструктивной прочностью и хорошими технологическими свойствами. На рис. 4 представлен общий вид закладных элементов.

Несущая способность сквозного закладного элемента. Максимальная нагрузка или напряжение, которую конструкция или материал может выдержать без разрывов и повреждений, называется несущей способностью. Подразумевается, что состояние напряжения представляет собой одноосное растяжение или чистый сдвиг.

Отношение прочности и жесткости к массе трехслойной конструкции

Параметр	Высота		
			
Относительная жесткость на изгиб	1	7,0	37
Относительная прочность на изгиб	1	3,5	9,2
Относительная масса	1	1,03	1,06

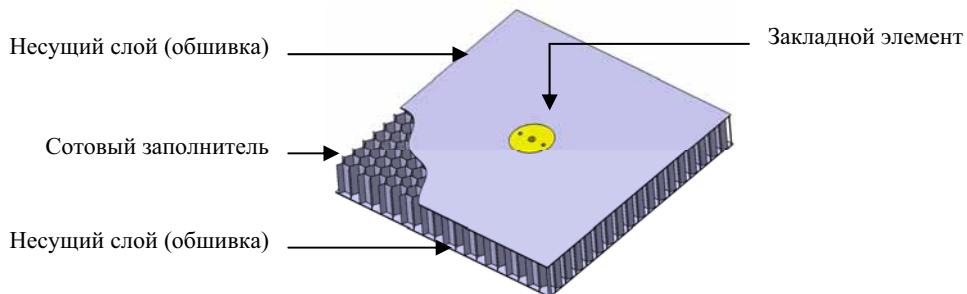


Рис. 1. Общий вид трехслойной конструкции

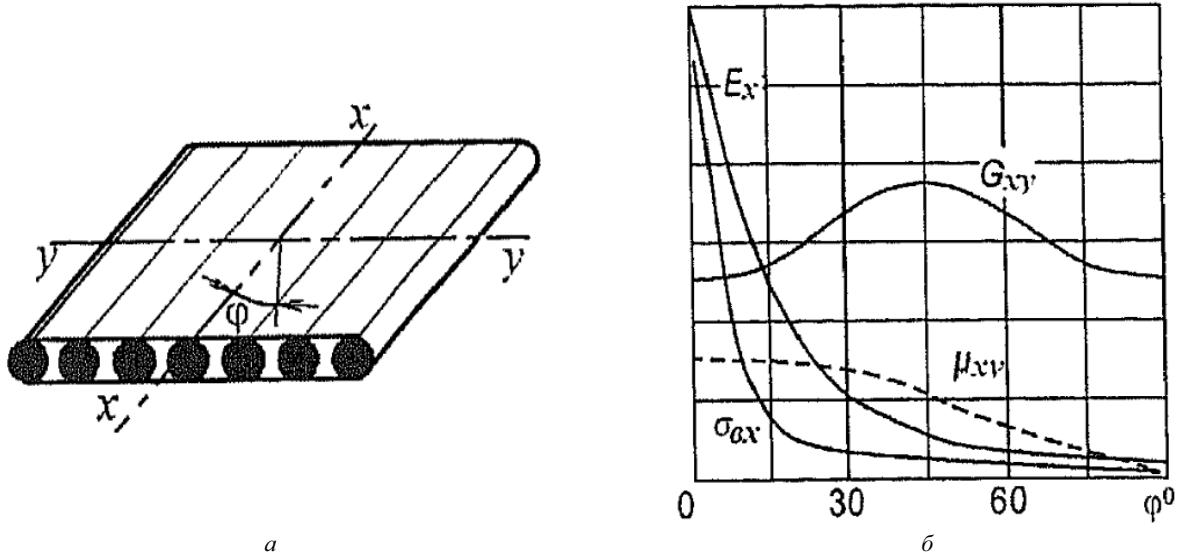
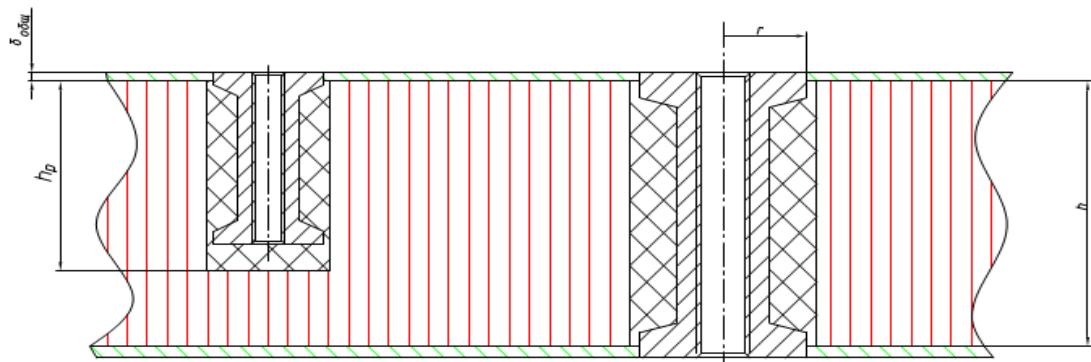
Рис. 2. Зависимость характеристик композиционного материала от направления армирующих волокон:
а – расположение однонаправленных волокон; б – влияние угла ϕ на характеристики армирующих волокон

Рис. 3. Виды закладных элементов



Рис.4. Общий вид закладных элементов

Расчетное значение несущей способности сквозного закладного элемента при одноосном растяжении определяется по следующей формуле:

$$F_n = 2 \cdot \pi \cdot r_{y0} \cdot h \cdot \tau_{\text{нн}} + k_0 \cdot \sigma_{i\bar{a}\bar{r}} \cdot r_{y0} \cdot \delta_{i\bar{a}\bar{r}},$$

где F_n – несущая способность сквозного закладного элемента на растяжение; r_{ϕ} – эффективный радиус; h – высота сотового заполнителя без учета обшивки; $\tau_{\text{нн}}$ – минимальное значение сотового заполнителя на сдвиг; $\sigma_{\text{общ}}$ – предел текучести материала обшивок; $\delta_{\text{общ}}$ – толщина обшивок; k_0 – коэффициент, определяемый опытным путем, от 0,65 до 1,0.

Эффективный радиус зависит от конкретного радиуса вставки, размера ячейки соты (стороны шестиугранника соты) и принимает свое минимальное значение для конкретного положения центра закладного элемента внутри шестиугранной ячейки. Минимальное значение определяется по формуле

$$r_{y0} = r + 0,6 \cdot S_c,$$

где r – радиус закладного элемента; S_c – размер стороны шестиугранника соты.

Расчетное значение несущей способности сквозного закладного элемента на сдвиг происходит из-за потери устойчивости обшивки при фиксации вокруг прилепляемого элемента. Таким образом, возможности нагружения данного соединения ограничиваются прочностью материала обшивки.

Расчетное значение несущей способности сквозного закладного элемента при одноосном растяжении определяется по следующей формуле:

$$F_n = 2 \cdot (2 \cdot \delta_{i\bar{a}\bar{r}} \cdot r \cdot \sigma_{i\bar{a}\bar{r}}).$$

Несущая способность одностороннего закладного элемента. Несущая способность одностороннего закладного элемента определяется по формуле

$$F_n = 2 \cdot \pi \cdot r_{y0} \cdot h_p \cdot \tau_{\text{нн}} + k_0 \cdot \sigma_{i\bar{a}\bar{r}} \cdot r_{y0} \cdot \delta_{i\bar{a}\bar{r}},$$

где h_p – высота пенокомпауда (рис. 3).

Сдвиг или продольная нагрузка, действующая на односторонний закладной элемент, воздействует на средний слой обшивки (рис. 5). Диаметр D посадочной поверхности прилегающего элемента должен быть, как минимум, не меньше типичного диаметра заливки, т. е.

$$D \geq 2 \cdot r_{y0}.$$

Это необходимо для обеспечения достаточной фиксации одностороннего закладного элемента и предотвращения его вдавливания под обшивку (рис. 6).

Несущая способность подобного соединения ограничивается в основном предельной прочностью материала обшивки, небольшая часть нагрузки распределяется на сотовый заполнитель. Таким образом, расчетное значение несущей способности одностороннего закладного элемента на сдвиг определяется по следующей полуэмпирической формуле:

$$F_n = 8 \cdot r_{y0}^2 \cdot \tau_{\text{нн}} + 2 \cdot \sigma_{i\bar{a}\bar{r}} \cdot r_{y0} \cdot \delta_{i\bar{a}\bar{r}}.$$

Критическая сдвиговая нагрузка квазинезависима от высоты сотового заполнителя.

Экспериментальное определение несущей способности трехслойной конструкции. Объектом испытаний являлись образцы, изготовленные согласно конструкторской документации. Образец представляет собой сотовую панель с вклеенным закладным элементом. Размеры образца определяются параметрами испытательного оборудования.

Анализ (испытания) проводился на образцах с закладными элементами диаметром 8,5 мм (односторонняя закладная), 20 и 30 мм (сквозные закладные элементы).

Целью испытаний являлись:

- определение разрушающей нагрузки образцов при различных видах силового воздействия (испытания проводились на растяжение и сдвиг);

- подтверждение расчетных данных по разрушающей нагрузке образцов при различных видах силового воздействия.

Разрушающей нагрузкой образца является нагрузка, при воздействии которой на элемент в месте его установки начинают возникать остаточные деформации несущих слоёв или разрушение составных частей образца.

Критерием положительной оценки результатов испытаний является получение значения нагрузки закладного элемента образца на точке начала пластической деформации (отклонение диаграммы от прямолинейности) на диаграмме «нагрузка–перемещение».

Испытания проводились на универсальной испытательной машине Instron.

Instron является отличным и доступным решением для широкого спектра современных лабораторий контроля качества как в легкой, так и в тяжелой промышленности. Данные разрывные машины обладают простым и понятным интерфейсом управления, высокими эксплуатационными показателями и превосходной надежностью. Конструкция рамы обеспечивает высокие характеристики жесткости и соосности, что немаловажно при проведении испытаний материалов [12].

На рис. 7 представлена универсальная испытательная машина Instron.

При испытаниях на растяжение образец устанавливали вместе с технологической оснасткой (рис. 8).

Согласно рис. 8, размер D (отверстие в сменной опоре) подбирался из имеющихся в комплекте универсальной испытательной машины пластин. В отверстие закладного элемента устанавливался соответствующий внутреннему диаметру отверстия захват-переходник, обеспечивающий приложение усилия. Диаметр отверстия в оснастке определялся по формуле

$$D = 8 \cdot S_n + 2 \cdot r.$$

При испытаниях на сдвиг образец устанавливали вместе с технологической оснасткой (рис. 9). Переходную тягу закрепили на образце, соединили тягу с захватом-переходником универсальной испытательной машины Instron.

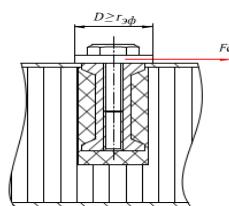


Рис. 5. Односторонний закладной элемент под сдвигающей нагрузкой (условия крепления)

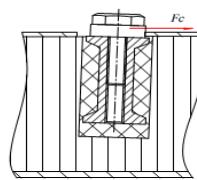


Рис. 6. Односторонний закладной элемент под сдвигающей нагрузкой (вдавливание под обшивку)



Рис. 7. Универсальная испытательная машина Instron

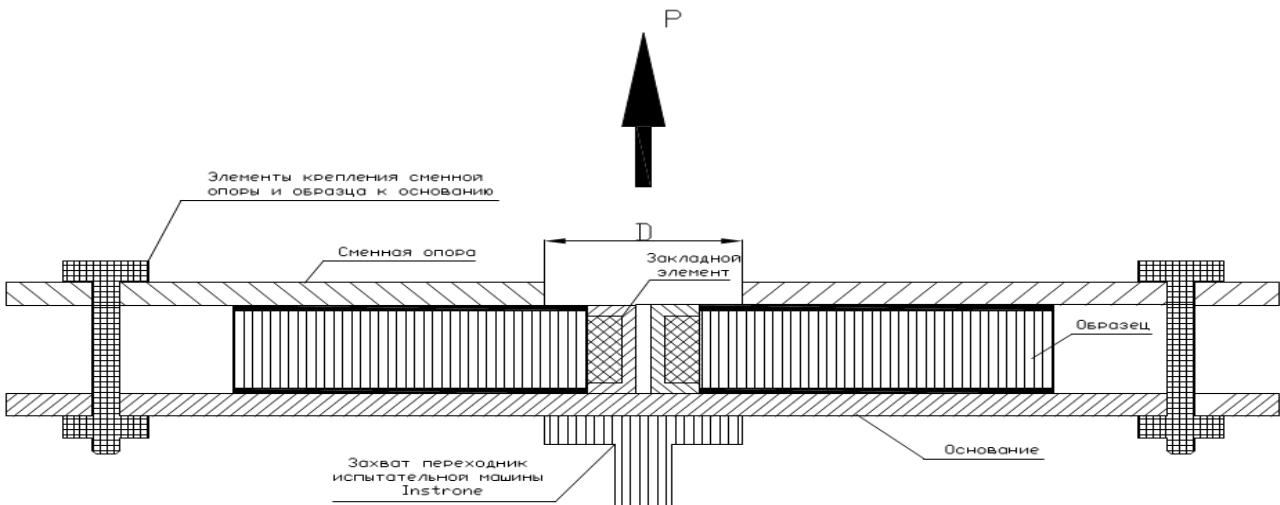


Рис. 8. Схема испытаний образцов на растяжение

Для каждого вида испытаний было изготовлено по три образца.

В табл. 2 представлено сравнение результатов эксперимента и расчета образцов с высотой сотового пакета 30 мм, толщиной одной обшивки 0,3 мм (обшивки выполнены на основе алюминиевого сплава В95) и сотовым заполнителем 5056-2,5-23П.

В табл. 3 представлено сравнение результатов эксперимента и расчета образцов с высотой сотового пакета 30 мм, толщиной одной обшивки 0,5 мм (обшивки выполнены на основе алюминиевого сплава В95) и сотовым заполнителем 5056-2,5-23П.

В табл. 4 представлено сравнение результатов эксперимента и расчета образцов с высотой сотового пакета 30 мм, толщиной одной обшивки 0,3 мм (обшивки выполнены на основе алюминиевого сплава В95) и сотовым заполнителем АМг2-Н-2,5-40П.

В табл. 5 представлено сравнение результатов эксперимента и расчета образцов с высотой сотового пакета 40 мм, толщиной одной обшивки 0,3 мм (обшивки изготовлены из четырех слоев углеродной ленты Кулон 500/0,07, выложенных под углом $1/0^\circ + 1/90^\circ + 1/90^\circ + 1/0^\circ$) и сотовым заполнителем 5056-2,5-23П.

В табл. 6 представлено сравнение результатов эксперимента и расчета образцов с высотой сотового пакета 40 мм, толщиной одной обшивки 0,64 мм (обшивки изготовлены из ткани 3198) и сотовым заполнителем 5056-2,5-23П.

Исходя из данных, полученных в результате эксперимента (табл. 2–4), следует, что в образцах одинаковой высоты с одним и тем же сотовым заполнителем и материалом несущих слоев обшивки несущая способность выше у того образца, у которого более усилен несущий слой. При одинаковых габаритах, толщине и материале обшивки, но с различным сотовым заполнителем несущая способность выше у того образца, у которого сотовый заполнитель имеет более высокое значение прочности на сдвиг.

Образец со сквозным закладным элементом диаметром 20 мм, обшивками из алюминиевого сплава В95 и сотовым заполнителем 5056-2,5-23П, прошедший испытания, представлен на рис. 10.

Обработка результатов испытаний. Статическая обработка результатов испытаний основана на предложении, что рассеивание полученных в одинаковых условиях величин подчиняется тому или иному закону распределения плотности вероятности [13].

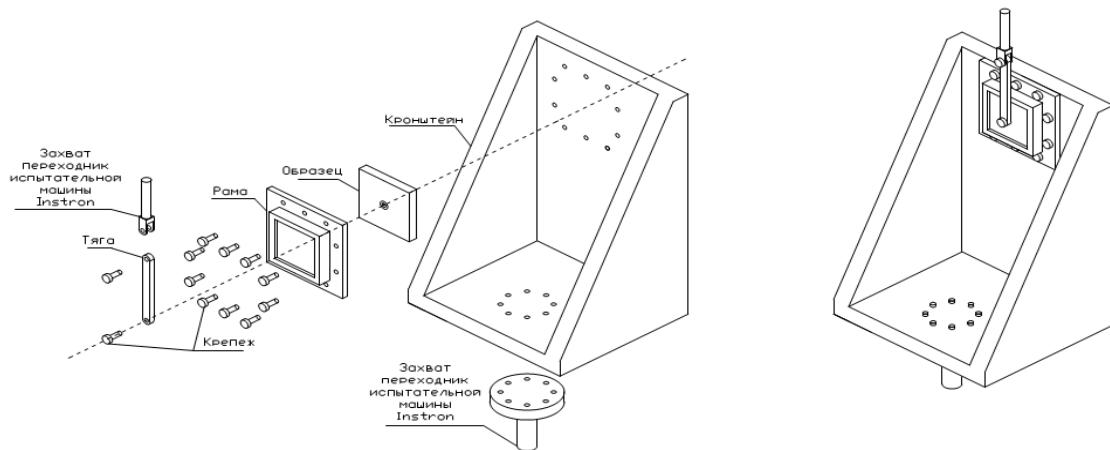


Рис. 9. Схема испытаний образцов на сдвиг

Таблица 2

Сравнение результатов эксперимента и расчета образцов высотой 30 мм с алюминиевыми обшивками толщиной 0,3 мм и сотовым заполнителем 5056-2,5-23П

Параметр	Образец 1	Образец 2	Образец 3
Диаметр закладного элемента	8,5	20	30
Вид испытаний	Растяжение		
$F_{n(\text{растяжение})}$, Н	863–1021	2550–2750	3629–3924
$F_{n(\text{растяжение})}$, Н	932	2559	3672
max Δ , %	9,5	7,5	6,9
Сдвиг			
Вид испытаний			
$F_{n(\text{сдвиг})}$, Н	1032–1210	3360–3640	5180–5327
$F_{n(\text{сдвиг})}$, Н	1125	3496	5244
max Δ , %	8,3	4,1	1,6

Таблица 3

**Сравнение результатов эксперимента и расчета образцов высотой 30 мм
с алюминиевыми обшивками толщиной 0,5 мм и сотовым заполнителем 5056-2,5-23П**

Параметр	Образец 4	Образец 5	Образец 6
Диаметр закладного элемента	8,5	20	30
Вид испытаний	Растяжение		
$F_{n(\text{растяжение})}$, Н	1070–1190	3250–3500	4702–5111
$F_{n(\text{двигательное})}$, Н	1106	3416	4902
max Δ, %	7,6	4,9	4,3
Вид испытаний	Сдвиг		
$F_{n(\text{двигательное})}$, Н	1295–1452	5541–5855	8530–8821
$F_{n(\text{двигательное})}$, Н	1383	5776	8664
max Δ, %	6,4	4,1	1,8

Таблица 4

**Сравнение результатов эксперимента и расчета образцов высотой 30 мм
с алюминиевыми обшивками толщиной 0,3 мм и сотовым заполнителем АМг2-Н-2,5-40П**

Параметр	Образец 7	Образец 8	Образец 9
Диаметр закладного элемента	8,5	20	30
Вид испытаний	Растяжение		
$F_{n(\text{растяжение})}$, Н	1121–1200	3332–3407	4628–4806
$F_{n(\text{двигательное})}$, Н	1093	3290	4720
max Δ, %	9,8	4,1	1,6
Вид испытаний	Сдвиг		
$F_{n(\text{двигательное})}$, Н	1244–1303	4700–4921	6693–6925
$F_{n(\text{двигательное})}$, Н	1216	4720	6840
max Δ, %	7,2	4,3	2,1

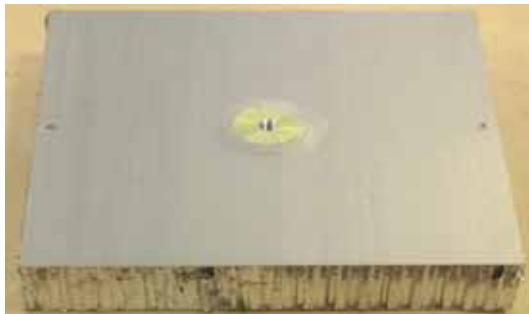
Таблица 5

**Сравнение результатов эксперимента и расчета образцов высотой 40 мм
с обшивками из углеродной ленты Кулон 500/0,07 и сотовым заполнителем 5056-2,5-23П**

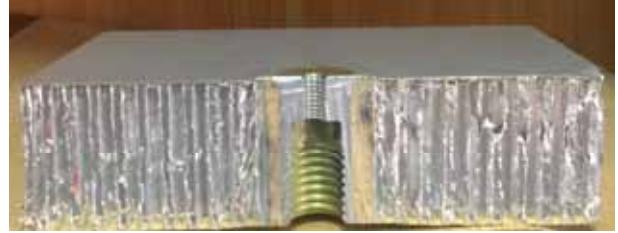
Параметр	Образец 10	Образец 11	Образец 12
Диаметр закладного элемента	8,5	20	30
Вид испытаний	Растяжение		
$F_{n(\text{растяжение})}$, Н	1779–1910	4280–4592	5037–5581
$F_{n(\text{двигательное})}$, Н	1742	4181	5578
max Δ, %	9,6	9,8	9,7
Вид испытаний	Сдвиг		
$F_{n(\text{двигательное})}$, Н	1133–1191	2366–2644	3451–3962
$F_{n(\text{двигательное})}$, Н	1239	2550	3825
max Δ, %	8,6	7,2	9,8

**Сравнение результатов эксперимента и расчета образцов высотой 40 мм
с обшивками из ткани 3198 и сотовым заполнителем 5056-2,5-23П**

Параметр	Образец 13	Образец 14	Образец 15
Диаметр закладного элемента	8,5	20	30
Вид испытаний	Растяжение		
$F_{n(\text{растяжения})}$, Н	1880–2105	6135–6333	8613–8911
$F_{n(\text{двигательной})}$, Н	1932	6202	8846
max Δ , %	9,0	2,1	2,6
Вид испытаний	Сдвиг		
$F_{n(\text{двигательной})}$, Н	1493–1654	3465–3971	5399–5601
$F_{n(\text{двигательной})}$, Н	1578	3712	5568
max Δ , %	5,4	7,0	3,0



a



б

Рис. 10. Образец: а – общий вид образца; б – разрез образца

При нормальном законе распределения экспериментальные данные в указанной системе координат должны укладываться на прямую линию с угловым коэффициентом. Возможна также аналитическая проверка соответствия полученного распределения экспериментальных данных нормальному закону [13; 14].

При обработке экспериментальных данных сначала определяется среднее значение исследуемой величины

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

и среднеквадратичное отклонение (или среднеквадратичная ошибка):

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

где n – принятое для данного исследования число образцов.

Для относительной оценки рассеивания экспериментальных данных применяют коэффициент вариации:

$$\omega = \frac{S_n}{\bar{x}} \cdot 100 \, \%$$

Указание одного лишь численного значения среднеквадратичного отклонения или коэффициента вариации недостаточно, так как в этом случае остается степень надежности результатов эксперимента. Если x – истинное значение измеряемой величины, \bar{x} –

ее среднее значение, полученное в результате измерений, и погрешность измерения этой величины Δx , то вероятность того, что результат измерений отличается от истинного значения на величину, не превышающую Δx , записывают в виде [13]

$$P(\bar{x} - \Delta x \ll x \ll \bar{x} + \Delta x) = \alpha.$$

Вероятность α есть доверительная вероятность, или коэффициент надежности. Интервал значений от $\bar{x} - \Delta x$ до $\bar{x} + \Delta x$ называется доверительным интервалом. Следовательно, для полной характеристики величины случайной ошибки необходимо задать величину самой ошибки и величину доверительной вероятности. При обычных измерениях можно ограничиться доверительной вероятностью 0,9 или 0,95, но иногда можно задавать доверительную вероятность равной 0,999. Доверительный интервал записывается в следующем виде [13–15]:

$$\bar{x} - t_{\alpha,n} \frac{S_n}{\sqrt{n}} \ll x \ll \bar{x} + t_{\alpha,n} \frac{S_n}{\sqrt{n}}.$$

Значение коэффициента Стьюдента $t_{\alpha,n}$ для трех измерений равно 5,84.

Результаты статистической обработки экспериментальных данных представлены в табл. 7.

Сравнение результатов расчета с экспериментальными значениями для всех образцов представлены на рис. 11–15 (результаты представлены с учетом доверительных интервалов, представленных в табл. 7).

Таблица 7

Результаты статистической обработки экспериментальных данных

Обозначение	Диаметр закладного элемента	Среднее значение несущей способности, Н		Среднеквадратичное отклонение, Н		Коэффициент вариации, %		Доверительный интервал
		Растяжение	Сдвиг	Растяжение	Сдвиг	Растяжение	Сдвиг	
Высота 30 мм, обшивки из алюминиевого сплава В95, толщина обшивки 0,3 мм, сотовый заполнитель 5056-2,5-23П								
Образец 1	8,5	946	1141	96	111	10	10	624–1268
Образец 2	20	2657	3517	121	169	5	5	2250–3064
Образец 3	30	3792	5236	178	106	5	2	3192–4392
Высота 30 мм, обшивки из алюминиевого сплава В95, толщина обшивки 0,5 мм, сотовый заполнитель 5056-2,5-23П								
Образец 4	8,5	1128	1349	75	120	7	9	876–1379
Образец 5	20	3347	5672	177	212	4	4	2749–3944
Образец 6	30	4933	8707	247	181	2	2	4099–5769
Высота 30 мм, обшивки из алюминиевого сплава В95, толщина обшивки 0,3 мм, сотовый заполнитель АМг2-Н-2,5-40П								
Образец 7	8,5	1164	1275	48	36	4	3	1003–1324
Образец 8	20	3378	4820	47	133	1	3	3220–3536
Образец 9	30	4719	6774	108	176	2	3	4353–5084
Высота 40 мм, обшивки из Кулонна 500/0,07, толщина обшивки 0,3 мм, сотовый заполнитель 5056-2,5-23П								
Образец 10	8,5	1856	1158	80	38	4	3	1586–2127
Образец 11	20	4391	2487	234	182	5	7	3601–5181
Образец 12	30	5253	3685	379	291	7	8	3979–6530
Высота 40 мм, обшивки из ткани 3198, толщина обшивки 0,64 мм, сотовый заполнитель 5056-2,5-23П								
Образец 13	8,5	1968	1564	158	105	8	7	1436–2501
Образец 14	20	6220	3662	131	357	2	10	5778–6662
Образец 15	30	8763	5501	182	123	2	2	8149–9377

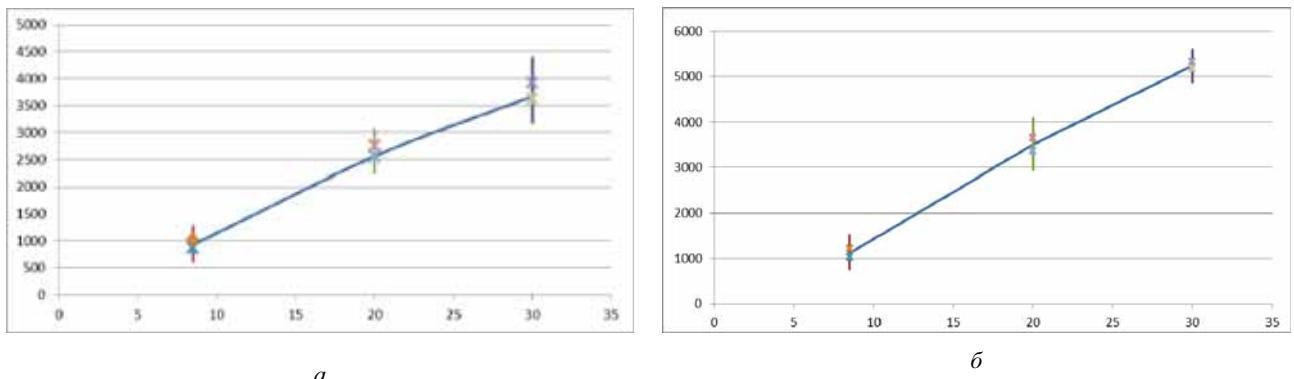


Рис. 11. Сравнение результатов расчета и испытаний для образцов высотой 30 мм с обшивками из В95 (толщина обшивки 0,3 мм) и сотовым заполнителем 5056-2,5-23П: а – растяжение; б – сдвиг

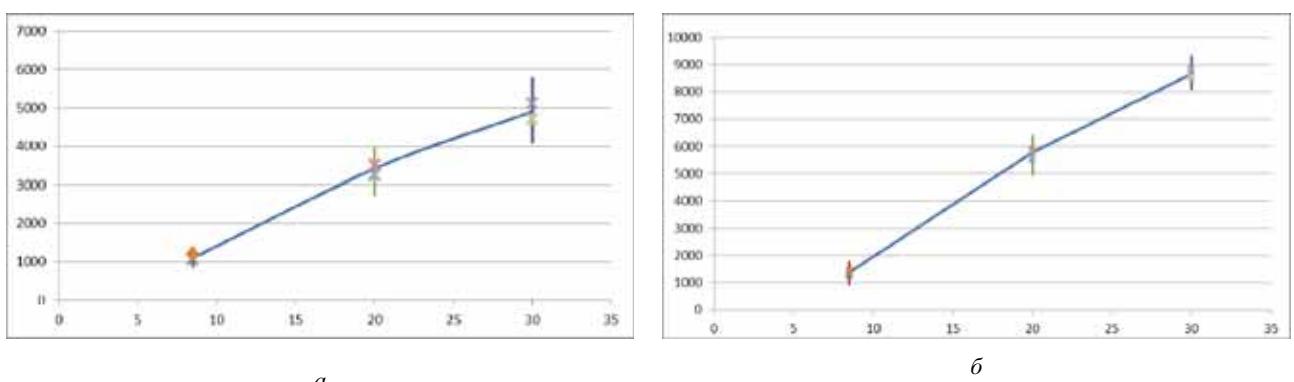


Рис. 12. Сравнение результатов расчета и испытаний для образцов высотой 30 мм с обшивками из В95 (толщина обшивки 0,5 мм) и сотовым заполнителем 5056-2,5-23П: а – растяжение; б – сдвиг

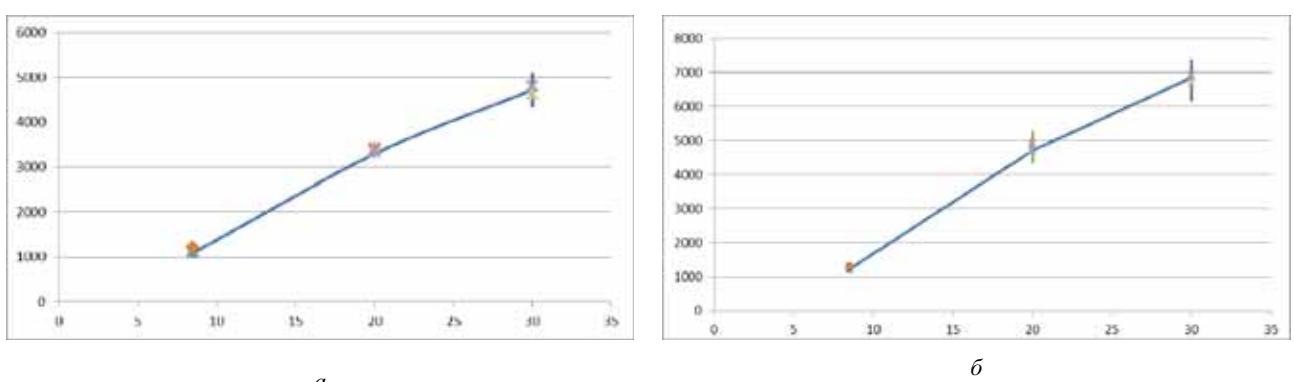


Рис. 13. Сравнение результатов расчета и испытаний для образцов высотой 30 мм с обшивками из В95 (толщина обшивки 0,5 мм) и сотовым заполнителем АМг2-Н-2,5-40П: а – растяжение; б – сдвиг

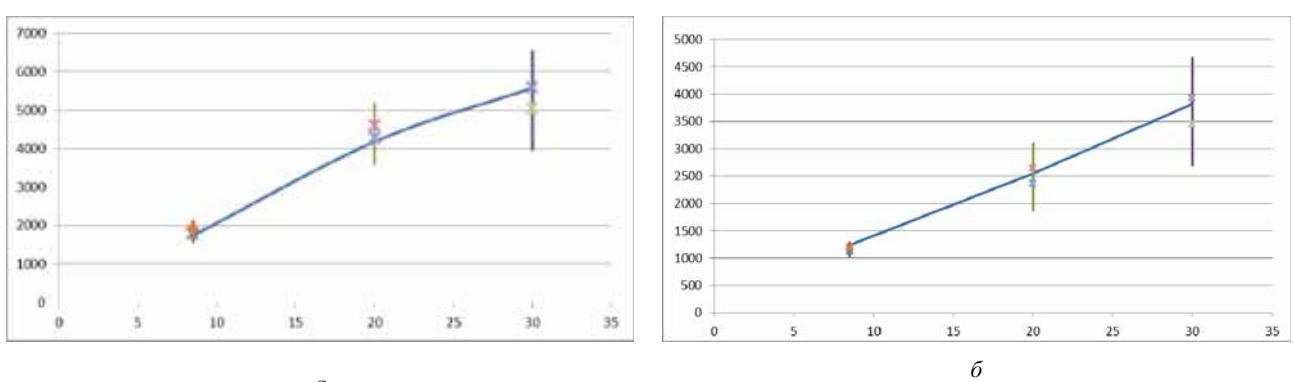


Рис. 14. Сравнение результатов расчета и испытаний для образцов высотой 40 мм с обшивками из Кулона 500/0,07 (толщина обшивки 0,3 мм) и сотовым заполнителем 5056-2,5-23П: а – растяжение; б – сдвиг

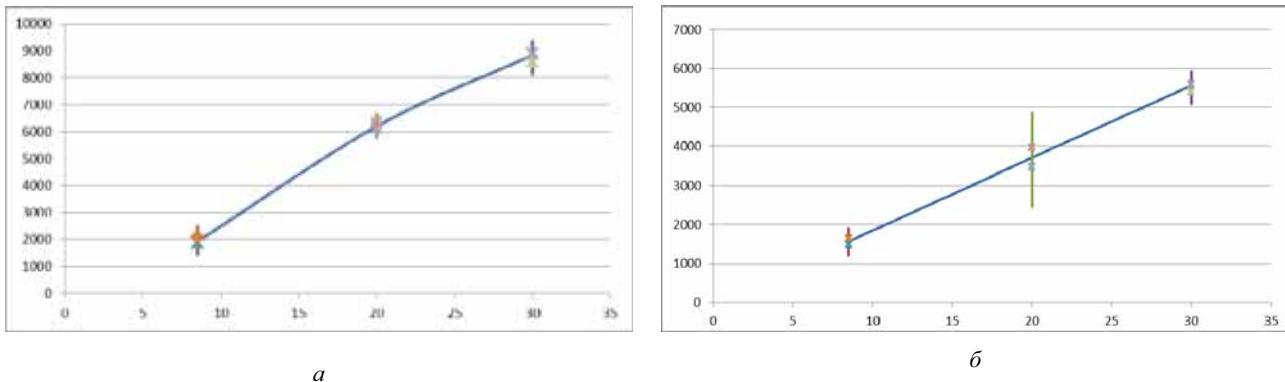


Рис. 15. Сравнение результатов расчета и испытаний для образцов высотой 40 мм с обшивками из ткани 3198 (толщина обшивки 0,64 мм) и сотовым заполнителем 5056-2,5-23П: а – растяжение; б – сдвиг

Из графиков, представленных на рис. 11–15, видно, что значения несущей способности, полученные экспериментальным путем, лежат в доверительных интервалах относительно расчетного значения для всех видов закладных элементов.

Заключение. В результате проведенных исследований подтверждена правильность выбранного подхода к расчету несущей способности трехслойной сотовой конструкции с закладными элементами различных видов. Определены зависимости несущей способности от сотового заполнителя и толщины несущих слоев обшивок. Проведено качественное сравнение результатов эксперимента с расчетными значениями.

Данные, полученные в результате работы, применяются при проектировании и изготовлении космических аппаратов различных классов.

Проведено исследование проблемы, не освещенной в российской и зарубежной литературе.

Библиографические ссылки

1. Панин В. Ф., Гладков Ю. А. Конструкции с заполнителем. М. : Машиностроение, 1991. С. 8–13.
2. Achilles Petras Design of Sandwich Structures : dissertation, Doctor of Philosophy / Cambridge University Engineering Department. 1998. Р. 5–7.
3. Применение терmostатированных сотовых конструкций в перспективных космических аппаратах и антенных системах / Г. Д. Кесельман [и др.] / Конструкции из композиционных материалов : межотрасл. науч.-техн. журнал. 2005. № 3. С. 10–13.
4. Расчет на прочность трехслойной конструкции и закладных элементов / Г. Д. Кесельман [и др.] / Конструкции из композиционных материалов : межотрасл. науч.-техн. журнал. 2006. № 1. С. 6–15.
5. Ендогур А. И., Вайнберг М. В., Иерусалимский К. М. Сотовые конструкции: Выбор параметров проектирования. М. : Машиностроение, 1986. С. 8–9.
6. Определение рациональных форм сотового заполнителя для трехслойной балки при действии статической нагрузки / О. М. Устарханов [и др.] [Электронный ресурс] / Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. 2014. № 12. URL: <http://www.cyberleninka.ru/article.html> (дата обращения: 11.04.2015).

7. Панин В. Ф. Конструкции с сотовым заполнителем. М. : Машиностроение, 1982. С. 22–25.

8. Абивов А. Л. Композиционные материалы в конструкции летательных аппаратов. М. : Машиностроение, 1975. С. 272.

9. Чамис К. Композиционные материалы. Анализ и проектирование конструкций. М. : Машиностроение, 1978. С. 64–69.

10. Ендогур А. И. Проектирование авиационных конструкций. Проектирование конструкций деталей и узлов. М. : МАИ-ПРИНТ, 2009. С. 334–337.

11. Bianchi G., Aglietti G. S., Richardson G. Static performance of hot bonded and cold insert in honeycomb panels // Journal of sandwich structures and materials. 2011. P. 59–65. Doi: 1177/1099636209359840.

12. Novatest [Электронный ресурс]. URL: <http://www.novatest.ru/equipment.html> (дата обращения: 30.06.2015).

13. Кинцис Т. Я., Розе А. В., Жигун И. Г. Методы статических испытаний армированных пластиков : справ. пособие. Рига : ЗИНАТНЕ, 1972. С. 80–84.

14. Зайдель А. Н. Элементарные оценки ошибок измерений. Л. : Наука, 1968. С. 8–12.

15. Кассандрова О. Н., Лебедев В. В. Обработка результатов измерений. М. : Наука, 1970. С. 12–17.

References

1. Panin V. F., Gladkov Yu. A. *Konstruktsii s zapolnitel'cem* [Designs with filler]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991, P. 8–13 (In Russ.).
2. Achilles Petras Design of Sandwich Structures: dissertation, Doctor of Philosophy: Cambridge University Engineering Department. 1998, P. 5–7.
3. Kesel'man G. D., Danilov E. N., Nagovitsin V. N., Patraev E. V., Gryaznov V. N. [Using of thermostatically controlled honeycomb structures in perspective spacecrafts and antenna systems]. *Mezhotraslevoy nauchno-tehnicheskiy zhurnal Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov*. 2005, No. 3, P. 10–13 (In Russ.).
4. Kesel'man G. D., Zimin I. I., Danilov E. N., Nagovitsin V. N., Patraev E. V., Gryaznov V. N. [Calculation on strength of three-layered design and fitted elements]. *Mezhotraslevoy nauchno-tehnicheskiy zhurnal Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov*. 2006, No. 1, P. 6–15 (In Russ.).

5. Endogur A. I., Vaynberg M. V., Ierusalimskiy K. M. *Sotovye konstruktsii: Vybor parametrov proektirovaniya* [Honeycomb structures: The choice of design parameters]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986, P. 8–9 (In Russ.).
6. Ustarkhanov O. M., Muselemov Kh. M., Kiayyov U. A., Ustarkhanov T. O. [Definition of rational form honeycomb core for sandwich beams under static loading]. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy i puti ikh resheniya* (In Russ.). Available at: <http://www.cyberleninka.ru/article.html> (accessed 11.04.2015).
7. Panin V. F. *Konstruktsii s sotovym zapolnitelem* [Honeycomb constructions]. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1982, P. 22–25 (In Russ.).
8. Abibov A. L. *Kompozitsionnye materialy v konstruktsii letatel'nykh apparatov* [Composite materials in the construction of aircraft]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, P. 272 (In Russ.).
9. Chamis C. C. *Kompozitsionnye materialy* [Composite materials. Structural design and analysis]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, P. 64–69 (In Russ.).
10. Endogur A. I. *Proektirovanie aviationsionnykh konstruktsiy. Proektirovanie konstruktsiy detaley i uzlov* [Design of aircraft structures. Structural design of parts and assemblies]. Moscow, MAI-PRINT Publ., 2009, P. 334–337 (In Russ.).
11. Bianchi G., Aglietti G. S., Richardson G. Static performance of hot bonded and cold insert in honeycomb panels. *Journal of sandwich structures and materials*, 2011, P. 59–65, doi: 1177/1099636209359840.
12. Novatest. Available at: <http://www.http://novatest.ru/equipment.html> (accessed 30.06.2015).
13. Kintsis T. Ya., Roze A. V., Zhigun I. G. *Spravochnoe posobie. Metody staticheskikh ispytаний armirovannykh plastikov* [Reference guide. Methods of static testing of the reinforced plastics]. Riga, ZINATNE Publ., 1972, P. 80–84 (In Russ.).
14. Zaydel A. N. *Elementarnye otsenki oshibok izmereniy* [Elementary estimates of measurement errors]. Leningrad, Nauka Publ., 1968, P. 8–12 (In Russ.).
15. Kassandraova O. N., Lebedev V. V. *Obrabotka rezul'tatov izmereniy* [Processing of measurement results]. Moscow, Nauka Publ., 1970, P. 12–17 (In Russ.).

© Тестоедов Н. А., Наговицин В. Н.,
Пермяков М. Ю., 2016

УДК 621.7+621.9

Вестник СибГАУ
Том 17, № 1. С. 212–216

СКРАЙБИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН ПРОВОЛОЧНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ-ИНСТРУМЕНТОМ

И. Я. Шестаков*, Л. А. Семенова

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

В современной микроэлектронике полупроводники являются основными материалами в автоматизированных вычислительных и информационных системах управления ракет и космических аппаратов. Для получения интегральных микросхем и применения в приборах полупроводниковые пластины разделяют на кристаллы. Способы разделения полупроводниковых пластин на кристаллы – это скрайбирование алмазным резцом, лазерным лучом, алмазным диском, режущим полотном и проволокой. Использование алмазного инструмента и лазерного луча загрязняет поверхность кристаллов пылевидными образованиями, при нанесении рисок образуются области с большим количеством микротрещин, сколов и других дефектов. Кроме того, на поверхность кристалла попадают капли и пары материала полупроводника. Для устранения указанных недостатков предлагается модель взаимодействия вибрирующего проволочного электрода-инструмента с поверхностью детали полупроводника, при которой гибкий инструмент принимает форму синусоиды, перемещающейся вдоль поверхности полупроводника. Движущаяся точка контакта создаёт электрический разряд. Вдоль линии движения образуется зона повышенного механического напряжения, по которой затем происходит разделение полупроводниковой пластины. Время контакта электродов зависит от скорости движения волны и её формы.

Правильность выбранной модели подтверждается экспериментальными данными, где в качестве электрода-инструмента применялась медная проволока. Для возбуждения колебаний проволоки использовался вибратор с частотой переменного тока. Изменение тока и напряжения процесса обработки регистрировалось осциллографом, определялись время контакта и длина бегущей волны. Экспериментальные и теоретические данные показали хорошее совпадение.

Скрайбирование полупроводниковых пластин проволочным электродом-инструментом позволит уменьшить количество выбраковываемых кристаллов.

Ключевые слова: скрайбирование полупроводниковых пластин, проволочный электрод-инструмент, колебания проволоки, эрозионное разрушение материала.

Vestnik SibGAU
Vol. 17, No. 1, P. 212–216

SCRIBING OF SEMICONDUCTOR WAFERS BY WIRE ELECTRODE-TOOL

I. Ya. Shestakov*, L. A. Semenova

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

In modern microelectronics semiconductors there are key materials in automated computing information and control systems, missiles and spacecraft. To obtain integrated circuits and application in devices the semiconductor wafer is separated into the crystals. Methods of separation of the semiconductor wafer on the crystals is scribing with a diamond cutter, laser light, diamond disc, cutting blade and wire. The use of diamond tools and laser beam contaminates the surface of the pulverized crystals formations, when applied marks formed region with a large number of microcracks, fractures and other defects; in addition to the surface of the crystal drops and pairs of semiconductor material. To remedy these shortcomings of the proposed model of the interaction of the vibrating wire electrode-tool with a surface of a semiconductor in which a flexible tool the form of a sine wave moving along the surface of the semiconductor is taken. Moving the point of contact creates an electrical discharge. Along the line of motion, an area of high mechanical stress, which then occurs the separation of the semiconductor wafer, is formed. The time of contact of the electrodes depends on the speed of wave motion and its form.

The correctness of the chosen model is confirmed by experimental data, where as the electrode was applied to copper wire. For the excitation of oscillations of the wire used a vibrator with a frequency of the alternating current.

The change of current and voltage in the machining process was recorded by the oscilloscope, determine the time of contact and the length of the traveling wave. Experimental and theoretical data showed good agreement.

Wafer scribing wire electrode-tool will reduce the number of discarded crystals.

Keywords: *scribing semiconductor wafers, the wire electrode-tool, the vibrations of the wire, erosive destruction of the material.*

Введение. В современной микроэлектронике полупроводники являются основными материалами и нашли широкое применение в автоматизированных вычислительных и информационных системах управления ракет, ракет-носителей и космических аппаратов. Для получения интегральных микросхем и применения в приборах полупроводниковые пластины разделяют на кристаллы, форма которых может быть круглой, квадратной, прямоугольной и овальной. Наиболее широко используются кристаллы квадратной и прямоугольной формы.

В настоящее время нашли применение следующие способы разделения полупроводниковых пластин на кристаллы: скрайбирование алмазным резцом, лазерным лучом, алмазным диском, режущим полотном, резка проволокой [1–10]. Основным достоинством метода скрайбирования является малая ширина прорези, а следовательно, и отсутствие потерь полупроводникового материала, которых невозможно избежать при использовании других методов разделения пластины на кристаллы. Наиболее широко скрайбирование используют в планарной технологии изготовления интегральных микросхем, когда на пластине уже сформированы полупроводниковые структуры. Недостатками использования алмазного инструмента и лазерного луча являются загрязненность поверхности кристаллов пылевидными образованиями, от нанесенных рисок образуются нарушенные области с большим количеством микротрещин, сколов и других дефектов (приводит к браку готовых кристаллов), попадание капель и паров материала полупроводника на поверхность кристалла, а также сложность оборудования для скрайбирования полупроводниковых пластин [11–13].

Поэтому разработка новых способов скрайбирования без указанных недостатков является актуальной задачей.

Предлагаемый метод обработки поверхности полупроводниковой пластины. Избавиться от загрязненности при скрайбировании можно обработкой поверхности полупроводников вибрирующим проволочным электродом-инструментом. Наложение колебаний на проволоку создает бегущую волну деформации вдоль проволоки. Таким образом, инструмент принимает форму синусоиды, перемещающейся вдоль поверхности полупроводника. При периодическом обрыве электрического контакта между проволокой и поверхностью полупроводника происходит электрический разряд, что приводит к эрозионному разрушению материала. Эти точки контакта (точки эрозии) движутся по поверхности детали вдоль одной линии. Скорость их движения равна скорости распространения волны. С течением времени вдоль линии образуется зона повышенного механического напряжения, по которой происходит разделение полупро-

водниковой пластины. Время контакта электродов зависит от скорости движения волны и её формы, что влияет на длительность импульса тока при обработке вибрирующим электродом-инструментом. Определить скорость движения точек контакта инструмента и детали, а также число точек контакта, одновременно бегущих вдоль линии реза, форму волны и её фазу можно, построив модель колебания проволоки и модель процесса движения изгибных волн вдоль неё.

Для определения волнового движения гибкой нити воспользуемся геометрическим заданием волны (т. е. заданием формы контура волны и скорости её движения) и законом сохранения массы. В механике гибкой нитью называют материальную линию, обладающую массой, а следовательно, и некоторой собственной линейной плотностью ρ_0 [кг/м]. Для однородной нити $\rho_0 = \text{const}$. Примем, что гибкая нить обладает постоянной линейной плотностью ρ , и масса отрезка нити длиной l равна $m = \rho l$. Скорость v бегущей вдоль струны волны согласно [14] определим по выражению

$$v = \sqrt{\frac{T_0}{\rho F}}, \quad (1)$$

где T_0 – сила натяжения струны; F – площадь поперечного сечения струны.

Таким образом, волны распространяются вдоль абсолютно гибкого тела при условии наличия силы натяжения нити. Скорость их распространения будет определяться лишь величиной силы натяжения T_0 (при заданных значениях ρ и F нити). Если нить обладает какой-либо жёсткостью на изгиб, то распространение волн вдоль неё будет обусловливаться напряжениями, возникающими при изгибной деформации. Следовательно, в этом случае усилие натяжения может быть равным нулю.

Требования к выбору материала электродо-инструмента. Для электродов-инструментов необходимо выбирать сплавы, обладающие коррозионной стойкостью, высокой электропроводностью, хорошей сопротивляемостью местному разрушению при коротких замыканиях, высокой адгезией к диэлектрическим покрытиям, достаточной механической прочностью и обрабатываемостью, низкой стоимостью. Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют медь, медные сплавы и нержавеющие стали [15].

В экспериментах в качестве инструмента предполагается применение медной проволоки. Она обладает некоторыми упругими свойствами, и напряжения деформации будут влиять на скорость распространения волн.

Определение длины бегущей волны. Определённая выше скорость v – это, по сути, скорость распространения поперечного импульса вдоль струны. Согласно [14], при колебании струны и принятых выше допущениях скорость распространения импульса v

равна скорости распространения волны (фазовой скорости). Кроме определения скорости движения точки контакта необходимо определить, сколько таких точек будет перемещаться одновременно вдоль поверхности пластины. Анализ процесса скрайбирования таким способом показал, что достаточно, чтобы вдоль поверхности последовательно перемещалось хотя бы по одной точке контакта (рис. 1).

Вследствие контакта электродов в точке *a* сила тока на участке проволоки *l*₂ гораздо ниже, чем на участке *l*₁, поэтому сила тока разряда в точке *b* очень незначительна, и эффект эрозии в этой точке также незначителен. Таким образом, при показанном на рис. 1 подводе тока к электродам обработку «ведёт» только точка *a*. Сместившись вправо до бывшего положения точки *b*, возникает следующая точка контакта, лежащая слева от точки *a* на расстоянии длины волны λ . То есть происходит смена «рабочей точки». Из этого следует, что длина реза *L* определяется длиной волны λ . Определив длину волны, можно определить максимальную длину скрайбируемой пластины ($L \leq \lambda$). Следует отметить, что это верно лишь при подводе электрода с одного конца проволоки. Если подвод тока осуществляется с двух концов проволоки, то длина волны λ не определяет длину реза *L*.

Определить длину волны можно, построив модель колебаний струны. Уравнение поперечных колебаний натянутой струны имеет вид [16]

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0, \quad a = \sqrt{T_0/m_0}, \quad (2)$$

где *u* – смещение точки струны в направлении, перпендикулярном оси *OX*; *m*₀ – масса единицы длины струны.

Уравнение (2) есть уравнение стоячей волны. Возникновение стоячих волн обусловлено сложением

бегущих прямых и отраженных волн. Отражение происходит от точки закрепления струны. В этом случае не происходит движение «холмов» и «впадин» вдоль поверхности, что не удовлетворяет требуемым условиям проведения процесса скрайбирования. Согласно [14], это происходит, если волны, бегущие вдоль струны, дойдя до точки закрепления второго конца, не успевают затухнуть. Они, отражаясь от препятствия, искажают картину распространения волн.

Если на длине струны укладывается очень большое количество волн, то бегущая волна успеет полностью затухнуть, и второй конец струны не будет играть существенной роли. Таким образом, результаты, полученные для бесконечно длинной струны, не обладающей затуханием, применимы к тем случаям, когда затухание бегущих волн на расстоянии одной длины волны очень мало, но на всей длине струны укладывается большое число волн. Для того, чтобы вдоль натянутой струны бежали волны, необходимо создать определённые условия:

- 1) длина проволоки *l* должна содержать большое число волн длиной λ , что создаёт условия затухания волн на закреплённом конце проволоки;
- 2) затухание волн на расстоянии одной длины волны должно быть пренебрежительно малым.

Описание эксперимента. Для экспериментов использовалась медная проволока диаметром *d* = 0,35 мм, длиной *l* = 1,5 м. Время контакта с поверхностью одной точки, если длина и ширина контакта *dx* (рис. 2), определим по выражению

$$\tau = \frac{d}{v} = \frac{d}{\left(\frac{T_0}{\rho F}\right)^{1/2}}.$$

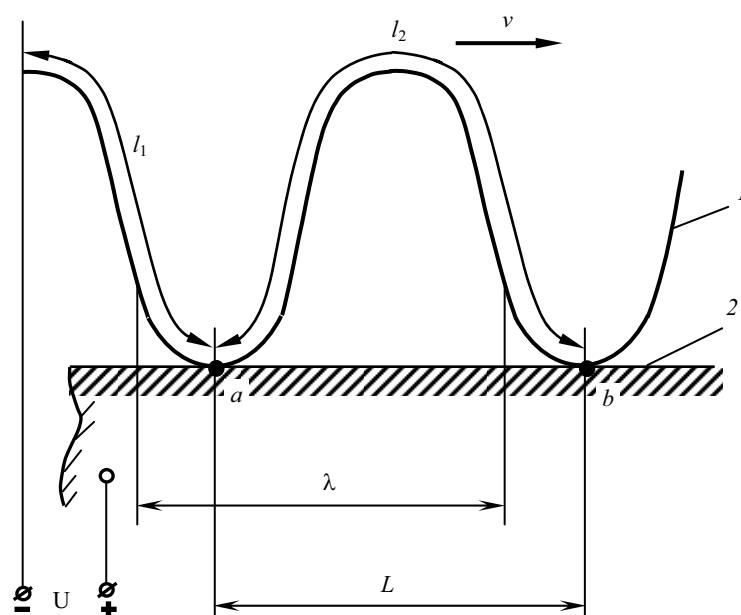


Рис. 1. Схема процесса движения точки контакта вдоль электрода–детали: 1 – электрод-проводника; 2 – деталь; *a*, *b* – точки контакта; *L* – длина линии реза; λ – длина волны

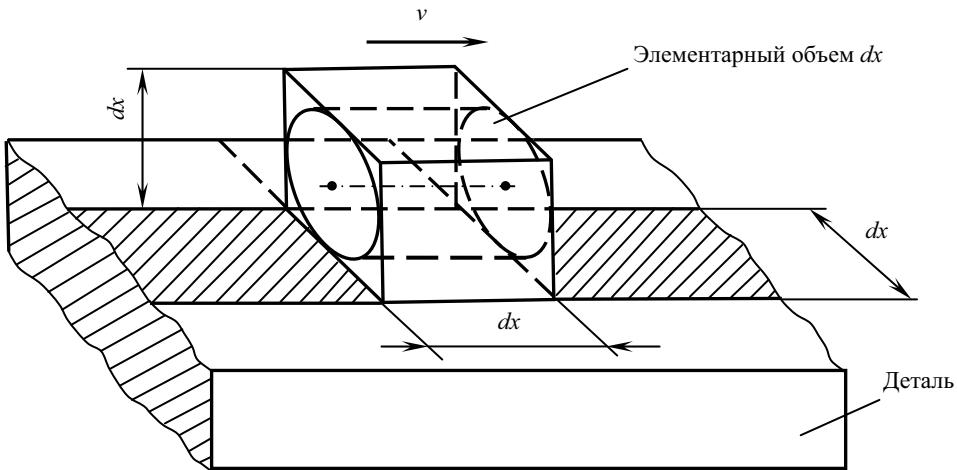


Рис. 2. Схема контакта элементарного объема dx материала инструмента и детали

Измеренное значение длины волны $\lambda_3 = 0,15$ м при натяжении $T_0 = 0,11$ Н. Скорость движения волны найдем по выражению

$$v_3 = \lambda_3 / T,$$

где T – период колебаний проволоки.

Для возбуждения колебаний проволоки использовался вибратор, работающий на частоте тока $f = 50$ Гц, период колебаний равен $T = 1/f = 1/50 = 0,02$ с. Тогда экспериментальная скорость движения волн

$$v_3 = 0,15 / 0,02 = 7,5 \text{ м/с.}$$

Скорость бегущей волны определим из выражения (1):

$$v = \sqrt{\frac{0,11}{8930 \cdot \pi \cdot (0,1 \cdot 10^{-3})^2}} = 11,3 \text{ м/с.}$$

Во время опытов вибрирующий проволочный электрод соприкасался с торцевой поверхностью детали в виде пластины. Светолучевым осциллографом регистрировалось изменение тока и напряжения процесса обработки. Значение времени контакта проволоки и пластины из осциллограммы $\tau_3 = 0,28 \cdot 10^{-5}$ с.

Теоретическое значение времени контакта определяется по выражению

$$\tau = d / v.$$

Так как точка контакта движется вдоль торцевой поверхности пластины (толщина пластины $h = 0,1$ мм), то

$$\tau_y = \frac{h}{v} = \frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{11,3} = 0,8 \cdot 10^{-5} \text{ с.}$$

Заключение. Эксперименты подтвердили правильность выбранной модели взаимодействия вибрирующей проволоки с поверхностью детали. Движущаяся точка контакта создаёт электрический разряд, который приводит к эрозионному разрушению материала детали.

Предложенный способ эрозионного разрушения материала полупроводниковых пластин позволит уменьшить количество выбраковываемых кристаллов

и тем самым удешевить процесс получения полупроводниковых приборов.

Библиографические ссылки

- Новокрещенова Е. П. Введение в микроэлектронику : учеб. пособие. Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. техн. ун-та, 2012. 106 с.
- Наумов А. С. Разработка технологии лазерного разделения приборных пластин на кристаллы : дис. ... канд. техн. наук. М., 2007. 162 с.
- Patent 20120115307 US A1. Methods of manufacturing semiconductor chips / Sang Wook Park, Tae Gyeong Chung, Ho Geon Song, Won Chul Lim. № US 13/253,425 ; заявл. 05.10.2011, опубл. 10.05.2012.
- Пат. 2385218 Российская Федерация, МПК В 26 F 3/00, Н 01 L 21/00. Способ разделения на кристаллы полупроводниковых пластин с двухсторонним тонкопленочным покрытием / Жуков Ю. Н. № 2008148359/02 ; заявл. 08.12.2008, опубл. 27.03.2010.
- Пат. 2047933 Российской Федерации, МПК⁶ Н 01 L 21/68, Н 01 L 21/78. Устройство для закрепления изделий, преимущественно полупроводниковых пластин, в установках для разделения их на кристаллы / Абрамов В. Н., Николаев Ю. Л. № 5005114/10 ; заявл. 11.09.1991, опубл. 10.11.1995.
- Пат. 1827696 Российской Федерации, МПК⁵ Н 01 L 21/78. Способ разделения полупроводниковых пластин на кристаллы / Шлыков В. Д., Приходько П. С., Волкова Р. Я. № 4928500 ; заявл. 18.04.91 ; опубл. 15.07.93, Бюл. № 26 (71). 4 с.
- Готра З. Ю. Технология микроэлектронных устройств : справочник. М. : Радио и связь, 1991. 528 с.
- Артomonov B. A., Volkov Yu. S. Анализ моделей процессов электрохимической и электроэррозионной обработки. Ч. 2. Модели процессов электроэррозионной обработки. Проволочная вырезка. М. : ВНИИПИ, 1991. 144 с.
- Курносов А. Ю., Юдин В. В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем : учеб. пособие для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Высш. шк., 1986. 368 с.

10. Пичугин И. Г., Таиров Ю. М. Технология полупроводниковых приборов : учеб. пособие для вузов. М. : Высш. шк., 1984. 288 с.
11. Лопухин В. А., Шелест Д. К. Системы технологий компьютерного производства. Технология интегральных микросхем : учеб. пособие. СПб. : СПбГУАП, 2000. 124 с.
12. Никифорова-Денисова С. Н. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники : учеб. пособие для ПТУ. В 10 кн. Кн. 4. Механическая и химическая обработка. М. : Высш. шк., 1989. 95 с.
13. Swati D. L., Manik K. R., Sunil B. S. Multi-response optimization of Wire-EDM process using principal component analysis // IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN). 2012. Vol. 2 (8). P. 38–47.
14. Хайкин С. Э. Физические основы механики : учеб. пособие. М. : Наука, 1971. 752 с.
15. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов : учеб. пособие / Б. А. Артамонов [и др.]. В 2-х т. Т. 1. Обработка материалов с применением инструмента / под ред. В. П. Смоленцева. М. : Высш. шк., 1983. 247 с.
16. Бидерман, В. Л. Теория механических колебаний : учебник для вузов. М. : Высш. шк., 1980. 408 с.

References

1. Novokreshchenova E. P. *Vvedenie v mikroelektroniku* [Introduction to microelectronics]. Voronezh St. Techn. Univ Publ., 2012, 106 p.
2. Naumov A. S. *Razrabotka tekhnologii lazernogo razdeleniya pribornykh plastin na kristally*. Dis. kand. tehn. nauk [Development of technology for laser separation instrument wafers on crystals. Cand. techn. sci. diss]. Moscow, 2007, 162 p.
3. Sang Wook Park, Tae Gyeong Chung, Ho Geon Song, Won Chul Lim. *Methods of manufacturing semiconductor chips*. Patent US 20120115307 A1, 2012.
4. Zhukov Yu. N. *Sposob razdeleniya na kristally poluprovodnikovykh plastin s dvukhstoronnim tonkopolnochnym pokrytiem* [Method of separation of crystals of semiconductor wafers with double-sided thin-film coating]. Patent RF, no. 2385218, 2010.
5. Abrarov V. N., Nikolaev Yu. L. *Ustroistvo dlya zakrepleniya izdelii, preimushchestvenno poluprovodnikovykh plastin, v ustanovkakh dlya razdeleniya ikh na kristally* [Device for fastening products, mainly semiconductor wafers, in installations for separating them into crystals]. Patent RF, no. 2047933, 1995.
6. Shlykov V. D., Prikhod'ko P. S., Volkova R. Ya. *Sposob razdeleniya poluprovodnikovykh plastin na kristally* [Method of separating semiconductor wafers on crystals]. Patent RF, no. 1827696, 1993.
7. Gotra Z. Yu. *Tekhnologiya mikroelektronnykh ustroistv* [The technology of microelectronic devices]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1991, 528 p.
8. Artamonov B. A., Volkov Yu. S. *Analiz modelei protsessov elektrokhimicheskoi i elektroerozionnoi obrabotki. Chast' 2. Modeli protsessov elektroerozionnoi obrabotki. provolochnaya vrezka* [Analysis of models of processes of electrochemical and electrical discharge machining. P. 2. Process model EDM: wire cutting]. Moscow, VNIUPI Publ., 1991, 144 p.
9. Kurnosov A. Yu., Yudin V. V. *Tekhnologiya proizvodstva poluprovodnikovykh priborov i integral'nykh mikroskhem* [Technology of production of semiconductor devices and integrated circuits]. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 1986, 368 p.
10. Pichugin I. G., Tairov Yu. M. *Tekhnologiya poluprovodnikovykh priborov* [Technology of semiconductor devices]. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 1984, 288 p.
11. Lopukhin V. A., Shelest D. K. *Sistemy tekhnologii komp'yuternogo proizvodstva. Tekhnologiya integral'nykh mikroskhem* [Systems technology computer manufacturing. Technology of integrated circuits]. St. Petersburg, SPbGUAP Publ., 2000, 124 p.
12. Nikiforova-Denisova S. N. *Tekhnologiya poluprovodnikovykh priborov i izdelii mikroelektroniki. V 10 kn.: Kn. 4. Mekhanicheskaya i khimicheskaya obrabotka* [Technology of semiconductor devices and microelectronics products. 10 Books: proc. textbook for vocational schools. Book 4. Mechanical and chemical treatment]. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 1989, 95 p.
13. Swati D. Lahane, Manik K. Rodge, Sunil B. Sharma. Multi-response optimization of Wire-EDM process using principal component analysis. *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*. 2012, Vol. 2 (8), P. 38–47.
14. Khaikin S. E. *Fizicheskie osnovy mekhaniki: ucheb. posobie* [Physical fundamentals of mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1971, 752 p.
15. Artamonov B. A., Volkov Yu. S., Drozhalova V. I. and other. *Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody obrabotki materialov (v 2-kh tomakh). T. 1. Obrabotka materialov s primenением instrumenta* [Electrophysical and electrochemical methods of processing materials. In 2 books. Vol. 2 Processing of materials with the use of the tool]. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 1983, 247 p.
16. Biderman V. L. *Teoriya mekhanicheskikh kolebanii* [Theory of mechanical vibrations]. Textbook for universities. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 1980, 408 p.

РАЗДЕЛ
PART
4



ЭКОНОМИКА

ECONOMICS AEROSPACE
INDUSTRY

КОСМИЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ: СОСТОЯНИЕ, ОСОБЕННОСТИ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ

Г. П. Беляков, Ю. А. Анищенко, М. В. Сафонов

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

Проведен анализ космической деятельности в аспектах её современного состояния, характерных особенностей и устойчивых тенденций развития. В различных аспектах определены важность и значение космической деятельности и ракетно-космической промышленности. Отмечена широкая трактовка категории «космическая деятельность» официальными источниками. Среди основных направлений осуществления космической деятельности выделены: разработка, производство и эксплуатация автоматических космических аппаратов; освоение космического пространства при помощи телеподавляемых космических кораблей и обитаемых космических станций; предоставление услуг по запуску космических аппаратов для отечественных и иностранных заказчиков; создание и использование объектов наземной инфраструктуры. Даны краткая характеристика каждого из направлений. На основе анализа научной литературы сформулирован ряд особенностей космической деятельности, подкреплённый данными официальной статистики. Выделены устойчивые тенденции развития космической деятельности: глобализация космической деятельности ввиду расширения числа стран-участников; демократизация космической деятельности как процесс уменьшения государственного контроля; расширение применения государственно-частного партнерства; развитие технологий выведения полезных нагрузок в космическое пространство в направлении унификации средств выведения; возобновление интереса общества к масштабным космическим проектам, реализуемым в интересах фундаментальной науки; рост экономической привлекательности космического рынка ввиду расширения возможностей частного капитала; институциональное развитие космической деятельности в виде формирования системы правового регулирования отношений участников космической деятельности. Отмечается важность преобразований, происходящих в ракетно-космической отрасли, и актуальность применения проектного подхода в осуществлении космической деятельности.

Ключевые слова: космическая деятельность, особенности космической деятельности, тенденции развития космической деятельности.

Vestnik SibGAU
Vol. 17, No. 1, P. 218–222

SPACE ACTIVITY: CONDITION, FEATURES AND TRENDS

G. P. Belyakov, Y. A. Anischenko, M. V. Safronov

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

This paper analyzes the aspects of space activities in its modern state, characteristics and trends of sustainable development. The importance and value of space activities and the space industry are defined in various aspects. A broad interpretation of the category “space activities” is marked by official sources. The main directions of space activities include: development, manufacture and operation of unmanned spacecraft; space exploration using manned spacecraft and manned space stations; provision of services to launch spacecraft to domestic and foreign customers; creation and use of land-based infrastructure. A brief description of each direction is given. The features of space activities based on the analysis of the scientific literature are formulated. The features of space activities are backed by official statistics. Stable trends of development of space activities include: globalization of space activities in view of expanding the number of participating countries; democratization of space activities as a process of reducing state control; increased use of public-private partnerships; advances in technology of space launch in the direction of the unification of launch vehicles; renewed interest in society to large-scale space projects implemented in the interests of fundamental science; increased economic attractiveness of the space market due to the empowerment of private capital; institutional development of space activities as a form of legal regulation of participants in space activities.

The importance of the transformations which take place in the space industry and the relevance of the use of the project approach to the implementation of space activities are also noted.

Keywords: space activities, features of space activities, trends in space activities.

Введение. В современных условиях хозяйствования состояние космической деятельности во многом определяет уровень развития и влияния России в современном мире, ее статус высокоразвитого в научном и технологическом отношении государства. Государственными интересами Российской Федерации являются наращивание и использование конкурентных возможностей и преимуществ России в сфере космической деятельности, выход России в число ведущих участников мирового рынка космических товаров (работ и услуг) и развитие внутреннего рынка таких товаров (работ и услуг), становление и развитие коммерческого сектора отечественной космической деятельности.

Состояние, особенности и тенденции развития космической деятельности. Важность и значение космической деятельности и ракетно-космической промышленности в настоящий момент очевидны и в различных аспектах рассматриваются во множестве научных работ [1–6], анализ которых позволил выделить следующие положения:

- освоение ближайших космических объектов и изучение дальнего космоса являются приоритетными направлениями для развития человеческой цивилизации в целом;
- лидирующие позиции России в некоторых направлениях космической деятельности являются значимым фактором, определяющим участие России в международном разделении труда и укрепляющим позиции России во внешнеполитической деятельности;
- развитие ракетно-космической отрасли как флагмана народного хозяйства стимулирует развитие смежных отраслей промышленности, способствует повышению конкурентоспособности выпускаемой продукции, обеспечивая тем самым качественный рост экономики.

Объем мирового космического рынка превысил к 2014 г. 314 млрд долл. При этом значительная часть суммы (порядка 240 млрд долл.) приходится на долю коммерческого сектора. Способность государства, используя исключительно национальные ресурсы (собственные космодромы, ракетоносители и космические аппараты), запускать космические аппараты является ключевым фактором, определяющим положение на рынках космических услуг. Попытки запуска собственного ракетоносителя предпринимались в 12 государствах: Россия, США, Франция, Китай, Япония, Великобритания, Индия, Израиль, Бразилия, КНДР, Иран и Южная Корея. В так называемый Большой космический клуб принимаются страны, осуществившие успешный запуск собственного ракетоносителя. На текущий момент в клуб входят 11 государств, последним из которых в 2013 г. стала Южная Корея. В ближайшие годы ожидается вступление в клуб Бразилии, которой до сих пор не удавалось осуществить успешного космического запуска.

Категория «космическая деятельность» трактуется официальными источниками достаточно широко. В соответствии с Законом РФ от 20 августа 1993 г. № 5663-І «О космической деятельности» под космической деятельностью понимается любая деятельность, связанная с непосредственным проведением работ по исследованию и использованию космического пространства, включая Луну и другие небесные тела. Столь широкая и нечеткая трактовка категории «космическая деятельность» обуславливает целесообразность более детального ее описания с точки зрения направлений осуществления и присущих ей особенностей.

Рассмотрим наиболее развитые направления осуществления космической деятельности:

1. Разработка, производство и эксплуатация автоматических космических аппаратов. Ввиду своей относительной дешевизны данное направление является наиболее массовым. Количество действующих космических аппаратов военного, научного и народно-хозяйственного назначения на орбите Земли достигает 1200. Крупнейшая группировка спутников на орбите принадлежит США (на 1 февраля 2014 г. составляет 488 единиц) и представлена преимущественно телекоммуникационными спутниками. По численности спутниковой группировки Россия в четыре раза уступает США, владея лишь около 10 % действующих спутников. Основу российской орбитальной группировки составляют спутники ГЛОНАСС и военные спутники навигации и связи. Порядка 70 % [7] в составе российской орбитальной группировки приходится на аппараты военного и двойного назначения. Что же касается динамики, то по состоянию на 2014 г. Россия лидирует по числу выведенных на орбиту спутников – 87 из 243 запущенных. По сравнению с 2013 г. общее число запущенных в мире спутников увеличилось почти на 13 %. Значительный прирост обеспечен рядом кластерных запусков, в ходе которых одним ракетоносителем в космос выводится несколько легких космических аппаратов.

2. Освоение космического пространства при помощи пилотируемых космических кораблей и обитаемых космических станций. На данный момент пилотируемые полеты в космос осуществляются исключительно в рамках программы по эксплуатации Международной космической станции (МКС) в целях реализации проводимых на МКС научных проектов. В 2013 г. было произведено 5 пилотируемых запусков, в 2014 г. их число снизилось до 4. Все полеты проводились в составе смешанных экипажей согласно планам реализации программы МКС. Следует отметить, что после сворачивания американской программы «СпейсШаттл» Россия является монополистом в проведении пилотируемых космических полетов. Весьма перспективным направлением при осуществлении пилотируемых полетов является космический туризм. Первый полет космического туриста состоялся

28 апреля 2001 г. Полёты осуществляются при помощи российских космических кораблей «Союз» на российский сегмент МКС. По состоянию на начало 2015 г. на борту МКС в качестве туристов побывало уже 7 человек. Последнему космическому туриstu полет обошелся в 35 млн долл.

3. Предоставление услуг по запуску космических аппаратов для отечественных и иностранных заказчиков. К этому направлению осуществления космической деятельности целесообразно относить также разработку и производство средств выведения, поскольку возможность участвовать в мировом рынке космических запусков непосредственно обусловлена наличием у государства соответствующих объектов космической (ракеты-носители и разгонные блоки) и наземной (космодромы) инфраструктуры. В 2014 г., как и все последние годы, Россия лидировала по числу запусков – 32 пуска (35 %). С учетом пусков по международным программам (Sea Launch и «Союз» в Куру) это число увеличивается до 37 (40,22 %), что составляет 2/5 мирового рынка космических запусков. США контролируют 25,0 % рынка, Китай производит 17,39 % космических запусков.

4. Создание и использование объектов наземной инфраструктуры. Наличие развитой наземной инфраструктуры определяет потенциальные возможности государства по проведению космических запусков. Географическое расположение космодромов имеет большое значение с точки зрения максимизации энергоэффективности используемых ракет-носителей и увеличения вариантов орбит движения запускаемых КА. По состоянию на 2014 г. в мире полноценно использовались для осуществления космической деятельности 14 космодромов. Россия осуществляет запуски с космодромов Байконур, Плесецк и Ясный. По три космодрома имеют в своем распоряжении США (Канаверал, Вандерберг, Уоллопс) и Китай (Цзючоань, Тайюань, Сичан). Также используемые для космических запусков космодромы имеют ЕКА, Индия, Япония, Израиль. Китай объявил о завершении строительства космодрома Вэньчан, но пусков оттуда еще не было. Россией ведется строительство космодрома Восточный в Амурской области.

Изучение ряда работ [1; 3; 8; 9] позволило сформулировать ряд особенностей, характерных для космической деятельности.

1. Осуществление космической деятельности связано с решением задач за пределами атмосферы Земли. Данный факт рождает ряд ограничений, таких как:

- необходимость доставки космических аппаратов с поверхности Земли в космическое пространство при помощи специальных ракет-носителей, что само по себе является весьма сложной и дорогостоящей задачей;
- необходимость создания и поддержания наземной инфраструктуры для обеспечения пусков ракет-носителей;
- агрессивность внешней среды вне атмосферы Земли, что при условии невозможности внесения изменений в конструкцию аппарата после его запуска вызывает повышенные требования к изделиям космической техники.

2. Значимая роль государства в осуществлении и контроле космической деятельности. Ввиду того, что в Российской Федерации космическая деятельность относится к ведению федеральных органов государственной власти и управления, государственное участие в той или иной форме характерно для каждого реализуемого на территории РФ космического проекта. Согласно данным Росстата [10], удельный вес ракетной и космической техники, произведенной в соответствии с государственными программами за счет средств федерального бюджета, в общем объеме производства ракетной и космической техники из года в год превышает значения 65–70 % от общего объема производства.

3. Ряд характерных особенностей космической деятельности обусловлен уникальными параметрами космической техники:

3.1. Инновационный характер изделий является одной из важнейших особенностей космической деятельности. Данная особенность обусловлена высоким уровнем наукоемкости продукции при единичном и мелкосерийном характере производства. Наукоемкость связана с высокой долей (свыше 40 %) [11] научно-технической продукции (научные исследования и разработки, опытно-конструкторские работы, научно-технические услуги) в общем объеме производства ракетной и космической техники (поставки, работы, услуги).

3.2. Длительные сроки проектирования и изготовления изделий. Период от разработки до получения результатов составляет 5–7 лет, при этом непосредственно изготовление изделий может длиться до 1,5 лет.

3.3. Высокие требования к качеству, надежности, безопасности, сроку активного существования.

3.4. Большое число соисполнителей в процессе проектирования, изготовления и испытания изделий ракетно-космической техники. Данная особенность обуславливает широчайшее применение внутриотраслевой и межотраслевой кооперации, а также дает почву для участия в процессах кооперации небольших частных компаний.

3.5. Высокая стоимость изделий космической техники. Высокая стоимость космической техники является следствием вышеописанных особенностей космической деятельности. Помимо сложности и длительности разработки и производства значительные расходы приходятся на инфраструктурную составляющую – стоимость ракеты-носителя и обслуживание наземной инфраструктуры.

Анализ особенностей и путей развития космической деятельности позволил выделить следующие устойчивые тенденции:

1. Глобализация космической деятельности. Расширение круга стран, осуществляющих космическую деятельность в целях науки и народного хозяйства. Несмотря на то, что не более 20 стран обладают производственной и научной базой, достаточной для разработки и производства собственных космических аппаратов, благодаря широкому применению кооперации более 100 государств имеют возможность участвовать в космической деятельности. Основу такой кооперации составляют проекты создания систем связи и телекоммуникации.

2. Демократизация космической деятельности. Сокращение государственного регулирования космической деятельности и ограничения трансфера технологий. Анализ иностранных источников, описывающих состояние и перспективы космической деятельности, показывает, что высокое влияние на космическую деятельность государства можно отнести к нисходящим тенденциям [12; 13]. В России основные методы организации космической деятельности сложились при принципиально иной системе хозяйствования. На сегодняшний день можно констатировать 20–30-летнее отставание методов организации и управления производством по сравнению с известными современными концепциями [14]. Этим обуславливается низкая гибкость отношений между участниками космической деятельности в России, а также проблемы достижения требуемых показателей качества стоимости и сроков при осуществлении космической деятельности.

3. Важно отметить также тенденцию расширения применения государственно-частного партнерства при осуществлении космической деятельности. Передовой опыт США в данной области позволяет оценить плодотворность такого сотрудничества. За последние 5 лет множество частных компаний проявили инициативу в реализации программ суборбитальных запусков для проведения экспериментов или организации частных полётов в космос. НАСА поддерживает ряд компаний, работающих на этом рынке, в том числе Armadillo Aerospace, Near Space Corp., Masten Space Systems, Up Aerospace Inc., Virgin Galactic, Whittinghill Aerospace LLC и XCOR Aerospace. Некоторые компании объявили о планах создания систем доставки людей на орбиту на коммерческой основе независимо от американского аэрокосмического агентства. Среди таких компаний – Virgin Galactic, Stratolaunch и SpaceX.

4. Развитие технологий выведения полезных нагрузок в космическое пространство в направлении унификации средств выведения. Данная тенденция выражается в применении модульного принципа в конструкции ракет-носителей, в качестве примеров здесь можно привести отечественный проект ракеты «Ангара» и разрабатываемый в США проект RH Falcon. В перспективе усиление унификации должно привести к снижению удельной стоимости выведения полезных нагрузок.

5. Возобновление интереса общества к масштабным космическим проектам, реализуемым в интересах фундаментальной науки.

6. Рост экономической привлекательности космического рынка. Сложившиеся в космической отрасли условия открывают широкие возможности для частных инвесторов. Вовлечение частного капитала стимулирует конкуренцию, повышает требования к экономической эффективности космической деятельности. Данная тенденция оказывает как позитивное воздействие (снижение стоимости космической продукции и услуг для конечных потребителей), так и рождает ряд проблем, связанных, например, с относительно невысокой эффективностью отечественной космической промышленности.

7. Институциональное развитие космической деятельности. При расширении численности участников космической деятельности возникает необходимость правового регулирования отношений участников космической деятельности. Фундаментальные основы международного космического права заложены в 1960-х гг. рядом основополагающих договоренностей (Договор по космосу 1967 г., Соглашение о спасении 1968 г., Конвенция об ответственности 1972 г., Конвенция о регистрации 1974 г. и Соглашение о Луне 1979 г.), но во многих вопросах существующие надгосударственные нормативно-правовые акты оставляют возможности трактовки, что вызывает сложности при реализации международных космических проектов [15]. Таким образом, для эффективного регулирования институт космического права должен отвечать современным потребностям участников космической отрасли.

Заключение. Россия на данный момент занимает ведущее место в мире при осуществлении основных направлений космической деятельности, но выделенные устойчивые тенденции развития космической деятельности могут негативно отразиться на ее положении. В настоящий момент ракетно-космическая отрасль проходит этап масштабных преобразований, эффективность которых будет определять положение России на космическом рынке на далекую перспективу. Ожидается, что преобразования должны сделать отрасль более гибкой и эффективной, что позволит ракетно-космической отрасли соответствовать реалиям мирового космического рынка и оставаться конкурентной. С учетом рассмотренных особенностей и тенденций развития, в условиях постоянных изменений все более актуальными становятся вопросы применения проектного подхода в осуществлении космической деятельности.

Библиографические ссылки

1. Ерыгина Л. В., Сердюк Р. С. Состояние российской ракетно-космической промышленности и тенденции её развития // Вестник СибГАУ. 2014. Вып. 1(53). С. 207–211.
2. Железняков А. Освоение космического пространства как глобальная задача человечества // Инновационная Россия. 2011. № 5(151). С. 12–15.
3. Карпов А. С. Ракетно-космическая промышленность Российской Федерации: современное состояние и перспективы // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2008. № 12 (33). С. 43–48.
4. Самков Л. М. Космические программы: когда безумствует мечта – души прекрасные порывы // Вестник Югорского государственного университета. 2011. № 3(22). С. 102–106.
5. Кирилина С. А. Состояние и тенденции развития космической деятельности Российской Федерации // Экономика и управление. 2010. № 11(72). С. 202–206.
6. Пайсон Д. Б. Космическая промышленность «новая» и «старая»: уроки и перспективы совместного развития // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2013. № 16 (205). С. 2–10.

7. Остапенко О. Н. Приоритетные направления развития военно-космической деятельности России в современных условиях [Электронный ресурс]. URL: <http://federalbook.ru/files/OPK/Soderjanie/OPK-6/III/Ostapenko.pdf> (дата обращения: 12.05.2015).
8. Медведчиков Д. А. Современные условия осуществления космической деятельности и космического страхования [Электронный ресурс]. URL: <http://www.space-ins.ru/index.php/kategoria2/18-conditions.html> (дата обращения: 12.05.2015).
9. Филатов В. В. Особенности современного этапа развития аэрокосмической промышленности и новые требования в подготовке специалистов // Вестник СибГАУ. 2006. Вып. 5(12). С. 253–256.
10. Единая межведомственная информационно-статистическая система. Доля производства ракетной и космической техники по государственному заказу [Электронный ресурс]. URL: <http://www.fedstat.ru/indicator/description.do?id=42135> (дата обращения: 12.05.2015).
11. Единая межведомственная информационно-статистическая система. Доля научно-технической продукции в объеме производства ракетной и космической техники [Электронный ресурс]. URL: <http://www.fedstat.ru/indicator/description.do?id=42136> (дата обращения: 12.05.2015).
12. Nghi M. Nguyen Effective Space Project Management // Proceedings of the Project Management Institute Annual Seminars & Symposium. Houston, 2000.
13. OECD. The Space Economy at a Glance 2014, OECD Publishing [Электронный ресурс]. 2014. URL: <http://dx.doi.org/10.1787/9789264217294-en> (дата обращения: 12.05.2015).
14. Публичный аналитический доклад по развитию новых производственных технологий. Сколковский институт науки и технологий [Электронный ресурс]. 2014. URL: isicad.ru/ru/pdf/ReportSkolkovo2014.pdf (дата обращения: 12.05.2015).
15. Бодин Н. Б., Волынская О. А. Правовое обеспечение инновационного развития космической деятельности (западный опыт и традиции Востока) // Российский внешнеэкономический вестник. 2012. № 1. С. 72–80.
- References**
1. Erygina L. V., Serdyuk R. S. [Growth trends of Russian space industry]. *Vestnik SibGAU*. 2014, Vol. 53, No. 1, P. 207–211 (In Russ.).
 2. Zheleznyakov A. [Space exploration as a global challenge of humanity] *Innovationsnaya Rossiya*. 2011, Vol. 151, No. 5, P. 12–15 (In Russ.).
 3. Karpov A. S. [Aerospace industry of the Russian Federation: current status and prospects] *Natsional'nye interesy: priority i bezopasnost'*. 2008, Vol. 33, No. 12, P. 43–48 (In Russ.).
 4. Samkov L. M. [Space programs when mad dream – beautiful soul impulses]. *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2011, Vol. 22, No. 3, P. 102–106 (In Russ.).
 5. Kirilina S. A. [Status and trends of development of space activities of the Russian Federation] *Ekonomika i upravlenie*. 2013, Vol. 72, No. 11, P. 202–206 (In Russ.).
 6. Pajson D. B. ["New" and "old" space industry: lessons and prospects for joint development] *Natsional'nye interesy: priority i bezopasnost'*. 2013, Vol. 205, No. 16, P. 2–10 (In Russ.).
 7. Ostapenko O. N. *Prioritetnye napravleniya razvitiya voenno-kosmicheskoi deyatel'nosti Rossii v sovremennykh usloviyah* [Priority directions of development of military space activity of Russia in modern conditions] (In Russ.). Available at: <http://federalbook.ru/files/OPK/Soderjanie/OPK-6/III/Ostapenko.pdf> (accessed 12.05.2015).
 8. Medvedchikov D. A. *Sovremennye usloviya osushchestvleniya kosmicheskoi deyatel'nosti i kosmicheskogo strakhovaniya* [Modern conditions of space activities and space insurance] (In Russ.). Available at: <http://www.space-ins.ru/index.php/kategoria2/18-conditions.html> (accessed 12.05.2015).
 9. Filatov V. V. [Peculiarities of modern stage of aerospace industry development and new requirements for specialists' training]. *Vestnik SibGAU*. 2006, Vol. 12, No. 5, P. 253–256 (In Russ.).
 10. *Dolya proizvodstva raketnoi i kosmicheskoi tekhniki po gosudarstvennomu zakazu* [The share of the production of rocket and space technology under the state order] (In Russ.). Available at: <http://www.fedstat.ru/indicator/description.do?id=42135/> (accessed 12.05.2015).
 11. *Dolya nauchno-tehnicheskoi produktsii v ob'eme proizvodstva raketnoi i kosmicheskoi tekhniki* [The proportion of scientific and technical products in volume production of rocket and space technology] (In Russ.). Available at: <http://www.fedstat.ru/indicator/description.do?id=42136/> (accessed 12.05.2015).
 12. Nghi M. Nguyen Effective Space Project Management. *Proceedings of the Project Management Institute Annual Seminars & Symposium*. September 7–16, 2000. Houston, Texas, USA.
 13. OECD (2014), The Space Economy at a Glance 2014, OECD Publishing. Available at: <http://dx.doi.org/10.1787/9789264217294-en> (accessed 06.06.2015).
 14. *Publichnyi analiticheskii doklad po razvitiyu novykh proizvodstvennykh tekhnologii* [Public analytical report on the development of new production technologies] (In Russ.). Available at: isicad.ru/ru/pdf/ReportSkolkovo2014.pdf (accessed 06.06.2015).
 15. Bodin N. B., Volynskaya O. A. [Legal support of innovative development of space activities (Western experience and traditions of the East)]. *Rossiiskii vneshneekonomicheskii vestnik*. 2012, No. 1, P. 72–80 (In Russ.).

КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ ПРЕДПРИЯТИЙ ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА: СУЩНОСТЬ И СОДЕРЖАНИЕ ПОНЯТИЯ

В. Г. Бревнов

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

Оборонно-промышленный комплекс, как и несколько десятилетий назад, является движущей силой экономического развития Российской Федерации. Долгие годы конверсия обеспечивала переток инновационных разработок из оборонно-промышленного комплекса в различные отрасли народного хозяйства. Результаты исследований в виде конечной продукции необходимы, прежде всего, для поддержания обороноспособности государства, развития гражданской сферы экономики, продажи на мировом рынке изделий военного и двойного назначения. Важнейшим инструментом устойчивого развития оборонно-промышленного комплекса является инновационный проект. В настоящий момент отечественными предприятиями оборонной промышленности реализуется ряд сложных инновационных проектов, направленных на модернизацию отрасли и выполнение государственных программ. Одной из характеристик инновационного проекта является его конкурентоспособность, поскольку именно конкурентоспособные проекты обладают необходимым набором особенностей, в частности, высокой степенью надёжности и высоким качеством. От эффективности инновационных проектов зависят сроки выполнения государственного оборонного заказа, номенклатура и различные параметры производимой продукции. В свою очередь, от конкурентоспособности инновационного проекта зависит его результативность, способность удовлетворять потребностям государственного заказчика и покупателей продукции оборонно-промышленного комплекса за рубежом, возможность внедрения в различные отрасли народного хозяйства. На начальном этапе исследования затрагивается вопрос о роли инновационных проектов в развитии российской экономики. Приводится перечень особенностей предприятий оборонно-промышленного комплекса. Исследованы точки зрения на содержание понятия «инновация», представлены признаки рассматриваемого термина. На основе анализа особенностей предприятий оборонной промышленности предложены авторские толкования понятий «инновационный проект» и «конкурентоспособность инновационного проекта» на предприятиях оборонно-промышленного комплекса. Систематизированы подходы к понятию конкурентоспособности, отражающие сущность и содержание рассматриваемой категории, приводится ее описание. Выделяется круг факторов, оказывающих непосредственное влияние на уровень конкурентоспособности инновационных проектов на предприятиях оборонно-промышленного комплекса, предлагаются их группировка на внутренние и внешние. Делается вывод об их влиянии на скорость, время, результативность и стоимость реализации инновационного проекта.

Ключевые слова: инновации, инновационный проект, конкурентоспособность, конкурентоспособность инновационного проекта.

Vestnik SibGAU
Vol. 17, No. 1, P. 223–230

COMPETITIVENESS OF INNOVATIVE PROJECTS OF THE DEFENSE INDUSTRY ENTERPRISES: ESSENCE AND CONTENT OF CONCEPT

V. G. Brevnov

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

As several decades ago, the defense industry is a driving force of economic development of the Russian Federation. For many years conversion has provided an overflow of innovative development from defense industry in various branches of national economy. The results of researches in the form end products are necessary, first of all, for maintenance of defense of the state capability, development of the civil sphere of economy, sale in the world market products of a military and dual purpose. The most important tool of a sustainable development of defense industry is the innovative project. Today the defensive industry enterprises realize a number of the difficult innovative projects

directed towards modernization of branch and state performance programs. One of the innovative project characteristics is its competitiveness as competitive projects possess a necessary set of features, in particular, high degree of reliability and high quality. The terms of implementation state defensive order, the nomenclature and various parameters of the made production depend on innovative projects efficiency. In turn, its productivity, ability to satisfy the needs of state customer and buyers of defense industry complex production abroad, introduction of possibility in various branches of domestic national economy depend on innovative project competitiveness. At the initial stage of research, the question of innovative projects role in the Russian economy development is raised. The list of features of the defense industry enterprises is provided. The points of view on the content "innovation" are investigated; signs of the considered term are presented. On the features basis of the defensive industry enterprises, the author's interpretation of the concepts "innovative project" and "innovative project competitiveness" is offered. The approaches to the concept "competitiveness" reflecting essence and content of the considered category are systematized and the description is provided. The circle of the factors having direct impact on the level of innovative projects competitiveness at the enterprises of defense industry is allocated, their division into internal and external groups is offered. The conclusion about their influence on speed, time, productivity and cost of implementation of the innovative project is drawn.

Keywords: innovations, innovative project, competitiveness, competitiveness of the innovative project.

Введение. Развитие инновационной составляющей российской экономики происходит под влиянием различных преобразований. Так, на современном этапе реализуется ряд сложных инновационных проектов в различных отраслях экономики. Осуществляется модернизация оборонно-промышленного комплекса, предприятий, занятых добычей стратегического сырья, компаний, ориентированных на производство инновационной и конкурентоспособной продукции. На данный момент инновации имеют стратегическую важность и определяют эффективность, конкурентоспособность, качество развития экономики государства.

В советский период предприятия оборонной отрасли являлись локомотивом технологического развития страны. В настоящее время их роль несколько снизилась, но не потеряла своей актуальности. Инновационные проекты являются важной составляющей технологического развития предприятий оборонно-промышленного комплекса (ОПК). В настоящее время ввиду последних общемировых политических изменений возросла необходимость импортозамещения. Санкции, введённые некоторыми странами в отношении Российской Федерации, оставили предприятия ОПК без некоторых видов комплектующих и оборудования, в частности, элементной базы для производства микросхем.

В данной ситуации устойчивое развитие предприятий ОПК, достигаемое также за счет расширения военно-технического сотрудничества, удовлетворения нужд отечественных вооружённых сил и развития производства гражданской продукции, является важнейшим условием для решения проблемы обеспечения обороноспособности страны и развития экономики в целом [1].

Особенности деятельности предприятий оборонно-промышленного комплекса. Предприятия такой важной отрасли, как ОПК, имеют ряд особенностей, присущих исключительно данной отрасли (табл. 1).

Так, исходя из особенностей отрасли, формируются типологии инновационных проектов, поскольку их реализация требует от руководства предприятий отрасли чёткой классификации с целью выбора проектов, обладающих наилучшими показателями.

Сущность и содержание понятия «инновационный проект». Инновационный проект является движущей силой экономического развития, имеющей ряд существенных особенностей в зависимости от специфики отрасли, в которой он реализуется. Рассмотрим последовательно содержание следующих понятий: инновация, инновационный проект, инновационный проект предприятий ОПК, конкурентоспособность инновации, конкурентоспособность инновационного проекта предприятий ОПК.

Таблица 1

Особенности деятельности предприятий оборонно-промышленного комплекса

№ п/п	Особенности
1	Имеют в наличии два вида производств: военное и гражданское
2	Предприятия ОПК реализуют широкий спектр инноваций, отрасль производит значительные объёмы инновационной продукции
3	Преобладают наукоёмкие производства
4	Предприятия ОПК представлены: конструкторскими бюро, производственными предприятиями и научно-производственными объединениями. Результатами их деятельности могут быть инновационные проекты: новшества либо инновации
5	Состав и количество этапов инновационного процесса на предприятиях ОПК варьируются в зависимости от типа предприятий и их особенностей
6	Реализация инновационных проектов и производство изделий осуществляются в строго заданные сроки
7	Продукция обладает высокой степенью надёжности, высоким качеством
8	Разработки могут быть использованы для производства гражданской продукции
9	Отсутствует либо существенно ограничен публичный доступ к содержанию некоторых инновационных проектов

Рост количества реализованных и подготовленных к реализации инновационных проектов выдвигает требования к таким важнейшим характеристикам, как конкурентоспособность и качество. Данный вопрос невозможно рассматривать отдельно от понятий «инновация» и «конкурентоспособность инновации».

Анализ толкований понятия «инновация», предложенных как отечественными, так и зарубежными учёными, позволил выделить несколько распространённых в научной литературе точек зрения.

Первая точка зрения приравнивает инновации к новшествам в определённой области, к их числу следует причислять результаты исследовательского процесса, интеллектуальной деятельности, нового открытия в виде новых ценных свойств существующего продукта для потребителей, нового продукта, товара или услуги, способов (технологий) их производства или применения, результата научного исследования, нового метода продаж или метода деловой практики, организации рабочих мест или внешних связей, новые бизнес-модели и создание новых рынков сбыта. Новшества могут применяться в различных сферах общественных отношений.

Вторая точка зрения определяет инновации с точки зрения производственного процесса, создания новых изделий, технологий, внедрения новых приёмов в сфере управления производством.

Третья точка зрения рассматривает инновацию с позиций внедрения в производство новых элементов, подходов, изделий, кардинально отличающихся от предшествующих. Внедрение происходит по результатам проведённого исследования либо сделанного открытия.

Отличие рассмотренных терминов свидетельствует об отсутствии единого подхода к содержанию понятия «инновация». Неприемлемым, на наш взгляд, является мнение о тождественности понятий «инновация» и «новация». Понятие «инновация» в определённой степени включает в себя содержание термина «новация», не следует забывать и о том, что новшество становится инновацией в случае коммерциализации.

Инновация должна обладать следующими признаками:

- востребованность;
- способность к внедрению;
- обладание новизной;
- способность к коммерциализации.

В рамках оборонно-промышленного комплекса мы придерживаемся второй точки зрения, определяющей инновации с позиций процесса создания новых изделий, технологий, проведения необходимых производственных и коммерческих мероприятий, внедрения новшеств в сфере управления производством.

В настоящем исследовании используется толкование, данное исследователем А. С. Кулагиным. Согласно данному определению, под инновацией понимается «новая или улучшенная продукция (товар, работа, услуга), способ (технология) ее производства или применения, нововведение или усовершенствование в сфере организации и (или) экономики производства, и (или) реализации продукции, обеспечивающие экономическую выгоду, создающие условия для такой

выгоды или улучшающие потребительские свойства продукции (товара, работы, услуги)» [2].

Сущность понятия «инновационный проект».

Ключевой формой внедрения инноваций служит инновационный проект как совокупность взаимосвязанных по ресурсам, срокам и участникам целенаправленных действий, обеспечивающих достижение заявленных инновационным проектом целей. Результативность инновационного проекта определяется путём выбора и внедрения инноваций.

В настоящее время проектное управление широко применяется в различных отраслях экономики. Немаловажным аспектом является и то, что инновации являются первоосновой реализации любого инновационного проекта.

Анализ трудов исследователей в области инноваций показал, что однозначного определения понятия «инновационный проект» не существует. Однако существует несколько распространённых в научной литературе точек зрения по данному вопросу.

Существуют различные точки зрения на содержание понятия «инновационный проект». Инновационный проект представляется как совокупность различных документов, необходимых для реализации инновационного проекта, форма управления инновационной деятельностью, деятельность, совокупность мероприятий, приводящих к инновации, и как определённая работа, приводящая к достижению поставленных целей. Мнения авторов и существующие определения представлены в табл. 2.

Существуют и обоснованные точки зрения. В. В. Быковский считает, что инновационный проект – это процесс целенаправленного изменения или создания новой технической или социально-экономической системы [12]. В. Д. Дорофеев, В. А. Дресвянников полагают, что инновационный проект является разновидностью инвестиционного проекта, бизнес-проекта и представляет собой систему, содержащую множество проектных решений в научной, технической, производственной, экономической (финансовой), управленической, маркетинговой областях [13].

Однако ни одно из предложенных определений не отражает специфику и особенности предприятий ОПК. В этой связи имеет смысл уточнить понятие «инновационный проект».

Инновационный проект на предприятии оборонно-промышленного комплекса – это комплекс соответствующим образом упорядоченных мероприятий полного инновационного цикла, сопряжённых с безопасным жизнеобеспечением, осуществляемых в строго определённые сроки, финансируемых государством, необходимых для достижения целей в передовых областях науки и производства конкурентоспособной продукции военного (двойного, гражданского) назначения, при этом публичный доступ к содержанию инновационного проекта отсутствует либо ограничен.

Конкурентоспособность инновационного проекта на предприятиях ОПК. Важнейшей характеристикой инновационного проекта, наряду со сроками его осуществления и стоимостью, является его конкурентоспособность. В научной литературе существует множество подходов к определению данного понятия,

что обусловлено многогранностью исследуемой проблемы. Данный термин употребляется совместно с такими объектами, как предприятие, регион, инновации, инновационный проект и др. Несмотря на некоторые различия, данные толкования во многом схожи. Ввиду многообразия данных трактовок целесообразно выделить несколько подходов к рассматриваемому понятию, которые приведены в табл. 3.

Интерес представляют следующие обосновленные точки зрения. В. В. Баринов считает, что конкурентоспособность объектов складывается из конкуренто-

способности его элементов и их организованности для достижения цели [14]. М. К. Старовойтов, Б. Ф. Фомин полагают, что конкурентоспособность является общей мерой интереса и доверия к услугам предприятия на фондовом, финансовом и трудовом рынках [15]. В материалах Лиссабонской повестки дня Евросоюза изложена следующая точка зрения: конкурентоспособность – это не только высшая производительность работы, конкуренция и прибыльность бизнеса, но и «сознательно управляемый» долгосрочный аспект развития [16].

Сущность понятия «инновационный проект»

Подходы к определению понятия	Авторы	Понятие
Совокупность различных документов, предназначенных для реализации инновационного проекта	Р. А. Фатхутдинов	Совокупность документов, определяющих систему научно обоснованных целей и мероприятий по решению какой-либо проблемы, организацию инновационных процессов в пространстве и времени [3]
Форма управления (инновационным развитием) инновационной деятельностью (воплощением инноваций)	А. К. Казанцев, А. С. Серова	Форма инновационной деятельности [4]
	А. Е. Абрамешин	Деятельность или мероприятие, предполагающее осуществление в определённый период времени каких-либо действий для достижения определённых результатов инновационного процесса [5]
	И. Ю. Евграфова	Форма целевого управления инновационной деятельностью [6]
Деятельность, совокупность мероприятий, приводящих к инновации	Б. В. Завлин, А. К. Казанцев, Л. Э. Миндели	Система взаимосвязанных целей и программ, представляющих собой комплекс научно-исследовательских, опытно-конструкторских, производственных, организационных, финансовых, коммерческих и других мероприятий, соответствующим образом организованных (увязанных по ресурсам, срокам и исполнителям), оформленных комплектом проектной документации и обеспечивающих эффективное решение конкретной научно-технической задачи (проблемы), выраженной в количественных показателях и приводящей к инновации [7]
	А. А. Вишняков	Комплекс мероприятий, определённым образом организованный и направленный на получение инновации, обладающей определёнными характеристиками [8]
	Н. А. Трубачёв	Комплекс научно-исследовательских, опытно-конструкторских, организационных, производственных, финансовых и других мероприятий, увязанных по ресурсам, срокам и исполнителям, оформленных комплектом проектной документации и приводящих к инновации [9]
Определённая работа, приводящая к достижению поставленных целей	З. П. Румянцева, Н. А. Саломатин, Р. З. Акбердин	Дело, деятельность, мероприятие, предлагающее осуществление комплекса каких-либо действий, обеспечивающих достижение определённых целей, как система организационно-правовых и расчётно-финансовых документов, необходимых для осуществления определённых действий [10]
	Г. Ж. Абылкерова	Инновационный проект представляет собой сложную систему взаимообусловленных и взаимоувязанных по ресурсам, срокам и исполнителям мероприятий, направленных на достижение конкретных целей (задач) на приоритетных направлениях развития науки и техники [11]

Подходы к понятию «конкурентоспособность»

Подход	Содержание	Автор (последователи)
Комплексный	Рассматривает конкурентоспособность как определённое свойство, способность, сравнительное преимущество, совокупность характеристик определённого объекта или субъекта, имеющего определенную долю соответствующего рынка, его способность использовать свои сильные стороны, концентрировать усилия, превзойти конкурентов в заданных условиях, работать в динамичной конкурентной среде при удержании имеющихся конкурентных преимуществ и, в конечном счёте, достичь поставленных целей	Ю. Б. Рубин, А. И. Коваленко, А. Н. Захаров, Т. Конно, В. Петров, С. В. Емельянова, А. В. Дементьева, И. Л. Дулисова, Л. В. Донцова, Х. А. Фасхиев, А. Н. Литвиненко, М. А. Татьянченко, Ж. Ж. Ламбен, Л. Целикова, У. Зиннуров, Л. Ильясова, К. Р. Макконнелл, С. Л. Брю, А. А. Тараданов

Подход	Содержание	Автор (последователи)
Ресурсный	Характеризует конкурентоспособность как обладание и выражение производителем, определённого набора возможностей и преимуществ (экономических, научно-технических, производственных, организационно-управленческих, маркетинговых, инновационных, организационных и иных) перед конкурентами, которые дают ему возможность снижать издержки производства, повышать качество продукции, более часто обновлять ассортимент, расширять производство, устойчиво занимать определённую долю рынка (рыночную нишу) и получать высокие доходы	А. О. Блинов, В. Я. Захаров, Т. Конно, Э. Б. Фигурнов, Ю. Ю. Донец, П. С. Завьялов, Р. А. Фатхутдинов, З. А. Васильева, Ю. Б. Рубин, В. В. Шустов, И. В. Сергеев, В. Г. Золотогоров, А. Г. Дементьева, Г. Азоев
Нормативный	Рассматривает конкурентоспособность как степень соответствия технико-функциональных, экономических, организационных и других характеристик объекта требованиям потребителей, определяет долю рынка, принадлежащую данному объекту, и препятствует перераспределению этого рынка в пользу других объектов	С. Г. Светуньков, Е. А. Иванова, Н. Л. Зайцев, Е. П. Голубков, Л. Е. Басовский, Г. Куликов
Относительный	Конкурентоспособность организации как относительная характеристика, отражающая отличие процесса развития данного производителя от производителя конкурента, организации (фирмы), от конкурентов как по степени удовлетворения своими товарами потребностей потребителей, так и по эффективности производственной деятельности, а также возможности и динамику приспособления организации к условиям рыночной конкуренции	М. О. Ермолов, Е. И. Мазилкина, Т. Г. Паничкина, Е. Млоток, М. Х. Мескон, Т. Горькова, Г. Шаповалов, Н. Моисеева
Качественный	Качество как часть конкурентоспособности. Конкурентоспособность как способность выполнять свои функции (предназначение, миссию) с требуемым качеством и стоимостью обусловлена различными характеристиками продукта, соответствующими требованиям данного рынка, его определённого сегмента и потребительским оценкам, в том числе качеством продукции, качеством управления, способностью к инновациям, способностью продукта быть более привлекательным для потребителя по сравнению с другими продуктами аналогичного вида и назначения, благодаря лучшему соответствию затрат на его приобретение и потребление	Л. М. Калашникова, М. Г. Миронов, А. А. Томпсон, А. Дж. Стриклэнд, Л. Н. Родионова, О. Г. Кантор, Ю. Р. Хакимова, Ю. В. Сухотин, Л. С. Шеховцева
Индексный	Конкурентоспособность как количественный показатель доходности производства или выгодности применения товарной продукции в условиях наличия конкуренции и при соблюдении необходимых качественных требований общего плана (экологические стандарты, патентная чистота и т. п.), выражаящийся в единицах стоимости	Ю. Короткий, У. Зиннуров, Л. Ильярова, Ю. Короткий, О. В. Аристов
Факторный	Конкурентоспособность как состояние предприятия (фирмы), обусловленное различными экономическими, социальными, политическими и другими факторами, положение предприятия на рынке (в первую очередь, занимаемая доля рынка и тенденции её изменения) товаропроизводителей, на внутреннем и внешних рынках, отражаемое через показатели (индикаторы), адекватно характеризующие такое состояние и его динамику	А. Селезнев, К. Щиборщ, Ю. Ионземцев

Научный интерес представляют факторный и качественный подходы, определяющие конкурентоспособность как состояние производителя, способного изготовить продукт требуемого качества. В частности, в данном вопросе мы согласны с авторами качественного подхода, поскольку конкурентоспособность по своей природе является сложным показателем, складывающимся из нескольких составляющих, одним из которых является категория качества. Конкурентоспособность как свойство производителя может быть обусловлено экономическими, социальными, политическими и иными факторами, выступает как положение на внутреннем/внешнем рынках, отражается через показатели, характеризующие статус и динамику производства.

Немаловажным является вопрос о конкурентоспособности инновационного проекта на предприятиях ОПК. Конкурентоспособность инновационного проекта как самостоятельная категория не достаточно исследована в научной литературе, имеются лишь отдельные толкования данного понятия. Так, например, Д. П. Барсуков и Д. С. Скорчеллetti под конкурентоспособностью инновационного проекта понимают «его динамичное свойство, характеризующее его способность быть реализованным в условиях рыночной конкуренции и отражающее привлекательность проекта как для потребителя, так и для инвесторов, что определяется степенью его экономической эффективности» [17]. Ни одно из имеющихся в научной литературе определений в полной мере не учитывает специфики предприятий оборонно-промышленного комплекса.

Целесообразно предложить следующее понятие конкурентоспособности инновационного проекта применительно к специфике настоящего исследования.

Конкурентоспособность инновационного проекта на предприятиях оборонно-промышленного комплекса – это динамичное свойство, сочетающее ряд характеристик, формируемое на различных стадиях реализации проекта, соответствующее уровню технологического развития и политике государства в области безопасности, определяемое эффектами/эффективностью от коммерциализации инноваций, позволяющее производить продукцию в установленные сроки, в том числе в условиях кризисных явлений.

Таким образом, предложенное толкование определяет конкурентоспособность инновационного проекта

на предприятиях ОПК как сложное свойство, управляемое заказчиком проекта (государством). При этом эффективность достигается за счёт коммерциализации результатов проекта путём производства и реализации научно-технической продукции, в том числе в условиях различных кризисных явлений, что предполагает наличие риска на всех стадиях реализации проекта.

Факторы, оказывающие влияние на конкурентоспособность инновационных проектов предприятий ОПК. На деятельность предприятий оборонно-промышленного комплекса оказывает влияние множество факторов. При этом степень влияния каждого из них различна. В этой связи в настоящем исследовании была проведена их систематизация, дано разделение факторов на внутренние и внешние (табл. 4)

Таблица 4

Основные факторы, действующие на конкурентоспособность инновационных проектов предприятий ОПК

Внутренние факторы	Внешние факторы
Технический уровень и темпы обновления продукции	Уровень технологического развития государства
Темпы обновления технологий	Зависимость от состояния инфраструктуры финансового рынка
Объём производства	Состояние экономики государства
Организация производства	Состояние конкурентной среды
Статус организации	Состояние производственного и ресурсного потенциалов государства
Наличие и полнота использования капитала	Развитость рынка
Наличие и полнота использования трудовых ресурсов	Наличие рекламных кампаний по продвижению продукта
Финансовая состоятельность проекта (стоимость) и ресурсные возможности (потенциал) его реализации	Рыночная стратегия
Уровень организационного и информационного обеспечения	Наличие научно-исследовательских и образовательных организаций, способных к синтезу инноваций
Уровень квалификации инженерно-технического персонала	Степень глобализации экономики
Длительность цикла «фундаментальные исследования – прикладные исследования – научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы – промышленное освоение»	Наукоёмкость продукции, сложность проводимых НИОКР
Уровень специализации оборудования	Характер новизны технологической инновации для отрасли (предприятий)
Наличие и стабильность хозяйственных связей с предприятиями-поставщиками	Законодательство стран импортёров/экспортёров
Уровень доходности и риска инновационных проектов	Состояние социальной сферы в рассматриваемом государстве
Состояние и темпы обновления материально-технической базы производства	Быстрое обновление ассортимента выпускаемой продукции
Доля покупных изделий и полуфабрикатов, в том числе импортных	Уровень конкурентоспособности соперничающих организаций
Уровень развития системы подготовки кадров	Государственная экономическая политика в странах – импортерах товаров и услуг
Способность предприятий ОПК реагировать на требования рынка, учитывать скорость его изменений	Государственная экономическая политика в странах – экспортёрах товаров и услуг
Обеспеченность персоналом по видам работ	Размер рынка
Наличие завершенных исследований и разработок (патенты, лицензии)	Темпы роста рынка
Доля специализированных производств, уникального оборудования и технологий	Барьеры для входа или выхода на рынок
Уровень износа основных производственных фондов	Требования к размерам необходимых капитальных вложений
Уровень экологической и промышленной безопасности производства	
Наличие дефицита внутренних финансовых источников	

Настоящие факторы имеют разделение на внешние и внутренние по причине того, что инновационные проекты реализуются не только в границах предприятий, но и в тесном взаимодействии с их окружением. Влияние каждого фактора может содействовать скорейшей и продуктивной реализации проекта либо, наоборот, поставить под сомнение вопрос о его осуществлении.

Заключение. Таким образом, в результате настоящего исследования выявлены признаки инновации, способствующие её внедрению в инновационный процесс. Перечислены особенности предприятий обороно-промышленного комплекса. Уточнены понятия «инновационный проект» и «конкурентоспособность инновационного проекта» на предприятиях ОПК. Представлены семь подходов, отражающих сущность и содержание категории «конкурентоспособность». Выделены факторы, оказывающие влияние на конкурентоспособность инновационного проекта предприятий ОПК как основы продуктивной реализации и коммерциализации результатов.

Библиографические ссылки

1. Ерыгина Л. В., Гильц Н. Е. Инструменты контроля производства гражданской продукции на машиностроительном предприятии ОПК // Вестник СибГАУ. 2014. № 1 (53). С. 198–203.
2. Кулагин А. С. Немного о термине «инновация» // Инновации. 2004. № 7. С. 26–29.
3. Фатхутдинов Р. А. Инновационный менеджмент. М. : Питер, 2008. 448 с.
4. Казанцев А. К., Малюк В. И., Серова Л. С. Основы менеджмента. Практикум. М. : Высш. образование, 2002. 544 с.
5. Абрамешин А. Е. Инновационный менеджмент. М. : Вита-Пресс, 2001. 272 с.
6. Евграфова И. Ю. Инновационный менеджмент. М. : Окей-книга, 2009. 84 с.
7. Завлин Б. В., Казанцев А. К., Миндели Л. Э. Основы инновационного менеджмента. Теория и практика. М. : Экономика, 2010. 518 с.
8. Вишняков А. А. Совершенствование механизма оценки реализуемости инновационных проектов : дис. ... канд. экон. наук. Саратов, 1999. 131 с.
9. Трубачев Н. А. Особенности управления и справедливость распределения результатов инновационной деятельности на примере комплексного инновационного проекта // Инновации. 2008. № 1. С. 115–118.
10. Румянцева З. П., Соломатин Н. А., Акбердин Р. З. Менеджмент организаций. М. : Инфра-М, 2002. 430 с.
11. Мутанов Г. М., Абдыкерова Г. Ж. Информационная система оценки инновационных проектов. Усть-Каменогорск : ВКГТУ, 2010. 136 с.
12. Поршнев А. Г. Управление организацией : энцикл. словарь. М. : Инфра-М, 2001. 822 с.
13. Дорофеев В. Д., Дресвянников В. А. Инновационный менеджмент : учеб. пособие. Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. 189 с.

14. Баринов В. А., Развитие организации в конкурентной среде // Менеджмент в России и за рубежом. 2000. № 6. С. 3–16.

15. Фомин Б. Ф., Суворов А. И. Понятие конкурентоспособности предприятия. Стратегическое управление [Электронный ресурс]. URL: http://bigc.ru/publications/other/strategy/competitive_ability_of_companyp.php (дата обращения: 05.02.2015).

16. Конкурентоспособность страны как национальная идея [Электронный ресурс]. URL: http://gazeta.zn.ua/ECONOMICS/konkurentosposobnost_strany_kak_natsionalnaya_ideya.html. (дата обращения: 05.02.2015).

17. Барсуков Д. П., Скорчелетти Д. С. Конкурентоспособность инновационного проекта: содержание, факторы, оценка // Российское предпринимательство. 2012. № 4 (202). С. 49–54.

References

1. Erygina L. V., Gilzem N. E. [Tools of controlling the production of civilian goods in the machine-building enterprise OPK]. *Vestnik SibGAU*. 2014, No. 1 (53), P. 198–203 (In Russ).
2. Kulagin A. S. [A little bit about the term “innovation”]. *Innovatsii*. 2004, No. 7, P. 26–29 (In Russ.).
3. Fatkhutdinov R. A. *Innovatsionnyy menedzhment*. [Innovation management]. Moscow, Piter Publ., 2008, 448 p.
4. Kazantsev A. K., Malyuk V. I., Serova L. S. *Osnovy menedzhmenta*. [Fundamentals of Management]. Moscow, Vysshiee obrazovanie Publ., 2002, 544 p.
5. Abrameshin A. E. *Innovatsionnyy menedzhment*. [Innovation management]. Moscow, Vita-Press Publ., 2001, 272 p.
6. Evgrafova I. Y. *Innovatsionnyy menedzhment*. [Innovation management]. Moscow, Okey-kniga Publ., 2009, 84 p.
7. Zavlin B. V., Kazantsev A. K., Mindeli L. E. *Osnovy innovatsionnogo menedzhmenta. Teoriya i praktika*, [Bases of innovative management. Theory and practice]. Moscow, Ekonomika Publ., 2010, 518 p.
8. Vishnyakov A. A. *Sovershenstvovanie mekhanizma otsenki realizuemosti innovatsionnykh proektor*. [Improving the mechanism for assessing the feasibility of innovative projects. Cand. econ. sci. diss]. Saratov, SGSU Publ., 1999, 131 p.
9. Trubachev N. A. [Features of management and fair distribution of innovative activity on the example of integrated innovation project]. *Innovatsii*. 2008, No. 1, P. 115–118 (In Russ).
10. Rumyantseva Z. P., Solomatin N. A., Akberdin R. Z. *Menedzhment organizatsii*. [Management organization]. Moscow, Infra-m Publ., 2002, 430 p.
11. Mutanov G. M., Abdykerova G. Z. *Informatsionnaya sistema otsenki innovatsionnykh proektor*. [Information System evaluation of innovative projects]. Ust'-Kamenogorsk, VKGTU Publ., 2010. № 1. 136 p. (In Russ.).
12. Porshnev A. G. *Upravlenie organizatsiey: Entsiklopedicheskiy slovar* [Management of the organization: Collegiate Dictionary]. Moscow, Infra-m Publ., 2001, 822 p.

13. Dorofeev V. D., Dresvyannikov V. A. *Innovatsionnyy menedzhment* [Innovation Management]. Penza, izdvo penz. gos. un-ta Publ., 2003, 189 p.
14. Barinov V. A. [Development of the organization in the competitive environment]. *Menedzhment v Rossii i za rubezhom*. 2000, No. 6, P. 3–16 (In Russ.).
15. Fomin B. F., Suvorov A. I. *Ponyatie konkurentospособности предпринятия. стратегическое управление*. [The concept of competitiveness. Strategic management] (In Russ.). Available at: URL: http://bigc.ru/publications/other/strategy/competitive_ability_of_company.php (accessed 05.02.2015).
16. *Konkurentospособность страны как национальная идея*. [Competitiveness of the country as a national idea]. (In Russ.). Available at: http://gazeta.zn.ua/ECONOMICS/konkurentospособnost_strany_kak_natsionalnaya_ideya.html. (accessed 05.02.2015).
17. Barsukov D. P., Skorchelletti D. S. [Competitiveness of the innovative project: content, factors evaluation]. *Rossiyskoe predprinimatel'stvo*. 2012, No. 4 (202), P. 49–54 (In Russ.).

© Бревнов В. Г., 2016

ФОРМИРОВАНИЕ СТРАТЕГИИ ПРЕДПРИЯТИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ В СФЕРЕ ОХРАНЫ РЕЗУЛЬТАТОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В. П. Вашкевич

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

Современные условия жесткой конкуренции в космической отрасли требуют конкретных организационных действий при разработке стратегий инновационного развития с учетом правовой охраны результатов интеллектуальной деятельности (РИД), заключенных в научно-технических разработках предприятия. Поэтому, принимая во внимание основные цели стратегии инновационного развития предприятия, формируется стратегия охраны результатов интеллектуальной деятельности, реализация которой посредством управления патентными правами с комплектованием патентного портфеля обеспечит конкурентные преимущества в космической отрасли. При формировании данной стратегии были обозначены цели и задачи, принципы, факторы, основные механизмы реализации, а также показатели и индикаторы. Для достижения целей стратегии охраны результатов интеллектуальной деятельности основополагающим является оформление материалов заявок на выдачу патентов, учитывая совокупность интересов предприятия с выполнением требования закона о патентовании в части раскрытия сущности объекта с полной, достаточной для его осуществления, но при этом, не раскрывая нюансов, без которых невозможно полноценное его создание третьими лицами.

В качестве объекта исследования было взято предприятие космической отрасли АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва» (АО «ИСС»). Данная краткая характеристика деятельности предприятия с данными о положении на мировом рынке производства спутников связи. Предложены этапы реализации стратегии охраны результатов интеллектуальной деятельности предприятия: оценка текущего состояния на рынке космической отрасли, анализ состояния и тенденции развития правовой охраны РИД в космической отрасли (внешний патентный анализ), внутренний патентный анализ АО «ИСС», отбор патентоспособных РИД, подлежащих правовой охране, выбор стран и систем патентования.

Разработка стратегии предприятия космической отрасли в сфере охраны результатов интеллектуальной деятельности позволит руководству сформировать алгоритм организационных мероприятий при патентовании, обеспечит максимальное сохранение конфиденциальной информации в тайне, а также даст возможность обоснованного подхода к выбору объектов, территории и системы патентования.

Ключевые слова: стратегия охраны результатов интеллектуальной деятельности, объекты интеллектуальной собственности, патент, предприятие космической отрасли.

Vestnik SibGAU
Vol. 17, No. 1, P. 231–240

FORMATION OF STRATEGY OF THE SPACE INDUSTRY IN THE FIELD OF PROTECTION OF INTELLECTUAL ACTIVITY RESULTS

V. P. Vashkevich

JSC “Information satellite systems” named after academician M. F. Reshetnev”
52, Lenin Str., Jeleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
E-mail: iss.patent@mail.ru

Modern conditions of tough competition in the space sector requires specific organizational actions during the development of innovative strategies for development in view of the legal protection of intellectual activity results (RIA), concluded in the scientific and technical development of the enterprise. Therefore, taking into account the main objectives of the innovative development strategy of the enterprise, the strategy for the intellectual property protection is established, which implementation by the management of patent rights to acquisition of the patent portfolio will provide a competitive advantage in the space industry. While forming this strategy the following things have been identified: the objectives and tasks, principles, factors, basic mechanisms of implementation as well as indicators and

marks. The fundamental factor to achieve the goals of the strategy of protection of intellectual property is the design materials of patent applications, taking into account the totality of the company's interests with the performance requirements of the law regarding disclosure of the object in sufficient detail to implement it, but it is not possible to complete its creation by third parties without revealing the nuances.

JSC "Information satellite systems" named after academician M. F. Reshetnev" was taken as the object of investigation in space industry. A brief description of the enterprise data on the situation at the world market of the production of communication satellites was presented. The stages of implementation of strategies to protect intellectual activity results: assessment of the current state of the market space industry, analysis of the state and trends of the legal protection of RIM in the space industry (external patent analysis), internal patent analysis JSC "ISS", the selection of patentable RID subject to legal protection the selection of countries and patent systems, were also proposed.

The development of the strategy at the space industry enterprise in terms of intellectual property protection will help senior management of the company to generate an algorithm of arrangements with the patenting, will provide the maximum preservation of confidential information, and also will provide an opportunity-based approach to the selection of objects, territories and the patent system itself.

Keywords: strategy of intellectual property protection, intellectual property, patent, space industry enterprise.

Введение. Охрана результатов интеллектуальной деятельности (РИД), созданных на предприятии космической отрасли, осуществляется посредством предоставления правовой охраны. Выбор способа охраны РИД зависит от целей предприятия, от потенциальной выгоды при использовании конкретного способа, а также от оценки достоинств и недостатков каждого из способов. Правовая охрана, предоставляемая РИД, является одним из инструментов стратегического развития и управления инновационной деятельностью предприятия космической отрасли.

Основополагающим при достижении целей стратегии охраны результатов интеллектуальной деятельности (СОРИД) является оформление материалов заявок на изобретения, полезные модели, промышленные образцы, в которых учитывается совокупность интересов предприятия. Помимо основного назначения (охрана технологий и разработок от копирования) патенты могут выполнять различные функции, например, блокирование входа в данный сектор экономики продукции конкурентов. При оформлении материалов заявок на выдачу патентов выполняется требование законодательства в части раскрытия сущности объекта (изобретения, полезной модели) с полнотой, достаточной для его осуществления, но при этом не раскрываются нюансы, без которых невозможно полноценное его создание третьими лицами. С учетом заинтересованности продукцией и желания использовать технологии и разработки, предприятие может предоставить возможность приобретения лицензий на РИД, охраняемые патентным правом, с предоставлением инжиниринговых и консультационных услуг. Помимо этого, не отраженная в описании объектов интеллектуальной собственности (ОИС) информация, сохраненная в виде секрета производства (ноу-хау), передается лицензиату с заключением соответствующего договора о сохранении ее в режиме коммерческой тайны. Учитывая эти моменты, цена при продаже запатентованных РИД возрастает.

Объектом исследования является предприятие космической отрасли акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва» (АО «ИСС»), образованное в 1959 г.,

расположенное в г. Железногорске Красноярского края, являющееся лидером по производству космических аппаратов (КА) в России. Для оказания телекоммуникационных услуг предприятие производит геостационарные КА на базе пяти космических платформ: МСС-740, МСС-727, МСС-767, «Экспресс-1000», «Экспресс-2000». Помимо этого, в АО «ИСС» создаются модули полезной нагрузки и целевой аппаратуры, бортовые комплексы управления, системы электропитания, ориентации и стабилизации, терморегулирования, системы навигации и управления движением на орбите, наземные и спутниковые антенные устройства и системы, в том числе бортовые системы, оптико-электронные приборы ориентации, бортовые приборы, узлы, механизмы, конструкции, электрорадиоизделия, материалы, алгоритмы, программное обеспечение, наземная аппаратура потребителя. АО «ИСС» принимало участие в реализации более чем 30 государственных космических программ в области связи и вещания, навигации, геодезии и научных исследований. Было спроектировано, изготовлено и запущено порядка 50 различных типов КА общей численностью свыше 1200, что превышает численность созданных КА любого производителя в мире [1; 2].

Наглядным показателем положения АО «ИСС» на мировом рынке служит количество заказов, полученных основными производителями космических платформ за период с 2010 по 2013 гг. (табл. 1) [2].

За период с 2008 по 2011 гг. АО «ИСС» удалось выйти на международный рынок производства КА с динамикой развития и продвижения продукции – один международный контракт в год, но за последние четыре года количество заключенных контрактов снизилось до одного за два года. Однако, учитывая цикличность замены КА в орбитальных группировках, появление новых спутниковых операторов, создание национальных спутниковых систем различных стран, у АО «ИСС» существует возможность увеличения международных контрактов до трех в год при соответствии КА международным требованиям качества и условиям выполнения контрактов, а также выполнении ряда стратегических мероприятий, в том числе при формировании СОРИД [1–4].

Распределение заказов среди ведущих мировых производителей КА*

Название компании	Доля компаний на международном рынке за год, %				Средняя доля компании на международном рынке, %
	2010	2011	2012	2013	
Space System/Loral	33,35	25	26,92	35,70	30,24
EADS Astrium	33,33	31,25	19,23	14,29	24,53
Orbital Sciences	20	25	15,38	14,29	18,67
Thales Alenia Space	6,66	6,25	15,38	14,29	10,65
АО «ИСС»	0	12,5	11,56	7,14	7,8
Boeing	6,66	0	7,69	14,29	7,16
Lokheed Martin	0	0	3,84	0	0,95

*Данные приведены из источника [2].

Формирование стратегии охраны результатов интеллектуальной деятельности. Для предприятия космической отрасли стратегия в сфере охраны результатов интеллектуальной деятельности формируется исходя из основных стратегических целей и действий руководства предприятия для их достижения с учетом патентного права. Формирование СОРИД позволит скорректировать направление развития, обозначить приоритетные цели и выработать оптимальные методы их достижения. Развитие предприятия без четко разработанной СОРИД увеличивает риски затрат при вложении в неэффективные, малозначимые проекты. А полное отсутствие правовой охраны созданных на предприятии РИД приводит к безвозмездному их копированию и опережению патентования со стороны конкурентов, что, в свою очередь, грозит прекращением производства. Исключительное право, которое обеспечивает патент, предоставляет патентообладателю легальную монополию на использование запатентованных РИД.

Для предприятия космической отрасли АО «ИСС» формируются две стратегии инновационного развития – внутреннего и внешнего рынков. Первая – стратегия, позволяющая сохранить и удержать текущую доминирующую позицию на национальном рынке. Вторая – стратегия интенсивного роста, подразумевающая увеличение объемов продаж с выходом на новых зарубежных заказчиков и последующим усилением позиций в долгосрочном периоде [2].

Основные цели при формировании СОРИД заключаются в следующем:

- обеспечение гарантии экономической безопасности предприятия;
- обеспечение высокой конкурентоспособности продукции предприятия;
- блокирование вывода на рынок аналогичной продукции конкурентов;
- коммерциализация ОИС.

Основными задачами СОРИД являются:

- формирование и последовательное развитие единой системы охраны, защиты и использования РИД при соблюдении принятых норм на международном уровне;

– повышение уровня деловой репутации;

- осуществление трансфера технологий посредством лицензионной деятельности;

– пресечение нарушений исключительных прав предприятия.

К основным принципам формирования СОРИД относятся:

- обеспечение оптимального режима охраны РИД;
- обеспечение максимального охвата правовой охраной основных направлений технологии производства;
- предоставление правовой охраны выявленным патентоспособным РИД на всех стадиях жизненного цикла;
- правовая охрана должна быть целесообразной и приносить экономическую выгоду.

К основным факторам, влияющим на формирование стратегии охраны РИД, заключенных в выпускаемой продукции, относятся:

- защита научно-технических достижений от копирования;
- гарантия получения дохода от реализации выпускаемой продукции;
- освоение новых рынков;
- тенденции развития производства аналогичной продукции.

При реализации стратегии предприятия космической отрасли в сфере охраны результатов интеллектуальной деятельности разработаны меры и основные механизмы для достижения поставленных целей и задач, направленные:

- на создание благоприятной среды для творчества, поиска новых научно-технических и конструкторских решений, результатом которых является создание патентоспособных РИД;
- проведение экспертизы патентоспособных РИД для увеличения вероятности получения охранного документа до подачи заявки в патентное ведомство;
- предоставление правовой охраны стратегически важным для предприятия патентоспособным РИД, в том числе за рубежом;
- повышение уровня изобретательской активности с вовлечением наибольшего числа сотрудников в изобретательскую деятельность;
- формирование организационных механизмов вовлечения РИД в хозяйственный оборот;
- учет и инвентаризация РИД, находящихся на балансе предприятия, и их стоимостная оценка;
- совершенствование системы поощрения и вознаграждения авторов патентоспособных РИД;

- проведение анализа тенденций развития космической отрасли в мире;
- проведение патентных и маркетинговых исследований по направлениям научно-технического развития предприятия;
- совершенствование внутренних нормативных и методических документов предприятия в сфере правовой охраны и использования ОИС;
- проведение обучения и повышение квалификации сотрудников предприятия в сфере патентоведения и рационализации.

Индикаторами реализации СОРИД являются:

- обеспечение правой охраны РИД, заключенных в продукции предприятия, на территории России и за рубежом;
- увеличение стоимости активов предприятия;
- реализация трансфера технологий посредством продажи лицензий.

Показателями при формировании индикаторов реализации СОРИД являются:

- количество ОИС, права на которые принадлежат предприятию;
- количество и стоимость нематериальных активов (НМА), поставленных на баланс предприятия;
- количество заключенных лицензионных договоров.

Реализация стратегии охраны результатов интеллектуальной деятельности. Постоянный контроль и анализ деятельности конкурентов позволит внести корректировки в СОРИД, учитывающие цели патентования и регионы сбыта продукции. Реализация и корректировка СОРИД осуществляется с учетом изменения внешних факторов, таких как патентное, налоговое законодательство, правил бухгалтерского учета, а также исходя из приведенных автором анализов и мероприятий:

- оценка текущего состояния на рынке космической отрасли;
- патентный анализ космической отрасли (внешний патентный анализ);
- внутренний патентный анализ АО «ИСС»;
- отбор патентоспособных РИД, подлежащих правовой охране;
- выбор стран и системы патентования.

В настоящее время все большее число фирм разных стран выходит на рынок космических продуктов и услуг, который даже в период мирового экономического кризиса продолжает динамично развиваться и оставаться коммерчески выгодным видом деятельности, о чем свидетельствуют оценки объема и структуры рынка исследовательских компаний Euroconsult, Frost&Sullivan, Northern Sky Research и Satellite Industry Association. Около 30 стран имеют государственные космические программы и реализуют их

в конкретных средствах. 19 стран обладают производственной и научной базой, позволяющей им разрабатывать и производить собственные космические системы [5–7].

В период с 2001 по 2013 гг. на геостационарную орбиту было выведено 245 коммерческих спутников связи и вещания. Статистика компании Satellite Industry Association показывает, что в конце XX в. в среднем в год выводилось на орбиту порядка 30 КА, но в начале XXI в. среднегодовая норма запуска составила 17 КА. И хотя на данный момент наблюдается тенденция увеличения производства и выведения КА на геостационарную орбиту, до сих пор ощущается дефицит спутниковой ёмкости практически во всех странах мира, с увеличением стоимости аренды и прибыли спутниковых операторов [5; 8; 9].

Наиболее перспективным направлением производства КА являются спутники связи, телевещания и ретрансляции, посредством которых оказываются телекоммуникационные услуги радиовещательной и фиксированной спутниковых служб, созданные на базе космических платформ среднего и тяжелого классов, выводимые на геостационарную орбиту, на которые ежегодно растет спрос у спутниковых операторов различных стран в соответствии с ростом спроса на услуги, предоставляемые данными типами КА. В связи с этим появляются новые производители КА, ужесточающие условия конкуренции [1–4; 10].

Анализ динамики патентования разработок и технологий ведущими мировыми производителями КА и оборудования для космической отрасли был проведен с учетом подкласса B64G (космонавтика, космические корабли и их оборудование, в соответствии с международной патентной классификацией МПК-2015.01 [11]). При выборе РИД, подлежащих правовой охране в космической отрасли, больше внимания уделяется патентованию непосредственно КА различных типов и модификаций, нежели отдельным агрегатам и оборудованию, включенным в их состав. Результаты анализа представлены в табл. 2 [12], по которым можно судить о тенденции увеличения патентования РИД китайской компанией, в то время как другие компании снижают эти показатели.

Данные табл. 3 говорят о том, что патентование собственных разработок зарубежных компаний в космической отрасли на территории России незначительно, и в основном правообладателями являются ведущие мировые лидеры по производству КА. Из общего количества патентов подкласса B64G в мире на долю российских правообладателей приходится 14 % (2870 из 19848). Исходя из значений табл. 4, АО «ИСС» занимает вторую позицию в тройке лидеров по патентованию РИД в космической отрасли России [12].

Таблица 2

**Динамика патентования в подклассе B64G РИД
ведущими зарубежными компаниями космической отрасли***

Наименование компании	Количество полученных патентов в год, шт											
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
EADS Astrium	11	26	23	12	7	–	–	–	–	1	–	–
Thales Alenia Space	5	4	5	3	17	10	9	7	18	11	14	–

Окончание табл. 2

Наименование компании	Количество полученных патентов в год, шт											
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Boeing	27	34	21	10	22	17	11	13	11	15	15	-
Lokheed Martin	24	8	9	7	4	5	1	4	2	1	1	-
Space System/Loral	-	-	-	-	-	-	2	-	1	1	1	-
NEC	2	1	-	-	-	2	1	1	1	3	2	-
Shanghai satellite engineering institute	-	-	-	-	-	-	-	-	1	6	13	39

*Данные приведены из источника [12].

Таблица 3
Зарубежные правообладатели российских патентов в подклассе B64G*

Наименование компании	EADS Astrium	CNES	Boeing	Thales Alenia Space	Space System/Loral	Blue origin	Hughes electronics
Страна	Франция, Германия	Франция	США	Франция	США	США	США
Количество патентов, шт	14	10	7	6	3	2	2

*Данные приведены из источника [12].

Таблица 4
Рейтинг российских патентовладельцев в подклассе B64G*

№ п/п	Наименование компании	Количество патентов, шт
1	ОАО «РКК «Энергия» имени С. П. Королева»	282
2	АО «ИСС» имени академика М. Ф. Решетнёва»	123
3	ГКНПЦ имени М. В. Хруничева	102
4	ОАО «ГРЦ имени В. П. Макеева»	49
5	НПО имени С. А. Лавочкина	43
6	ЦСКБ «Прогресс»	30
7	ФГУП ЦНИИмаш	29
8	ФГУП МОКБ «Марс»	23
9	ЗАО «КБ «Полёт»	21
10	ОАО «Звезда»	20
11	КБ общего машиностроения имени В. П. Бармина	17
12	НПЦ «Полюс»	14
13	Омский государственный технический университет	14
14	КБ «САЛЮТ»	13
15	ОАО «ВПК «НПО машиностроения»	13
16	Волгоградский государственный технический университет	12
17	Военно-космическая академия имени Можайского	11
18	ФГУП НПО «ТЕХНОМАШ»	11
19	Институт медико-биологических проблем РАН	10
20	КБ «Арсенал» имени М. В. Фрунзе	9
21	КБ транспортного машиностроения	9
22	Летно-исследовательский институт имени М. М. Громова	9
23	МАИ	9
24	ОАО «Российские космические системы»	9
25	НПО прикладной механики	8
26	ФГУП ПО «Полёт»	8
27	ОАО «Корпорация «Московский институт теплотехники»	7
28	ЗАО «НПО космического приборостроения»	6
29	ФГУП ЦЭНКИ	6
30	Военная академия РВСН имени Петра Великого	5
31	Киевский политехнический институт	5
32	НПО «Энергия» имени академика С. П. Королева	5
33	ОАО «ОНПП «Технология»	5
34	Петербургский государственный университет путей сообщения	5

*Данные приведены из источника [12].

На данный момент лидерами рынка мировой космической отрасли являются Китай и США, активно проводящие процедуры правовой охраны РИД при проведении НИОКР. Более половины всех мировых заявок на ОИС были поданы в Китае (32,1 % от общемирового объема) и США (22,3 %) [13; 14]. Правительством Китая поставлена задача осуществления проекта национальной стратегии в области интеллектуальной собственности, а также в организации промышленности и производства продуктов, основанных на интеллектуальной собственности. Помимо этого ставится задача усиления поддержки торговых предприятий таким образом, чтобы получить права на интеллектуальную собственность в зарубежных странах [15–17].

Учитывая интерес АО «ИСС» к региону центральной Евразии, автором был проведен анализ отчета Евразийской патентной организации, при котором обнаружилось, что наибольшее количество евразийских заявок на изобретения было подано, как и в предыдущие годы, заявителями из Соединенных Штатов Америки – 779 заявок, что составляет 22,7 % от всех поданных в Евразийское патентное ведомство заявок [18]. Помимо этого, при поиске патентов в подклассе B64G в Евразийском сервере публикаций [19] было обнаружено всего 27 документов, что свидетельствует о низкой активности патентования РИД космической отрасли в данном регионе.

Внешний патентный анализ показал:

- практически полное отсутствие патентования за рубежом РИД отечественных предприятий космической отрасли;

- низкую патентную активность иностранных предприятий в России;

- низкую долю групп разделов МПК: Н и G, содержащих изобретения в области электроники, управления и информационных технологий;

- наличие всего 27 публикаций евразийских патентов и заявок на изобретения в подклассе B64G;

- АО «ИСС» занимает вторую лидирующую позицию в России при патентовании РИД в подклассе B64G [12; 20].

Проведенный автором внутренний патентный анализ показал, что всего 30 % запатентованных РИД (изобретения, полезные модели, промышленные образцы), созданных в АО «ИСС», внедрены в производство, т. е. используются (табл. 5). Для сравнения, по статистическим данным за период с 2009 по 2013 гг., предоставленным Роспатентом о регистрации и использовании РИД, в России используется 6 % запатентованных РИД (изобретения, полезные модели, промышленные образцы) (табл. 6) [21]. Следовательно, 70 % состоящих на балансе предприятия ОИС в качестве НМА приносят убытки, и их поддержание на весь срок действия патентов (20 лет) нецелесообразно, поэтому на предприятии установлен срок поддержания патентов в течение семи лет, по истечении которого вопрос о целесообразности поддержания в силе рассматривается в индивидуальном порядке. Помимо этого, затраты идут на процедуру патентования и вознаграждение за изобретательскую деятельность.

Таблица 5

Динамика патентования и внедрения РИД в АО «ИСС» за период с 2003 по 2014 гг.*

Количество РИД, шт	Период с 2003 по 2014 гг.											
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Подано заявок на получение патента,	33	15	36	32	59	65	54	47	77	56	87	47
Из них:												
получено патентов	31	14	34	31	57	63	48	43	69	43	6	–
отказ в выдаче	2	1	2	1	2	1	5	4	5	2	–	–
на экспертизе в Роспатенте	–	–	–	–	–	–	–	–	1	10	71	47
внедрено	11	3	18	10	15	17	14	18	19	8	2	–

Стоймость нематериальных активов оценивается по затратному методу [22].

Таблица 6

Статистическая информация Роспатента об использовании РИД*

Количество РИД, шт	Период с 2009 по 2013 гг.				
	2009	2010	2011	2012	2013
Число действующих патентов (изобретения, полезные модели, промышленные образцы), всего	240 835	259 698	236 729	254 891	272 641
Использование охраняемых РИД (изобретения, полезные модели, промышленные образцы), всего	15 874	1 750	17 137	18 247	19 529

*Данные приведены из источника [21].

Автор считает, что отбор РИД, созданных в АО «ИСС», подлежащих патентованию, необходимо проводить с учетом планов по выпуску продукции, определенных технологической платформой «Национальная информационная спутниковая система» (ТП «НИСС»), в результате реализации которых АО «ИСС» должно достигнуть конкурентной позиции по основным направлениям деятельности: разработка и изготовление автоматических КА, платформ КА и модулей полезных нагрузок, систем (подсистем) КА (включающих бортовую радиоэлектронную аппаратуру, электромеханические устройства, антенны, антенно-фидерные устройства и др.) [2].

Основные критерии отбора РИД, подлежащих патентованию:

1. Патентоспособность РИД, заключающаяся:

- в абсолютной мировой новизне (в том числе патентная чистота в регионе с предполагаемой реализацией продукции);

- изобретательском уровне;

- промышленном применении.

2. Значимость технического решения в объекте техники.

3. Конкурентоспособность. Способность РИД принести экономическую выгоду, не уступать аналогичным объектам по совокупности потребительских свойств при низкой цене и пользоваться спросом [23].

4. Возможность контроля за правомерностью использования запатентованных РИД. При невозможности контроля использования РИД его патентование нецелесообразно, так как раскроет информацию, но такие РИД могут стать объектами бесплатных лицензий и сохраняться в тайне в виде ноу-хау. Контроль за правомерностью использования может быть осуществлен фирмой-лицензиатом, купившей лицензию на использование ОИС, а также ноу-хау [23].

При отборе РИД для патентования с целью лицензионной (коммерческой) деятельности необходимо учитывать степень готовности объекта к промышленному освоению. Помимо этого, необходимо убедиться, что РИД можно использовать в определенных странах без приобретения лицензии, не нарушая права других. Высокий коммерческий потенциал созданных на основе РИД технологий или объекта техники является одним из важнейших показателей при отборе разработки для патентования. К патентованию следует рекомендовать разработку, которая обеспечивает возможность реализации объекта по цене, ниже цены аналогичных объектов, имеющих совпадающие качественные и технические характеристики, при этом предполагается высокая емкость рынка, охватывающего несколько стран [24].

Ведущие мировые спутниковые операторы либо производят КА самостоятельно, либо посредством слияния и поглощения производителей КА, либо заключают новые контракты с зарекомендовавшими компаниями, с которыми уже сложились долгосрочные взаимоотношения. Отсюда следует, что существует консервативность, ограничивающая вход на данный рынок, и у предприятий России практически нет шансов на установление долгосрочных отношений с мировыми лидерами (Intelsat, SES и Eutelsat), об-

служивающими в основном Северную Америку и Западную Европу. Помимо этого, с целью защиты национальных позиций странами ЕС и США предпринимаются попытки ограничения деятельности предприятий Российской Федерации посредством ввода санкций. Учитывая данные факторы, целесообразно сосредоточиться на других регионах: Латинской Америке, Африке и особенно центральной Евразии, где существует тенденция увеличения спроса на КА, предназначенные для оказания телекоммуникационных услуг, в частности фиксированной спутниковой службы. Кроме того, многие страны в данных регионах стремятся к созданию национальных спутниковых систем без зависимости от ведущих спутниковых операторов [1–4; 10].

Удержание позиций на субрегиональном рынке центральной Евразии для АО «ИСС» является одной из стратегических задач развития. Центральная Евразия охватывает страны центрально- и восточноевропейского региона, Россию, государства Кавказа и Центральной Азии. После продажи КА KazSat-3, созданного для Казахстана, АО «ИСС» укрепило свои позиции на рынке ближнего зарубежья. В связи с этим, а также с целью защиты интересов АО «ИСС», целесообразно осуществление правовой охраны РИД на территории государств – участников Евразийской патентной конвенции по Евразийской патентной системе.

Анализ затрат на подачу международной заявки по Евразийской патентной системе показывает незначительную разницу с затратами по национальной системе, которая используется АО «ИСС» в данный момент и действует только на территории Российской Федерации. Причем затраты, связанные с зарубежным патентованием, по системе РСТ превышают в 1,6 раза уже на международной фазе. Общая сумма затрат (международная и национальная фазы) по системе РСТ будет превышать затраты при использовании национальной системы примерно в 5 раз. Также при использовании Евразийской патентной системы можно увеличить территорию действия правовой охраны результатов интеллектуальной деятельности АО «ИСС», тем самым поднять престиж организации, что положительно отразится при участии в тендерах, а также даст начало лицензионной деятельности на международном уровне. Учитывая зону охвата территории ближнего зарубежья, упрощенную процедуру подачи патентных заявок одновременно в несколько стран, а также стоимость, рекомендуется выбрать Евразийскую патентную систему.

Заключение. Эффективная космическая деятельность является двигателем инновационного развития экономики, создающим новые научные и технологические направления и технические достижения. Современные темпы развития требуют разработки конкретных организационных действий по выработке стратегий с анализом проблем в охране и защите научно-технического задела, рассчитанных на долгосрочную перспективу. Поэтому, учитывая основные цели стратегии предприятия космической отрасли в области инновационного развития, такие как сохранение лидирующих позиций на внутреннем рынке

расширение географии продаж с выходом на мировой рынок, сформирована стратегия охраны результатов интеллектуальной деятельности, реализация которой, посредством управления патентными правами с комплектованием патентного портфеля, обеспечит конкурентные преимущества в космической отрасли. Осуществление стратегии в сфере охраны результатов интеллектуальной деятельности обеспечит максимальное сохранение конфиденциальной информации в тайне, а также позволит получить следующую выгоду от патентования, в том числе за рубежом:

- охрана прорывных технологий с незначительными издержками;
- возможность ведения бизнеса на монопольных началах;
- более высокая конкурентоспособность продукции и услуг, обеспечивающие максимальный спрос и объемы реализации;
- установление монопольно высоких цен на продукцию и услуги;
- возможность продажи патентов и лицензий;
- максимальные объемы продаж из-за отсутствия конкурентов;
- трансфер технологий на международном уровне;
- капитализация ОИС и быстрый рост стоимости компаний за счет нематериальных активов.

Библиографические ссылки

1. Отчет о выполнении проекта реализации технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система» в 2013 году [Электронный ресурс]. URL : <http://tp.iss-reshetnev.ru> (дата обращения: 9.08.2015).
2. Стратегическая программа исследований технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система» на 2014–2020 годы [Электронный ресурс]. URL: <http://tp.iss-reshetnev.ru> (дата обращения: 19.09.2015).
3. Отчет о выполнении проекта реализации технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система» в 2014 году [Электронный ресурс]. URL: <http://tp.iss-reshetnev.ru> (дата обращения: 9.08.2015).
4. Проект стратегической программы исследований технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система» на 2012–2020 годы [Электронный ресурс]. URL: <http://tp.iss-reshetnev.ru> (дата обращения: 9.08.2015).
5. Крылов А. Спутниковые системы связи и вещания. Состояние и перспективы развития [Электронный ресурс]. URL: http://mosspaceclub.ru/3part_krilov_2.pdf (дата обращения: 20.09.2015).
6. Общие тенденции развития космической деятельности [Электронный ресурс]. URL: http://www.bayterek.kz/info/space_activities.php (дата обращения: 15.08.2015).
7. Тенденции развития космонавтики в мире [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sovkos.ru/cosmos/information/025.html> (дата обращения: 29.08.2015).
8. Satellite industry association [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sia.org/> (дата обращения: 01.10.2015).
9. State of the Satellite Industry Report. May 2015 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sia.org/wp-content/uploads/2015/06/Mktg15-SSIR-2015-FINAL-Compressed.pdf> (дата обращения: 01.10.2015).
10. Крылов А. Производство и эксплуатация спутников связи и вещания [Электронный ресурс]. URL: http://mosspaceclub.ru/3part_krilov_3.pdf (дата обращения: 20.09.2015).
11. Федеральный институт промышленной собственности (ФИПС). Информационные ресурсы. Международные классификации. Изобретения [Электронный ресурс]. URL: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPC/IPC2015_extended_XML/?xml=http://www1.fips.ru/IPC2015_extended_XML/AIpc-20150101_subclass-B_XML\AIpc20150101-B64G.xml (дата обращения: 9.09.2015).
12. Андрейчикова О. Н., Козырев А. Н. Патентный анализ аэрокосмического рынка [Электронный ресурс]. URL: http://www.labrate.ru/20141021/patent_analysis_of_the_aerospace_market-2014.pdf (дата обращения: 9.09.2015).
13. Рост числа заявок на регистрацию объектов интеллектуальной собственности в 2013 году: Китай лидирует по числу новых патентных заявок [Электронный ресурс]. URL: http://www.wipo.int/pressroom/ru/articles/2014/article_0018.html (дата обращения: 29.09.2015).
14. World Intellectual Property Indicators – 2014 Edition [Электронный ресурс]. URL: <http://www.wipo.int/ipstats/en/wipi> (дата обращения: 9.09.2015).
15. Полонская И. В. Зарубежное патентование объектов промышленной собственности. М. : ИНИЦ «ПАТЕНТ», 2011. 88 с.
16. News from PR China. World Patent Information. [Электронный ресурс]. 2010. № 32. P. 75–76. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/01722190/40/supp/C> (дата обращения: 20.08.2015).
17. News from PR China. World Patent Information. [Электронный ресурс]. 2015. № 40. P. 62–64. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/01722190/40/supp/C> (дата обращения: 7.09.2015).
18. Евразийская патентная организация (ЕАПО). Годовой отчет 2013 года [Электронный ресурс]. URL: http://www.eapo.org/pdf/home/report/eapo_2013.pdf (дата обращения: 9.09.2015).
19. Евразийская патентная организация (ЕАПО). Евразийский сервер публикаций [Электронный ресурс]. URL: [238](http://www.eapo.org/ru/publications/publicat/search.php?SEARCH%5Bid%5D=&SEARCH%5Bi21%5D=&SEARCH%5Bi51%5D=B64G&rDate=0&fYear=2015&fMont=&lYear=2015&lMont=&SEARCH%5Bbull%5D=&selectAll=on&i12_BZ2A=A1&i12_BZ1A=A2&i12_EZ2A=A3&i12_HZ9A=A8&i12_HH9A=A9&i12_FG4A=B1&i12_DZ4A=B2&i12_LD4A=B3&i12_TZ4A=B8&i12_TH4A=B9&i12_TH4A=XXXX&s13_text=&s13=BZ2A.BZ1A.EZ2A.HZ9A.HH9A.FG4A.DZ4A.LD4A.TZ4A.TH4A.&SEARCH%5Bi54%5D=&SEARCH%5Bi71%5D=&SEARCH%5Bi72%5D=&SEARCH%5Bi73%5D=&SEARCH%5Bi74%5D=&SEARCH%5Bi31%5D=&SEARCH%5Bi33%5D=&SEARCH%5B</div><div data-bbox=)

i32%5D=&SEARCH%5Bi86%5D=&SEARCH%5Bi87al1%5D=&SEARCH%5Btype%5D=&B1=%CF%EE%E8%F1%EA (дата обращения: 7.09.2015).

20. Козырев А. Н. Интеллектуальная собственность и конкуренция в космической отрасли: тезисы к заседанию круглого стола ЦЭМИ РАН (21 октября 2014 года) [Электронный ресурс] // Библиотека LABRATE.RU. URL: <http://www.labrate.ru/20141021/tezis.htm> (дата обращения: 15.09.2015).

21. Единая межведомственная информационно-статистическая система [Электронный ресурс]. URL: <http://www.fedstat.ru/indicator/data.do?id=39277> (дата обращения: 1.09.2015).

22. Анализ процесса выявления, формирования стоимости и правовой охраны нематериальных активов, созданных в процессе НИОКР : отчет по результатам проведения экспертизы бизнес-процесса // Внутренние НИОКР ОАО «ИСС» / Центр бизнес-консалтинга и аудита (ЦБА). М. : ЦБА, 2013. 18 с.

23. Полонская И. В., Мотылева В. Я. Зарубежное патентование объектов изобретений в современных условиях : учеб. пособие. М., 1998. 48 с.

24. Методические рекомендации по коммерциализации РИД путем введения их в оборот за рубежом. Отбор изобретений для патентования [Электронный ресурс]. URL: <http://scbist.com/scb/uploaded/raspornzd/2881-otbor-izobretenij-dlya-patentovaniya.htm> (дата обращения: 27.09.2015).

References

1. *Otchet o vypolnenii proekta realizatsii tekhnologicheskoy platformy "Natsional'naya informatsionnaya sputnikovaya sistema" v 2013 godu* [The report on the implementation of the project implementation of the technological platform "National Information Satellite Systems" 2013] (In Russ.). Available at: <http://tp.iss-reshetnev.ru> (accessed 9.08.2015).
2. *Strategicheskaya programma issledovaniy tekhnologicheskoy platformy "Natsional'naya informatsionnaya sputnikovaya sistema" na 2014–2020 gody* [Strategic research program technological platform "National Information Satellite Systems" for 2014–2020] (In Russ.). Available at: <http://tp.iss-reshetnev.ru> (accessed 19.09.2015).
3. *Otchet o vypolnenii proekta realizatsii tekhnologicheskoy platformy "Natsional'naya informatsionnaya sputnikovaya sistema" v 2014 godu* [Report on the implementation of the project implementation of the technological platform "National Information Satellite Systems" 2014] (In Russ.). Available at: <http://tp.iss-reshetnev.ru> (accessed 9.08.2015).
4. *Proekt strategicheskoy programmy issledovaniy tekhnologicheskoy platformy "Natsional'naya informatsionnaya sputnikovaya sistema" na 2012–2020 gody* [The project of a strategic research program technological platform "National Information Satellite Systems" in 2012–2020 years] (In Russ.). Available at: <http://tp.iss-reshetnev.ru> (accessed 9.08.2015).
5. Krylov A. *Sputnikovye sistemy svyazi i veshchaniya. Sostoyanie i perspektivy razvitiya* [Satellite communications and broadcasting. Status and prospects of development] (In Russ.). Available at: http://mosspaceclub.ru/3part/krilov_2.pdf (accessed 20.09.2015).
6. *Obshchie tendentsii razvitiya kosmicheskoy deyatel'nosti* [General trends in the development of space activities] (In Russ.). Available at: http://www.bayterek.kz/info/space_activities.php (accessed 15.08. 2015).
7. *Tendentsii razvitiya kosmonavtiki v mire* [Trends in the development of astronautics in the world] (In Russ.). Available at: <http://www.sovkos.ru/cosmos/information/025.html> (accessed 29.08.2015).
8. *Satellite industry association*. Available at: <http://www.sia.org/> (accessed 1.10.2015).
9. *State of the Satellite Industry Report*. May 2015. Available at: <http://www.sia.org/wp-content/uploads/2015/06/Mktg15-SSIR-2015-FINAL-Compressed.pdf> (accessed 1.10.2015).
10. Krylov A. *Proizvodstvo i ekspluatatsiya sputnikov svyazi i veshchaniya* [Production and operation of satellite communications and broadcasting] (In Russ.). Available at: http://mosspaceclub.ru/3part/krilov_3.pdf (accessed 20.09.2015).
11. *Federal'nyy institut promyshlennoy sobstvennosti (FIPS). Informatsionnye resursy. Mezhdunarodnye klassifikatsii. Izobreteniya* [Federal Institute of Industrial Property (FIPS). Informational resources. International Classifications. Invention] (In Russ.). Available at: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPC/IPC2015_extended_XML/?xml=http://www1.fips.ru/IPC2015_extended_XML/AIpc-20150101_subclass-B_XML\AIpc20150101-B64G.xml (accessed 9.09.2015).
12. 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 (accessed 9.09.2015).
13. *Rost chisla zayavok na registratsiyu ob''ektov intellektual'noy sobstvennosti v 2013 godu: Kitay lidiruet po chislu novykh patentnykh zayavok* [The growing number of applications for registration of intellectual property in 2013: China leads in the number of new patent applications] (In Russ.). Available at: http://www.wipo.int/pressroom/ru/articles/2014/article_0018.html (accessed 29.09.2015).
14. *World Intellectual Property Indicators – 2014 Edition*. Available at: <http://www.wipo.int/ipstats/en/wipi> (accessed 9.09.2015).
15. Polonskaya I. V. *Zarubezhnoe patentovanie ob''ektov promyshlennoy sobstvennosti* [Foreign patenting of industrial property]. Moscow, INIC "PATENT", 2011, 88 p.
16. *News from PR China. World Patent Information*. 2010. № 32. P. 75–76. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/01722190/40/supp/C> (accessed 20.08.2015).
17. *News from PR China. World Patent Information*. 2015. № 40. P. 62–64. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/01722190/40/supp/C> (accessed 7.09.2015).
18. *Evraziyskaya patentnaya organizatsiya (EAPO). Godovoy otchet 2013 goda* [The Eurasian Patent Organization (EAPO). Annual Report 2013] (In Russ.).

Available at: http://www.eapo.org/pdf/home/report/eapo_2013.pdf (accessed 9.09.2015).

19. *Evraziyskaya patentnaya organizatsiya (EAPO)*.

Evraziyskiy server publikatsiy [The Eurasian Patent Organization (EAPO). Eurasian publishing server] (In Russ.). Available at: [20. Kozyrev A. N. *Tezisy k zasedaniyu kruglogo stola TsEMI RAN \(21 oktyabrya 2014 goda\) "Intellektual'naya sobstvennost' i konkurentsiya v kosmicheskoy otrassli"* \[Abstracts of the meeting of the Round Table of the RAS family \(21 October 2014\) "Intellectual property and competition in space industry"\] \(In Russ.\). Available at: <http://www.labrate.ru/20141021/tezis.htm> \(accessed 15.09. 2015\).](http://www.eapo.org/ru/publications/publicat/search.php?SEARCH%5Bid%5D=&SEARCH%5Bi21%5D=&SEARCH%5Bi51%5D=B64G&rDate=0&fYear=2015&fMont=&lYYear=2015&lMont=&SEARCH%5Bbull%5D=&selectAll=on&i12_BZ2A=A1&i12_BZ1A=A2&i12_EZ2A=A3&i12_HZ9A=A8&i12_HH9A=A9&i12_FG4A=B1&i12_DZ4A=B2&i12_LD4A=B3&i12_TZ4A=B8&i12_TH4A=B9&i12_TH4A=XXXX&s13_text=&s13=.BZ2A.BZ1A.EZ2A.HZ9A.HH9A.FG4A.DZ4A.LD4A.TZ4A.TH4A.TH4A&SEARCH%5Bi54%5D=&SEARCH%5Bi71%5D=&SEARCH%5Bi72%5D=&SEARCH%5Bi73%5D=&SEARCH%5Bi74%5D=&SEARCH%5Bi31%5D=&SEARCH%5Bi33%5D=&SEARCH%5Bi32%5D=&SEARCH%5Bi86%5D=&SEARCH%5Bi87al1%5D=&SEARCH%5Btype%5D=&B1=%CF%EE%E8%F1%EA (accessed 7.09.2015).</p></div><div data-bbox=)

21. *Edinaya mezhvedomstvennaya informatsionno-statisticheskaya sistema* [United interagency information

and statistical system] (In Russ.). Available at: <http://www.fedstat.ru/indicator/data.do?id=39277> (accessed 1.09.2015).

22. *Analiz protsessov vyvavleniya, formirovaniya stoimosti i pravovoy okhrany nematerial'nykh aktivov, sozdannykh v protsesse NIOKR. Otchet po rezul'tatam provedeniya ekspertiz biznes-protsessov: Vnutrennie NIOKR OAO "ISS"* [Analysis of the process of identification, formation costs and legal protection of intangible assets created during research and development. Report on the results of the examination of the business process: Internal R & D JSC "ISS"]. Moscow, CBA, 2013, 18 p. (In Russ.).

23. Polonskaya I. V., Motyleva V. Ya. *Zarubezhnoe patentovanie ob'ektov izobreteniy v sovremennykh usloviyakh* [Foreign patenting of inventions of objects in present-day conditions]. Moscow, 1998, 48 p.

24. *Metodicheskie rekommendatsii po kommersializatsii RID putem vvedeniya ikh v oborot za rubezhom. Otbor izobreteniy dlya patentovaniya* [Guidelines for commercialization of RIA by introducing into circulation abroad. The selection of inventions for patenting] (In Russ.). Available at: <http://scbist.com/scb/uploaded/raspor-rzd/2881-otbor-izobretenij-dlya-patentovaniya.htm> (accessed 27.09.2015).

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕЖДУНАРОДНОГО ОПЫТА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОГРАММНО-ЦЕЛЕВОГО
ПОДХОДА В РЕГИОНАЛЬНОМ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОМ РАЗВИТИИ
(НА ПРИМЕРЕ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ)**

А. А. Лукьянова*, Е. С. Кононова

Красноярский государственный педагогический университет им. В. П. Астафьева
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, ул. Ады Лебедевой, 89
*E-mail: aaluk110@mail.ru

Рассматривается опыт реализации программно-целевого подхода в государственном управлении социально-экономическим развитием таких стран, как США, Франция, Япония, Китай. Обобщается зарубежный опыт и приводятся рекомендации по применению данного опыта на территории региона сырьевой направленности – Красноярского края. Анализируются достоинства и недостатки программно-целевого подхода в контексте его реализации на территории России.

Предметом исследования, результаты которого отражены в настоящей статье, являются управлеческие отношения, возникающие в процессе реализации целевых программ социально-экономического развития в различных странах мира.

Целью данной статьи является выработка рекомендаций по реализации программно-целевого подхода в государственном управлении социально-экономическим развитием Красноярского края и иных регионов России, обладающих сходными с ним специфическими чертами.

Теоретической и методологической основой исследования, результаты которого отражены в статье, послужили фундаментальные труды зарубежных и отечественных авторов в области теории и практики реализации целевых программ социально-экономического развития.

Исследование показало, что на сегодняшний день в Красноярском крае может с успехом применяться опыт ведущих зарубежных стран в реализации программно-целевого подхода как в части формирования программ, так и в части поиска источников их финансирования. Следует отметить, что на сегодняшний день положительный опыт реализации целевых программ на территории Красноярского края имеется в аэрокосмической отрасли.

В результате исследования выработаны рекомендации по реализации программно-целевого подхода в процессе государственного управления социально-экономическим развитием Красноярского края, учитывающие специфические особенности региона. Результаты исследования послужат основой для формирования эффективных целевых программ социально-экономического развития Красноярского края и могут использоваться при формировании механизмов государственного управления социально-экономическим развитием других регионов сырьевой направленности.

Ключевые слова: государственное управление, программно-целевой подход, социально-экономическое развитие, источники финансирования, промышленность.

Vestnik SibGAU
Vol. 17, No. 1, P. 241–246

**APPLICATION OF INTERNATIONAL EXPERIENCE IN THE IMPLEMENTATION
OF PROGRAM-TARGET APPROACH IN REGIONAL SOCIO-ECONOMIC DEVELOPMENT
(ON THE EXAMPLE OF KRASNOYARSK REGION)**

А. А. Lukyanova*, Е. С. Kononova

Krasnoyarsk State Pedagogical University named after V. P. Astafiev
89, Ada Lebedevs Str., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation
*E-mail: aaluk110@mail.ru

The article discusses the experience of implementing the program-target approach in public administration of socio-economic development of countries such as USA, France, Japan, and China. The authors summarized international experience and recommendations for use of this experience in the region of the material orientation – Krasnoyarsk region, analyzes the advantages and disadvantages of program-target approach in the context of its implementation in Russia.

The subject of the study, the results of which are reflected in this material is management relations arising in the implementation of targeted programs for socio-economic development in different countries.

The purpose of this article is to make recommendations on the implementation of program-target approach in public administration socio-economic development of the Krasnoyarsk territory and other regions of Russia, with similar specific features.

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 theory and practice of realization of target programs of social and economic development.

The study showed that today in Krasnoyarsk region the experience of the leading countries in the implementation of program-target approach in terms of the formation programs and in the search for sources of funding can be successfully applied. It should be noted that to date the positive experience of the implementation of targeted program on the territory of Krasnoyarsk region has in the aerospace industry.

In conclusion, recommendations for the implementation of program-target approach in the process of public administration of socio-economic development of Krasnoyarsk region, taking into account the specific characteristics of the region are given. The results of the study will serve as a basis for creating effective targeted programs for socio-economic development of the Krasnoyarsk region and can be used in the formation of mechanisms of state management of social and economic development of other regions of the material orientation.

Keywords: governance, program and target approach, the socio-economic development, sources of funding, industry.

Введение. В настоящее время социально-экономическое развитие регионов нуждается в выработке эффективных инструментов государственного управления социально-экономическим развитием, поскольку рыночные механизмы регулирования не могут обеспечить поступательное устойчивое социально-экономическое развитие. Особенno остро данная тенденция проявляется в регионах сырьевой специализации, где наблюдается несбалансированная структура промышленного сектора, достаточно успешное развитие добывающих отраслей при отставании отраслей высоких переделов и инновационных производств. К таким регионам относится и рассматриваемый в данной статье Красноярский край.

В качестве приоритетных направлений государственного управления в регионах, обладающих выраженной сырьевой направленностью, можно назвать:

- стимулирование наукоемких и инновационных производств, стимулирование развития отраслей промышленности, продукция которых характеризуется высоким текущим либо прогнозируемым спросом на внутреннем и внешнем рынках;
- масштабная диверсификация промышленного сектора региона, формирование отраслевой структуры региональной экономики, основанной на обрабатывающих секторах, инновационных и высокотехнологичных производствах;
- развитие инфраструктурных направлений (транспорт, связь, дорожное хозяйство, научная и образовательная деятельность);
- поддержка и развитие малого и среднего бизнеса;
- создание условий благоприятствования для привлечения инвестиций в развитие приоритетных для региона отраслей экономики;
- формирование механизмов стимулирования природоохранной деятельности и снижения антропогенного влияния на окружающую среду.

Анализ отечественных и зарубежных источников показал, что на сегодняшний день одним из достаточно эффективных методов реализации приоритетных

направлений государственного управления является программно-целевой подход.

В данной статье рассматривается зарубежный опыт реализации целевых программ различной направленности и даются рекомендации по адаптации и применению данного опыта в одном из крупнейших регионов Российской Федерации – Красноярском крае.

Зарубежный и отечественный опыт реализации целевых программ социально-экономического развития. В рамках регулирования социально-экономического развития регионов сырьевой направленности одну из ключевых ролей играет стимулирование инновационных разработок, внедряемых во все сферы экономики государства и регионов. Таким образом, рассмотрим опыт ведущих государств в области программно-целевого финансирования инновационных исследований и разработок.

В США основой активизации инновационной деятельности является развитие малых и средних предприятий. На сегодняшний день в США действует ряд программ, направленных на удовлетворение потребностей государства в специальных исследованиях и разработках. К наиболее масштабным программам относятся Программа инновационных исследований в малом бизнесе (The Small Business Innovation Research, SBIR) и Программа трансфера технологий малого бизнеса (The Small Business Technology Transfer Program, STTR). Кроме того, в рамках государственного регулирования инновационного социально-экономического развития в США активно применяются налоговые льготы в части исключения из налогообложения затрат на приобретение отдельных видов оборудования, изготовление опытных образцов, осуществление технологических испытаний и т. д. [1, с. 215]

Действует в США и еще ряд более мелких программ, направленных на стимулирование инновационной активности в секторе малого и среднего бизнеса, а также в секторе более крупных предприятий [2, с. 196].

Предприятия, участвующие в программах, отбираются на конкурсной основе в соответствии с утвержденными требованиями к организационно-правовой форме, рентабельности, количеству занятых и т. д. [3, с. 311].

Не менее интересным является опыт Японии в реализации программно-целевого финансирования инновационного развития экономики.

Начиная с 80-х годов XX столетия основным курсом экономической политики Японии стало создание крупных научно-исследовательских центров, нацеленных на решение ключевых задач, определенных правительством страны. В 1983 г. была принята концепция развития технополисов, темпы экономического роста которых на сегодняшний день опережают средние показатели по стране. Технопарки и технополисы, созданные на территории Японии в рамках упомянутой концепции, в настоящее время развиваются в соответствии со следующими целевыми программами [4, с. 254]:

- план развития технополисов, обеспечивающий предоставление субсидий, займов под процент ниже рыночного, льготы по оплате аренды помещений и промышленных площадей;
- план размещения научного производства, предусматривающий территориальную специализацию производств;
- план базовых исследований, в соответствии с которым осуществляется государственная поддержка предприятий на начальном этапе их развития.

Специфической для Японии чертой программно-целевого подхода в регулировании социально-экономического развития является высокая роль местного самоуправления, законодательством страны предусмотрены возможности предоставления приоритетным для региона предприятиям и отраслям дополнительных льгот, субсидий, займов за счет средств региональных бюджетов. По нашему мнению, предоставление региональным властям большей самостоятельности в принятии решений о финансировании тех или иных предприятий, отраслей или конкретных разработок повышает эффективность программно-целевого метода, так как позволяет адаптировать те или иные программы под нужды конкретного региона.

Предпринимаемые Японией меры позволили существенно увеличить объем коммерциализации инновационных разработок, вовлечь в сферу инновационного производства большое количество предприятий. Так, на сегодняшний день более 60 % производственных предприятий Японии вовлечены в инновационные исследования и разработки [5, с. 20].

Франция приступила к внедрению программ целевого финансирования в процесс регулирования экономики в 2001 г. Первым этапом стало принятие конституционного закона о государственных финансах, после чего начался процесс перехода от традиционной бюджетной системы к системе, ориентированной на результат. Была сформирована трехуровневая система бюджетных расходов. Первый уровень представлен 34 миссиями, отражающими основные направления государственной политики в среднесроч-

ной и долгосрочной перспективе. Бюджет проходит одобрение парламентом именно на уровне миссий. На втором уровне системы представлены порядка 140 программ, включающих комплекс мероприятий по каждой из миссий, стратегию и целевые показатели. Третий уровень – это 500 подпрограмм и видов деятельности, детализирующих целевые показатели и распределение ресурсов бюджета. Поскольку миссии могут относиться к компетенции различных министерств и ведомств, формирование программ осуществляется на межведомственном уровне. Однако ответственным за реализацию программы в любом случае назначается только одно министерство или ведомство, что позволяет обеспечивать оперативность и действенность контроля. Руководитель программы должен неукоснительно следовать ее целям и отчитываться за управление расходами по программе. Критериями, на основании которых оценивается реализация программы, являются:

- социальная и экономическая результативность;
- качество услуг;
- эффективность [6, с. 242].

Этапы программы реализуются в соответствии с годичными планами. По завершении бюджетного года руководители программ составляют годовые отчеты по той же форме, что и планы реализации программ.

Рассмотренные нами примеры являются образцами применения программно-целевого подхода в развитых странах, имеющих многолетний опыт функционирования в рамках рыночных условий хозяйствования.

Интересным с точки зрения применения методов государственного регулирования социально-экономического развития и программно-целевого подхода к стимулированию развивающейся экономики является опыт Китайской Народной Республики. Важным с точки зрения применения опыта данного государства в рамках Российской Федерации является то, что КНР является примером развития инновационных производств в стране с преимущественно социалистическим укладом экономики.

Программа инноваций в социально-экономической сфере начала действовать в КНР в начале 80-х гг. ХХ в. Приоритетным направлением ее реализации стало создание научных парков. С этой целью государством безвозмездно выделялись значительные земельные площади, осуществлялось масштабное государственное финансирование создания бизнес-инкубаторов и технологических зон. Основным критерием отбора для участия организации в деятельности технопарка было наличие у нее передовых технологических разработок, возможностей их внедрения, экспортная ориентация производства.

На сегодняшний день в КНР действует более 500 бизнес-инкубаторов, более 50 технопарков и порядка 1500 центров производственной поддержки, деятельность которых направлена на повышение эффективности предприятий, задействованных в сфере разработки и внедрения инноваций [7, с. 143].

В 1986 г. правительством КНР была утверждена Государственная программа 863, в соответствии

с которой приоритетными отраслями определены такие сферы промышленного производства, как аэрокосмическая, микроэлектроника, новые энергосберегающие технологии, природоохранные технологии, информатика, связь, медицинское оборудование [7, с. 144].

Источниками финансирования внедрения научно-технических достижений в КНР являются государственные льготные кредиты, инвестиции, а также собственные средства организаций. Кроме того, предприятия и организации, функционирующие в рамках технопарков и бизнес-инкубаторов, пользуются такими преимуществами, как временное освобождение от подоходного налога либо льготы по его уплате, освобождение от таможенных пошлин на приобретаемое оборудование и т. д. Кроме того, муниципалитеты, на территории которых расположены технопарки и бизнес-инкубаторы, также обладают определенной самостоятельностью и могут устанавливать дополнительные льготы и субсидии для развития тех или иных направлений деятельности.

Следует отметить, что наиболее популярным программно-целевой подход в нашей стране был в 70–80-е гг. XX в., когда в процесс разработки и реализации программ были вовлечены все властные и управленические структуры. В последующие годы от данного метода практически отказались. Причины фактического отказа от применения данного метода, по нашему мнению, очень точно описаны В. Н. Лексиным: «Отсутствие четкого понимания тогдашним руководством сути программно-целевых методов и их превращение в предмет очередной политической кампании в значительной мере дискредитировали саму идею программного регулирования. Кроме того, в общественном сознании программы 70–80-х годов так тесно сплелись с планами, что в первое время после начала радикальных экономических реформ любые попытки применения программной идеологии к формирующейся в России рыночной экономике встречались “в штыки”, ибо трактовались как возврат к прошлому» [8, с. 294–295].

Сейчас применение программно-целевого подхода в России вновь набирает обороты, что связано, по нашему мнению, с постепенным осознанием того факта, что не все процессы в социально-экономическом развитии успешно регулируются с помощью рыночных механизмов, и для достижения успеха необходимо активное сотрудничество частного и государственного секторов экономики.

Особенности применения программно-целевого подхода в России. Анализ зарубежного опыта применения программно-целевого подхода при осуществлении государственного управления социально-экономическим развитием показал, что данный метод при реализации в России может быть сопряжен с рядом ограничений, связанных со следующими факторами:

1) сложность осуществления мониторинга целевого использования ресурсов и результативности программы ввиду длительного срока реализации и фактора «отложенности» результата;

2) слабая персональная ответственность участников реализации программы за результативность программы;

3) возникновение недостатка финансовых ресурсов в ходе реализации программы ввиду изменения параметров внешней среды и внутренних факторов социально-экономической системы;

4) недостаточная проработанность процедуры независимой экспертизы целевых программ;

5) высокая коррупционность метода [9, с. 238].

Одной из наиболее труднопреодолимых проблем, возникающих при реализации программно-целевого подхода в нашей стране, является поиск источников финансирования.

Применение зарубежного опыта реализации программно-целевого подхода при формировании источников финансирования целевых программ. По нашему мнению, достаточно перспективным для Красноярского края может стать использование опыта финансирования социально-экономического развития штата Аляска, поскольку данный регион США имеет некоторое сходство с Красноярским краем в части климатических условий, территориального положения, обеспеченности природными ресурсами (в частности, нефтяными месторождениями).

В 1960–1970-е гг. в штате Аляска были внедрены существенные изменения нормативно-правового регулирования недропользования, в соответствии с которыми все земли штата были распределены следующим образом: в собственности федерального правительства оказались 60 % земель (7 % из которых – земли федерального нефтяного резерва), 27 % земель переданы в собственность штата Аляска, коренным жителям штата переданы 12 % земель, частным собственникам – примерно 1 % [10; 11].

Следует отметить, что в результате реализации программы распределения прав на недропользование и системы изъятия нефтяной ренты с конца 1970-х годов по настоящее время штат Аляска получил более 70 млрд долл. прибыли, существенная часть которой была направлена на финансирование производственной, социальной и инфраструктурной составляющей, а также на решение экологических проблем и создание Постоянного фонда штата, в котором предполагалось аккумулировать часть изымаемой у нефтедобывающих предприятий природной ренты, получаемой за счет эксплуатации нефтяных месторождений штата и шельфовой зоны [12, с. 18].

В соответствии с нормативным актом, разработанным органами власти штата, примерно 25 % [13, с. 194] всех доходов штата от рентных, лицензионных платежей, роялти и иных ресурсных платежей в части, принадлежащей штату, должны направляться в Постоянный фонд, который предназначен для осуществления развития штата, когда основные запасы нефтяных ресурсов будут исчерпаны (ср. с существующим на сегодняшний день в Российской Федерации Фондом национального благосостояния). Средства фонда расходуются на развитие высокодоходных отраслей промышленности, развитие инфраструктуры и социальные программы. Опыт штата Аляска, по нашему мнению, может с успехом применяться и в других регионах сырьевой направленности, в частности, в Красноярском крае.

Заключение. Обобщая зарубежный опыт применения программно-целевых методов государственного регулирования социально-экономического развития, следует отметить, что он достаточно широко применяется как в странах с развитой рыночной экономикой, так и в странах с преимущественно социалистическим типом экономики [14, с. 115]. Данный факт подтверждает выдвинутый нами тезис о том, что переход государства к устойчивому типу социально-экономического развития без активного государственного регулирования ряда процессов невозможен. Кроме того, опыт иностранных государств свидетельствует также о том, что метод программно-целевого финансирования на сегодняшний день является одним из наиболее эффективных методов стимулирования одной из ключевых сфер устойчивого развития экономики – сферы инноваций. Отдельные аспекты рассмотренных нами примеров применения различных государственных программ, по нашему мнению, могут с успехом применяться и в исследуемом нами регионе. В частности, на территории Красноярского края может с успехом внедряться опыт КНР по формированию бизнес-инкубаторов, а также опыт США и Японии по развитию малых предприятий.

Как показало проведенное исследование, сферы практического применения программно-целевого подхода в рамках государственного управления социально-экономическим развитием регионов весьма разнообразны. Целевые программы могут быть направлены на решение проблем рационального природопользования, ускорение экономического роста, изменение структуры промышленности региона, повышение уровня доступности образования и здравоохранения, формирование «полюсов роста» на территории региона и т. д. [15, с. 184–186].

Библиографические ссылки

1. Bryson I. Strategic planning for public and nonprofit organization. San Francisco : Jossey-Bass Publishers, 1995. P. 4.
2. Джонстон Д. Международный нефтяной бизнес: налоговые системы и соглашения о разделе продукции : пер. с англ. М. : Олимп – Бизнес, 2000. 352 с.
3. Шувалов С. С. Оценка эффективности федеральных целевых программ: опыт США // Проблемы информационной экономики : сб. науч. тр. Вып. VII. Стратегия инновационного развития российской экономики / под ред. Р. М. Нижегородцева. М. : ЛИБРОКОМ, 2008. С. 128–142.
4. Силкина Е. В. Зарубежный опыт государственного регулирования инновационной деятельности // Инновационные технологии и системы : материалы междунар. форума. Минск : ГУ «БелИСА», 2006. 368 с.
5. Гаскаров А. Р. Целевые программы как инструмент обеспечения финансово-экономической устойчивости субъекта Российской Федерации (на примере Республики Башкортостан) : автореф. дис. ... канд. экон. наук. М., 2007. 34 с.
6. Официальный сайт 7-й рамочной программы Евросоюза [Электронный ресурс]. URL: <http://cordis.europa.eu> (дата обращения: 08.09.2015 г.).

7. Калягин В. О., Наумов В. Б., Никифорова Т. С. Опыт Европы, США и Индии в сфере государственной поддержки инноваций // Российский юридический журнал. 2011. № 1 (76). С. 143–148.

8. 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.

9. 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.

10. Брюйн Х. Управление по результатам в государственном секторе : пер. с англ. М. : Институт комплексных стратегических исследований, 2005. 192 с.

11. Горемыкина Л. Е. Тенденции инновационных процессов в ведущих индустриальных странах. М. : РАН, Институт системного анализа, 1993. 32 с.

12. Results for Canadians: A Management Framework for the Government of Canada [Electronic resource]. URL: www.oag-bvg.gc.ca (дата обращения: 08.09.2015).

13. Гранберг А. Г. Региональное развитие: опыт России и Европейского союза. М. : Экономика, 2000. 316 с.

14. Ларина Н. И., Колесников А. А. Региональная политика в странах рыночной экономики. М. : Экономика, 1998. 358 с.

15. Гранберг А. Г., Данилов-Данильян В. И., Циканов М. М. Стратегия и проблемы устойчивого развития России в XXI веке. М. : Экономика, 2011. 310 с.

References

1. Bryson I. Strategic planning for public and nonprofit organization. San Francisco: Jossey-Bass Publishers, 1995, P. 4.
2. Dzhonston D. Mezhdunarodnyi neftyanoj biznes: nalogovye sistemy i soglasheniya o razdelenii produktseii [International oil business: the tax system and of the agreement on production sharing]. Moscow, Olimp – Biznes Publ., 2000, 352 p.
3. Shuvalov S. S. [Evaluation of the effectiveness of Federal programs: the US experience] Problemy informatsionnoi ekonomiki. Vyp. VII. Strategiya innovatsionnogo razvitiya rossiiskoi ekonomiki: Sb. nauch. trudov [The problems of the information economy. Vol. VII. Strategy of innovative development of Russian economy: FR. scientific. works]. Moscow, Knizhnyi dom “LIBROKOM” Publ., 2008, P. 128–142.
4. Silkina E. V. [Foreign experience of state regulation of innovative activity] Materialy mezhdunarodnogo foruma “Innovatsionnye tekhnologii i sistemy” [Proceedings of the international forum “Innovative technologies and systems”]. Minsk, GU “BelISA” Publ., 2006, 368 p. (In Russ.)
5. Gaskarov A. R. Tselevye programmy kak instrument obespecheniya finansovo-ekonomicheskoi ustoichivosti sub'ekta Rossiiskoi Federatsii (na primere Respubliki Bashkortostan) [Target program as a tool to ensure financial and economic stability of the Russian

Federation (on the example of the Republic of Bashkortostan)]. The dissertation on competition of a scientific degree of candidate of economic Sciences, Moscow, 2007, 34 p.

6. The official website of the 7th framework program of the European Union. Available at: <http://cordis.europa.eu> (accessed 08.09.2015)

7. Kalyatin V. O., Naumov V. B., Nikiforova T. S. [Experience in Europe, USA and India in the sphere of state support of innovation]. *Rossiiskii Yuridicheskii Zhurnal*. 2011, Vol. 1 (76), P. 143–148. (In Russ.).

8. 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, Knizhnyi dom "LIBROKOM" Publ., 2012, 368 p.

9. 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, Vol. 1, P. 235–238 (In Russ.).

10. Bryuin Kh. *Upravlenie po rezul'tatam v gosudarstvennom sektore* [Performance management in the public sector]. Moscow, Institut kompleksnykh strategicheskikh issledovanii Publ., 2005, 192 p.

11. Goremykina L. E. *Tendentsii innovatsionnykh protsessov v vedushchikh industrial'nykh stranakh*. [Trends of innovation processes in the leading industrial countries]. Moscow, RAN, Institut sistemnogo analiza Publ., 1993, 32 p.

12. *Results for Canadians: A Management Framework for the Government of Canada*. Available at: <http://www.oag-bvg.gc.ca> (accessed 08.09.2015).

13. Granberg A. G. *Regional'noe razvitiye: opyt Rossii i Evropeiskogo Soyuza* [Regional development: the experience of Russia and the European Union]. Moscow, Ekonomika Publ., 2000, 316 p.

14. Larina N. I. *Regional'naya politika v stranakh rynochnoi ekonomiki* [Regional policy in the countries of market economy]. Moscow, Ekonomika Publ., 1998, 358 p.

15. 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.

© Лукьянова А. А., Кононова Е. С., 2016

**МЕТОДЫ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РИСКОВ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ
ПРЕДПРИЯТИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

В. Н. Товстоношенко, А. В. Медведев

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

Ракетно-космическая промышленность – одна из отраслей экономики страны, имеющая научный и инновационный потенциал. Предприятия ракетно-космической промышленности являются высокотехнологичными, многопрофильными, производящими инновационную продукцию, не просто конкурентоспособную на внешнем рынке, но и превосходящую многие западные аналоги. Развитие инновационной деятельности предприятий является важнейшим условием для решения проблемы обеспечения обороноспособности страны. Инновационная деятельность осуществляется в условиях неопределенности, что обуславливает возникновение рисков, связанных с недофинансированием проектов, с нестабильной экономической ситуацией в стране, с напряженной geopolитической обстановкой в мире. В связи с этим встает вопрос о выборе инструментов управления рисками на каждом этапе инновационного процесса, что позволит сократить потери и повысить эффективность инновационной деятельности предприятий ракетно-космической промышленности. В ходе исследования были рассмотрены различные методы управления рисками, включающие оценку и прогнозирование рисков. Оценка и прогнозирование рисков может осуществляться как на основе количественных методов, так и с использованием качественных методов. Рассматриваются количественные методы, с помощью которых определяется численное значение вероятности наступления рисковых событий и их последствий, осуществляется количественная оценка степени риска и устанавливается допустимый в данной ситуации уровень. Предложенные количественные методы оценки и прогнозирования рисков во взаимосвязи друг с другом позволяют предвидеть неблагоприятный исход развития события в процессе инновационной деятельности предприятий ракетно-космической промышленности, а также получить численную оценку рискованности проекта, определить степень влияния факторов риска на его эффективность.

Ключевые слова: инновационная деятельность, неопределенность, риск, управление риском, оценка риска, методы прогнозирования риска.

Vestnik SibGAU
Vol. 17, No. 1, P. 247–251

**METHODS OF ASSESSMENT AND FORECASTING THE RISKS OF INNOVATIVE ACTIVITY
OF THE ENTERPRISES OF ROCKET AND SPACE INDUSTRY**

V. N. Tovstonoshenko, A. V. Medvedev

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

Rocket and space industry is one of the sectors of the economy with research and innovation potential. The rocket and space industry is high-tech, diversified, producing innovative products not only competitive on the external market, but also superior to many Western counterparts. The development of innovative activity of enterprises is an important condition for solving problems of ensuring the country's defense. The innovative activities are carried out in conditions of uncertainty, which leads to the occurrence of risks related to the underfunding of projects, with the unstable economic situation in the country, with the tense geopolitical situation in the world. It raises the question about the choice risk management tools at each stage of the innovation process, allowing reducing losses and increasing the efficiency of innovative activity enterprises of rocket and space industry. The study examined various risk management methods including the evaluation and prediction risks. Evaluation and prediction of risks can be performed on the basis of quantitative methods, and using qualitative methods. The article discusses quantitative methods, which is determined by the numerical value of the probability of occurrence of risk events and their consequences; a quantitative assessment of the risk degree is established and valid in the situation. The proposed quantitative methods to assess and forecast

risks in conjunction with each other will allow to anticipate adverse outcome events in the process of innovative activity enterprises of space-rocket industry, as well as to obtain a numerical assessment riskiness of the project, to determine the degree of influence risk factors on its efficiency.

Keywords: innovation, uncertainty, risk, management risk, risk assessment, methods of risk prediction.

Введение. Ракетно-космическая промышленность, входящая в оборонно-промышленный комплекс России, занимает лидирующую позицию в мире по разработке и выпуску инновационных продуктов и технологий. Инновационный процесс сложен, состоит из множества этапов создания нового продукта и подвержен влиянию внешних и внутренних факторов.

К внутренним факторам, оказывающим негативное влияние на инновационную деятельность, относятся недостаточный контроль качества, сбои и поломка оборудования, принятие ошибочных управлений решений. Внешние факторы – нестабильная экономическая ситуация, напряженная geopolитическая обстановка в мире, изменчивость рыночной конъюнктуры, ценообразование. Негативные факторы являются источником возникновения ситуаций риска.

Каждая такая ситуация, не учтенная при разработке инновационного проекта, влияет на конечный результат вплоть до его свертывания. Для эффективной инновационной деятельности предприятиям необходимо научиться грамотно управлять рисками, т. е. вовремя учесть, оценить, спрогнозировать и принять меры по их ликвидации или уменьшению. Важную роль в управлении рисками играет их оценка и прогноз, которые можно осуществить, применяя специальные методы.

Характеристика методов оценки и прогнозирования. Оценка риска инновационной деятельности представляет собой совокупность мероприятий, позволяющих спрогнозировать возможные потери от возникших рисковых ситуаций при разработке и реа-

лизации инновационного проекта на предприятиях ракетно-космической промышленности. Прогнозирование (греч. prognosis – «знание наперед») – это род предвидения (предсказания), поскольку оно имеет дело с получением информации о будущем [1; 2]. Прогнозирование является исследованием конкретных перспектив развития инновационной деятельности предприятий ракетно-космической промышленности, которое не ставит задачу непосредственно осуществить на практике разработанные прогнозы, а оценить изменения состояния деятельности в будущем возможных путей развития.

Прогнозирование рисков предполагает определение факторов риска, характера и силы воздействия на инновационную деятельность предприятий, оценку направлений развития ситуации риска и прогнозирование последствий риска. Прогнозирование рисков может осуществляться как на основе количественных методов, так и с использованием качественных методов, базирующихся на оценках экспертов, т. е. менеджеров, умеющих предвидеть возможные изменения на каждом этапе инновационной деятельности предприятий. Методы оценки и прогнозирования рисков представлены в табл. 1.

В процессе прогнозирования на основе качественных методов могут быть выделены источники и причины риска; установлены потенциальные зоны и все возможные виды рисков; выявлены практические выгоды и негативные последствия, с которыми придется столкнуться предприятиям в процессе инновационной деятельности.

Таблица 1

Методы оценки и прогнозирования рисков инновационной деятельности

Группа методов	Характеристика методов	Методы
Качественные методы		
Экспертные методы	Процедура получения оценки риска с помощью опросов специально отобранных экспертов с последующим сведением результатов и предложений в систему, на базе которой делаются выводы	Мозговой штурм, тестовые листы, опросные листы, матрица рисков
Количественные методы		
Статистические методы	Для расчета возникающих потерь анализируются данные, касающиеся результатов осуществления инновационной деятельности	Аппарат теории вероятностей и математической статистики (вероятность, среднее значение, стандартное отклонение, закон распределения и т. д.)
Расчетно-аналитические методы	Позволяет прогнозировать различные сценарии развития событий, дающие возможность определить характер зависимости результата от изменения факторов	Метод сравнения, анализ безубыточности, дисконтирование и др.
Метод аналогий	Оценка риска производится в соответствии с некоторым аналогичным проектом или ситуацией; при этом считается, что поведение исследуемой системы будет таким же, как у аналога	Метод сценариев и др.

Вероятность свершения каждого из рисков различна, различен будет и ущерб (убытки). Одним из таких методов является матрица рисков, позволяющая оценить уровень рисков и отнести их к определенным группам на основании вероятности возникновения событий и последствий событий риска. Их количественная оценка позволит выделить риски, наиболее вероятные по возникновению и весомые по величине потерь, которые станут объектом дальнейшего анализа для принятия решения о целесообразности реализации инновационного проекта.

Количественные методы предполагают численное определение отдельных рисков и проекта в целом. С их помощью определяется численное значение вероятности наступления рисковых событий и их последствий, осуществляется количественная оценка степени (уровня) риска и устанавливается допустимый в данной ситуации уровень [3]. В рамках данной статьи рассмотрим количественные методы прогнозирования и их взаимосвязь.

Статистические методы. Статистические методы, основанные на аппарате теории вероятностей и математической статистики, обеспечивают наибольшую оценку степени риска при достаточно полной и достоверной информации. С их помощью изучается частота и вероятность появления рисковых ситуаций в инновационной деятельности. Одним из методов прогнозирования риска инновационной деятельности является среднее значение ожидаемого результата. Модели расчета показателей данного метода различаются в зависимости от предполагаемых вариантов их использования. Если результаты расчетов по наблюдаемым значениям будут экстраполированы в будущее без существенных изменений, то используется средняя действия риска. В случае коррекции наблюдаемых значений используется средневзвешенная величина из всех возможных значений результата и вероятностей его проявления [4; 5].

Количественная оценка прогнозирования риска может быть определена коэффициентом риска [6]. Одним из недостатков коэффициента риска является невозможность с его помощью учесть субъективные факторы. Так, например, отношение субъекта к соотношению возможных потерь и выигрыша в значительной степени зависит от его имущественного состояния. Поэтому на практике часто используют коэффициент риска, определяемый как отношение возможных максимальных потерь к объему собственных финансовых ресурсов. Величина этого коэффициента определяет риск свертывания проекта. Количественная оценка каждого вида риска и риска проекта принимает значение в интервале $0 \leq R \leq 1$.

В настоящее время отсутствуют научно обоснованные рекомендации по определению «приемлемости» того или иного уровня риска в конкретной ситуации. Вместе с тем при выработке стратегии поведения и в процессе принятия конкретного решения целесообразно различать и выделять определенные области (зоны риска) в зависимости от уровня возможных (ожидаемых) потерь. Попыткой ликвидировать указанные недостатки и дополнить информацией полученные оценки уровня риска в процессе принятия

управленческих решений является разработка и использование различного рода так называемых шкал риска, позволяющих классифицировать риски инновационной деятельности. Как и к большинству других вопросов, в литературе нет единого подхода к формулировке и критериям оценки шкалы риска. Многообразие показателей, посредством которых осуществляется количественная оценка риска, порождает и многообразие шкал риска, являющихся своего рода рекомендациями приемлемости того или иного уровня риска инновационной деятельности. На основании обобщения результатов исследований таких авторов, как В. М. Гранатуров, В. М. Кожухар, Н. В. Кузнецова, М. Г. Лапуста, Э. Е. Тихонов, по проблеме количественной оценки риска, приводится эмпирическая шкала риска, которую рекомендуется применять, когда в качестве количественной оценки риска используется вероятность наступления рискового события (табл. 2) [6–10].

Таблица 2
Эмпирическая шкала уровня риска

№ п/п	Вероятность нежелательного исхода (величина риска)	Наименование градаций риска
1	0,0–0,1	Допустимый
2	0,1–0,3	Средний
3	0,3–0,4	Высокий
4	0,4–0,6	Максимальный
5	0,6–0,8	Критический
6	0,8–1,0	Катастрофический

В практике существуют и другие виды эмпирической шкалы уровня риска, при помощи которых можно получить его количественную оценку, например, при помощи коэффициента вариации. Так как коэффициент вариации – относительная величина, то на его размер не оказывают влияние абсолютные значения изучаемого результата. Поэтому с его помощью можно сравнить даже колеблемость признаков, выраженных в разных единицах измерения. Диапазон изменения коэффициента вариации от 0 до 100 %. Чем больше величина показателя, тем сильнее колеблемость и риск инновационной деятельности предприятий. По физическому смыслу коэффициент вариации выражает количество риска на единицу доходности, т. е. по степени охвата деятельности он является комплексным. При этом приводятся следующие шкалы колеблемости (риска) коэффициента вариации [11; 12]: до 0,1 – слабая колеблемость (малый риск); от 0,1 до 0,25 – умеренная колеблемость (допустимый риск); выше 0,25 – высокая колеблемость (опасный риск). Рассмотренные шкалы риска применимы как для оценки приемлемости уровня отдельных рисков, так и для оценки риска проекта в целом. Статистические методы универсальны, позволяют оценить и спрогнозировать риск и применимы для всех предприятий, в том числе и для предприятий ракетно-космической промышленности. Но в то же время статистические методы имеют некоторый недостаток: при их использовании требуется большое количество данных временного ряда, и при изменении

каких-либо условий они не пригодны. Для учета таких изменений при оценке и прогнозировании рисковых ситуаций применяют более сложный математический аппарат, позволяющий провести более глубокий анализ риска и причин его возникновения с помощью расчетно-аналитических методов.

Расчетно-аналитические методы. Расчетно-аналитические методы являются математическими и основываются на функциональной связи между показателями. Они позволяют количественно оценить риск на основе статистических данных и обеспечивают приемлемую точность результатов. В рамках этой группы используются такие методы, как метод сравнений, анализ безубыточности, дисконтирование и др.

При методе сравнений изучаются изменения исследуемых объектов, тенденции и закономерности их развития:

- сравнение динамики показателей, т. е. сравниваются прогнозные значения риска с показателями прошлых периодов для определения тенденций развития инновационной деятельности предприятий;
- сравнение с базовыми значениями – сравнение прогнозных значений риска с базовыми показателями (фактическими);
- многомерные сравнения основаны на методе евклидовых расстояний, учитывающих не только абсолютные величины риска, но и степень их близости до показателей эталона.

Анализ безубыточности используется для оценки эффективности инновационной деятельности предприятий с помощью основных элементов – порога рентабельности, запаса финансовой прочности, силы воздействия операционного рычага, позволяющих установить критическую точку, ниже которой получаются потери.

Дисконтирование – способ учета риска изменения стоимости платежей во времени. В зависимости от того, каким методом учитывается неопределенность условий реализации инновационного проекта при определении ожидаемой чистой текущей стоимости, норма дисконта в расчетах эффективности может включать или не включать поправку на риск. Норма дисконта, не включающая премии на риск (безрисковая норма дисконта), отражает доходность альтернативных безрисковых направлений инвестирования. Норма дисконта, включающая поправку на риск, отражает доходность альтернативных направлений инвестирования, характеризующихся тем же риском, что и инвестиции в оцениваемый проект. В величине поправки на риск учитываются риски, связанные с реализацией инновационного проекта [13; 14]:

- страновой риск;
- риск ненадежности участников проекта;
- риск неполучения предусмотренных проектом доходов.

Расчетно-аналитические методы также универсальны и применимы для оценки и прогнозирования рисков инновационной деятельности предприятиями ракетно-космической промышленности. Данные методы не всегда дают возможность провести комплексный анализ риска по всем взаимосвязанным параметрам, так как каждый показатель предельного

уровня характеризует степень устойчивости в зависимости лишь от конкретного параметра проекта. Избежать недостатков позволяет метод аналогов, при котором одновременному непротиворечивому изменению подвергается совокупность факторов исследуемого проекта с учетом их взаимозависимости.

Метод аналогов. Метод аналогов используется для оценки и прогнозирования риска конкретного инновационного проекта на основе анализа базы данных о реализации аналогичных проектов и аналогичных условий их реализации. Также он позволяет учесть ошибки, последствия воздействия неблагоприятных факторов на инновационную деятельность предприятий, применяется как на отдельных стадиях инновационного процесса, так и по всему процессу в целом. Метод аналогов используется для расчета будущих показателей на основе прошлых с внесением определенных корректировок с помощью метода сценариев.

Метод сценариев предполагает описание всего множества возможных условий реализации проекта и отвечающих этим условиям затрат, результатов и показателей эффективности. Он дает возможность оценить вероятность наступления рисковой ситуации и возможные последствия для развития инновационной деятельности предприятий. В качестве возможных вариантов целесообразно построить как минимум три сценария: пессимистический, оптимистический и наиболее вероятный (реалистический, или средний). При рассмотрении каждого сценария можно получить возможный диапазон результатов, дав им вероятностную оценку и сравнить их. Если сценарий имеет наибольшую вероятностную оценку, то он считается рискованным, приносящим ущерб инновационной деятельности предприятий [15]. Поэтому из предложенных сценариев выбирается наиболее оптимальный с наименьшими потерями.

Метод аналогов универсален и может использоваться предприятиями ракетно-космической промышленности для оценки и прогнозирования возникновения рисковых ситуаций как для всей инновационной деятельности, так и для каждой её стадии.

Заключение. На основании исследования делаем вывод, что предложенные количественные методы оценки и прогнозирования рисков во взаимосвязи друг с другом позволяют предвидеть неблагоприятный исход развития события в процессе инновационной деятельности предприятий ракетно-космической промышленности, а также получить численную оценку рискованности проекта, определить степень влияния факторов риска на его эффективность.

Библиографические ссылки

1. Алексеева М. М. Планирование деятельности фирмы. М. : Финансы и статистика, 1997. 290 с.
2. Фатхутдинов Р. А. Инновационный менеджмент. СПб. : Питер, 2003. 400 с.
3. Вишняков Я. Д. Общая теория рисков. М. : Дашков и К, 2008. 368 с.
4. Просветов Г. И. Прогнозирование и планирование: задачи и решения. М. : Альфа-Пресс, 2008. 296 с.

5. Просветов Г. И. Управление рисками: задачи и решения. М. : Альфа-Пресс, 2008. 420 с.
6. Гранатуров В. М. Экономический риск: сущность, методы измерения, пути снижения. М. : Дело и сервис, 2010. 154 с.
7. Кожухар В. М. Инновационный менеджмент. М. : Дашков и К, 2011. 290 с.
8. Кузнецова Н. В. Управление рисками. Владивосток : Изд-во Дальневост. ун-та, 2004. 200 с.
9. Лапуста М. Г., Шаршукова Л. Г. Риски в предпринимательской деятельности. М. : Инфра-М, 2009. 503 с.
10. Тихонов Э. Е. Методы прогнозирования в условиях рынка. Невинномысск : Изд-во Северо-Кавказ. гос. техн. ун-та, 2006. 320 с.
11. Балдин К. В. Риск-менеджмент. М. : Эксмо, 2006. 368 с.
12. Ермасова Н. Б. Риск-менеджмент организаций. М. : Дашков и К, 2009. 380 с.
13. Чернова А. А. Управление рисками. М. : Просвет, 2009. 300 с.
14. Шапкин А. С., Шапкин В. А. Экономические и финансовые риски. Оценка, управление, портфель инвестиций. М. : Дашков и К, 2009. 544 с.
15. Мамаева Л. И. Управление рисками. М. : Дашков и К, 2009. 220 с.
5. Prosvetov G. I. *Upravlenie riskami: zadachi i resheniya*. [Risk management: challenges and solutions]. Moscow, Al'fa-Press Publ., 2008, 420 p.
6. Granaturov V. M. *Ekonomicheskiy risk: sushchnost', metody izmereniya, puti snizheniya*. [Economic risk: essence, methods of measurement, and ways of reduction]. Moscow, Delo i servis Publ., 2010, 154 p.
7. Kozhukhar V. M. *Innovatsionnyy menedzhment*. [Innovation management]. Moscow, Dashkov i K Publ., 2011, 290 p.
8. Kuznetsova N. V. *Upravlenie riskami*. [Risk management]. Vladivostok, Dal'nevostochnyy universitet Publ., 2004, 200 p.
9. Lapusta M. G., Sharshukova L. G. *Riski v predprinimatel'skoy deyatel'nosti*. [Risks in business]. Moscow, INFRA-M Publ., 2009, 503 p.
10. Tikhonov E. E. *Metody prognozirovaniya v usloviyakh rynka*. [Methods of forecasting in a market environment]. Nevinnomysk, Severo-Kavkazskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet Publ., 2006, 320 p.
11. Baldin K. V. *Risk-menedzhment*. [Risk management]. Moscow, Eksmo Publ., 2006, 368 p.
12. Ermasova N. B. *Risk-menedzhment organizatsii*. [Risk-management]. Moscow, Dashkov i K Publ., 2009. 380 p.
13. Chernova A. A. *Upravlenie riskami*. [Risk management]. Moscow, Prosver Publ., 2009, 300 p.
14. Shapkin A. S., Shapkin V. A. *Ekonomicheskie i finansovye riski. Otsenka, upravlenie, portfel' investitsiy*. [Economic and financial risks. Assessment, management, investment portfolio]. Moscow, Dashkov i K Publ., 2009, 544 p.
15. Mamaeva L. I. *Upravlenie riskami*. [Risk management]. Moscow, Dashkov i K Publ., 2009, 220 p.

References

1. Alekseeva M. M. *Planirovanie deyatel'nosti firmy*. [Planning of company's activity]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1997, 290 p.
2. Fatkhutdinov R. A. *Innovatsionnyy menedzhment*. [Innovation management]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2003, 400 p.
3. Vishnyakov Ya. D. *Obshchaya teoriya riskov*. [General theory of risk]. Moscow, Dashkov i K Publ., 2008, 368 p.
4. Prosvetov G. I. *Prognozirovanie i planirovanie: zadachi i resheniya*. [Forecasting and planning: challenges and solutions]. Moscow, Al'fa-Press Publ., 2008, 296 p.

КОНЦЕПЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ РЕГИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ ДЛЯ ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА РОССИИ

Е. Б. Химин^{1*}, Г. П. Беляков²

¹Сибирский федеральный университет, Институт экономики, управления и природопользования
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: e.himin@yandex.ru

Рыночные преобразования и интеграция экономики в состав мирового хозяйства обозначили необходимость перехода к интенсивному типу экономического развития. Императив интенсификации специфическим образом реализуется в кризисных условиях. Глубина рецессии, масштабы оттока капитала и состояние приоритетных факторов хозяйственного процесса, проявившиеся в современной кризисной экономической ситуации, дополнительно актуализируют необходимость интенсификации развития системы подготовки и переподготовки кадров для предприятий ОПК, в том числе и на региональном уровне.

В период реформирования российского общества по вопросам разграничения полномочий между федеральным центром и регионами особую значимость приобрели проблемы управления развитием территориальных форм жизнедеятельности, путей формирования и функционирования региональных социально-экономических комплексов.

Исследование проблем управления развитием системы подготовки и переподготовки кадров для предприятий ОПК региона на основе программного подхода показало, что возрастание роли и значимости региональной образовательной системы приводит к необходимости определения новых научных подходов, принципов формирования и реализации программ развития, совершенствования механизма реализации, разработки инструментов и мероприятий, что позволяет региональным органам управления системой подготовки кадров совместно с Министерством образования и науки РФ осуществить переход данной системы в новое качество – к образовательному федерализму, органически сочетающему в себе два процесса: регионализацию и интеграцию системы профессионального образования.

Предложенная концепция управления развитием региональной системы подготовки и переподготовки кадров для предприятий ОПК предполагает совершенствование существующей системы управления развитием профессиональной подготовки кадров для предприятий ОПК на региональном уровне на основе программно-проектного подхода как одного из основных механизмов реализации государственной инновационной политики и элементов инновационной инфраструктуры, направленных на развитие инновационной деятельности и формирование целостной инновационной системы профессионального образования с учетом приоритетов государственного инновационного развития на региональном уровне. Обоснована модель инновационного развития системы подготовки и переподготовки кадров для предприятий ОПК на региональном уровне с использованием программно-проектного подхода. Показана возможность через региональное планирование и программно-проектные формы его реализации обеспечивать наиболее эффективные формы интеграции власти, общественного мнения, образования, науки и бизнеса в инновационном обновлении ОПК Российской Федерации.

Ключевые слова: региональное управление, система подготовки и переподготовки кадров для предприятий ОПК, планирование, инновации, инновационное обновление, программно-проектный подход, менеджмент, результативно-ориентированный менеджмент.

Vestnik SibGAU
Vol. 17, No. 1, P. 252–259

THE CONCEPT OF MANAGEMENT DEVELOPMENT OF REGIONAL SYSTEM OF PERSONNEL TRAINING FOR THE MILITARY-INDUSTRIAL COMPLEX OF RUSSIA

E. B. Himin^{1*}, G. P. Belyakov²

¹Siberian Federal University,
Institute of Economics, Management and Environmental
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: e.himin@yandex.ru

Market transformation and integration of the economy into the world economy underlined the need to transition to intensive type of economic development. Imperative intensification is specifically implemented during the crisis. The depth of the recession, the outflow of capital and the state of the priority scale factors of the economic process, manifested in the modern crisis of the economic situation, actualize the need to intensify the development of the system of training and retraining of personnel for the defense industry enterprises, which includes the regional level.

During the period of reforming of the Russian society on the division of powers between the federal center and the regions governance issues development of territorial forms of life, ways of formation and functioning of the regional socio-economic systems have acquired a special significance.

Study of the problems of management development of preparation and retraining system of personnel for the defense enterprises of the region on the basis of a program approach showed that the growing role and importance of the regional educational system lead to the need to identify new scientific approaches, principles of formation and implementation of development programs, to improve the implementation of the mechanism, the development of tools and measures that will allow regional bodies to manage the training system together with the Ministry of education and science of the Russian Federation to make the transition of the system to a new quality - to the educational federalism organically combine the two processes of regionalization and integration of the vocational education system.

The proposed concept of management of development of regional system of training and retraining of personnel for the defense industry enterprises involves improving the existing management development of professional training for defense companies at the regional level on the basis of program-project approach as one of the main mechanisms for implementation of the state innovation policy and elements of an innovative infrastructure designed to the development of innovation and the formation of a complete innovative vocational education system based on the state of innovation development priorities at the regional level. The model of innovative development of the training and retraining system of personnel for the defense industry enterprises at the regional level, using software-project approach has been proved. The possibility through regional planning and design software and form of its implementation to ensure the most effective forms of power integration, public opinion, education, science and business in the innovative update OPK of the Russian Federation are shown.

Keywords: regional management, system of training and retraining of personnel for the defense industry enterprises, planning, innovation, innovative upgrade program-project approach, management, effectively-based management.

Введение. Наряду с действием в 2015–2018 гг. негативных факторов, обусловленных падением цен на нефть и ограничениями в импорте товаров и технологий, в среднесрочной перспективе начинают проявляться факторы, оказывающие компенсирующее и стимулирующие воздействие на экономический рост. Это, прежде всего, адаптация российской экономики к ограничениям импорта товаров, снижение издержек, высвобождение неэффективного капитала, повышение конкурентоспособности отечественной продукции вследствие существенной девальвации рубля [1].

Прогноз социально-экономического развития на 2016–2018 гг. характеризует развитие российской экономики в условиях сохраняющейся геополитической нестабильности, продолжения применения на протяжении всего прогнозного периода к России экономических санкций со стороны ЕС и США и ответных контранакций. Ограничение доступа на мировые рынки капитала для российских компаний и достаточно высокий уровень чистого оттока капитала частного сектора, связанный с погашением внешнего долга, оказывают негативное влияние на восстановление инвестиционной активности. При этом со стороны производства ВВП ожидается ряд структурных изменений.

В прогнозный период увеличится доля промышленного производства в структуре ВВП с 25,1 % в 2014 г. до 27 % в 2018 г. Обрабатывающие производства увеличат свою долю в ВВП с 13,4 % в 2014 г. до 14,7–14,8 % в 2017–2018 гг. в связи с начавшимся процессом импортозамещения в промышленности и ростом отраслей инвестиционного спроса [1].

Развитие оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации (ОПК) является основой стратегической безопасности страны, относится к числу ключевых факторов высокотехнологичного развития экономики России [1; 2]. Сегодня доля наукоемкой высокотехнологичной продукции, по ряду отраслей (авиация, космос, оптика, радиоэлектроника) выпускаемой предприятиями ОПК, приближается к 90–100 % [3].

Происходящие процессы в современном мире диктуют оборонно-промышленному комплексу России новые профессиональные вызовы, которые ставят новые задачи ОПК:

- техническое и технологическое перевооружение;
- комплексное увеличение эффективности;
- создание перспективных образцов вооружения;
- внедрение новых технологических процессов [4].

Решение перечисленных задач, даже при условии реализации программы модернизации самих производств, регулярного выделения масштабных денежных средств на НИОКР, а также на закупки в рамках госзаказа нового вооружения, недостижимо без восполнения и развития важнейшего ресурса – человеческого, без выработки отвечающей современным требованиям системы подготовки и переподготовки кадров.

В настоящее время можно констатировать наличие критической ситуации, сложившейся на рынке труда в данной сфере. Она вызвана негативными характеристиками, присущими трем основным участникам данного процесса: потенциальным работникам, предприятиям и организациям ОПК, а также образовательным учреждениям, готовящим кадры для ОПК.

За последние годы государство приложило немалые усилия для развития кадрового потенциала предприятий и организаций ОПК. Так, на сегодняшний день на основании постановления Правительства Российской Федерации от 5 марта 2015 г. № 192 «О государственном плане подготовки кадров со средним профессиональным и высшим образованием для организаций оборонно-промышленного комплекса на 2016–2020 годы» и Порядком реализации государственного плана подготовки кадров со средним профессиональным и высшим образованием для организаций оборонно-промышленного комплекса на 2016–2020 гг., утвержденным приказом Минобрнауки России, Минпромторга России, Госкорпорации «Роскосмос» и Госкорпорации «Росатом» от 27 октября 2015 г. № 1217/3379/3/1/1018-П, правительство РФ утвердило план подготовки кадров для обеспечения оборонно-промышленного комплекса на 2016–2020 гг. Согласно данному плану, до 2020 г. необходимо подготовить 95 505 человек (14 770 специалистов со средним профессиональным образованием и 80 735 специалистов с высшим образованием) [5; 6].

Проблема кадрового обеспечения ОПК имеет системный характер и может быть решена исключительно путем принятия комплексных стратегических мер при согласованных действиях всех участников процесса, в том числе и на региональном уровне.

Потребность кадрового обеспечения ОПК (в свете кризисных и посткризисных проблем экономики России) в первую очередь предопределяет необходимость совершенствования механизма управления развитием системы профессиональной подготовки кадров для ОПК на региональном уровне, что должно обеспечить эффективное функционирование ОПК как высокотехнологичного многопрофильного сектора экономики страны, способного удовлетворить потребности Вооруженных Сил и других войск в современном вооружении и обеспечить стратегическое присутствие Российской Федерации на мировых рынках высокотехнологичных продукции и услуг.

Проблемы управления развитием региональной системы профессиональной подготовки на основе программного подхода. Модернизация системы подготовки и переподготовки кадров на региональном уровне на основе анализа и прогноза потребности предприятий ОПК в соответствующих категориях работников и корректировки структуры профессионального обучения с учетом перспектив развития должна обеспечить сбалансированность профессионально-квалификационной структуры спроса и предложения рабочей силы предприятий ОПК [7].

Исследование проблем управления развитием региональной системы профессиональной подготовки на основе программного подхода показало, что возрастание роли и значимости профессионального образования для предприятий ОПК приводит к необходимости определения новых принципов формирования и реализации программ развития данных систем, совершенствования механизма реализации программ, разработки мероприятий, направленных на повышение эффективности образовательных комплексов субъектов РФ, реализующих направления подготовки

и специальности (бакалавриат, среднее профессиональное образование), по которым осуществляется подготовка кадров для обеспечения ОПК региона [8].

Теоретический анализ и практический опыт в области управления развитием региональной системы профессионального образования позволяет оценить применяемые в нашей стране научные подходы и управленческие методы программного управления развитием сферы профессионального образования на уровне региона и выработать рекомендации по их совершенствованию.

Проведенный анализ содержания конкретных целевых программ развития региональных систем профессионального образования 32 регионов России выявил ряд недостатков, характерных для текущей практики разработки и реализации целевых программ в сфере профессионального образования: недостаточная обоснованность связи программной проблемы с инновационными национальными и отраслевыми приоритетами; отсутствие анализа рисков, связанных с программно-целевым методом решения проблемы; достаточно формальный несистемный подход к выработке целевых индикаторов; несовершенство применяемых при разработке целевых программ методов планирования времени; слабая реализация принципа диверсификации финансирования программной деятельности и др.

Изучение опыта разработки и внедрения программ развития системы подготовки кадров в субъектах РФ дает основание заключить, что в современной экономической и социокультурной ситуации возникает необходимость внести изменения и дополнения в действующую федеральную модель управления развитием региональных учреждений профессионального образования, сформированную на основе программно-целевого подхода, что позволит осуществить переход данной системы в новое качество – к образовательному федеральному федERALизму, органически сочетающему в себе два процесса: регионализацию и интеграцию системы профессионального образования [6; 8].

Программный подход должен удовлетворять следующим требованиям:

- обоснованность программы, ее целевых установок, механизмов реализации, конечных результатов;
- комплексность, т. е. целостное отражение единого образовательного пространства в сфере профессиональной подготовки региона с разнообразием типов, видов, учреждений профессионального образования, ступеней и уровней образования, интеграций разноуровневых однопрофильных и многопрофильных образовательных учреждений профессиональной подготовки;
- взаимосвязь с другими программами развития различных сфер деятельности региона (производственной, социальной и др.);
- эксплицитность – ясность, четкость ее принципов, основных направлений, целей и задач, адекватное отражение в них реальных процессов и тенденций развития региональных систем профессионального образования;
- логическая последовательность структуры и основных ее компонентов;

– организационно-экономическое обеспечение и научно-методическое сопровождение программ, обоснование механизмов реализации.

Программно-проектный подход как один из основных механизмов реализации государственной политики кадрового обеспечения предприятий ОПК на региональном уровне. На основе проведенного исследования предложена концепция управления развитием образовательного комплекса субъекта РФ, реализующего направления подготовки и специальности (бакалавриат, среднее профессиональное образование), по которым осуществляется подготовка кадров для обеспечения ОПК региона, основанная на программно-проектном подходе, который синтезирует программно-целевой и проектный подходы.

В чем сущность и особенности программно-проектного подхода к инновационному управлению развитием системы подготовки и переподготовки кадров для предприятий ОПК на региональном уровне?

Поскольку базовыми понятиями для данного подхода являются понятия «программа» и «проект», начнем с раскрытия их сущности и сопоставления.

Программно-целевой подход в данном аспекте представляет собой систему, состоящую из двух или более программ, требующих тесной взаимоувязки и координации, ориентированных на достаточно долгосрочный период. Поэтому программа характеризуется пакетом, набором или матрицей программ. Она выступает как часть структуры региональной целевой программы развития региона и формируется на основе структуры Федеральной целевой программы развития образования в РФ, Федеральный закон от 29.12.2012 г. № 273-ФЗ (ред. от 30.12.2015 г.) «Об образовании в Российской Федерации» [9], и целевых программ развития в других сферах экономики. В ней определяются основные направления, механизм реализации национально-регионального компонента, учитывающий национальные, региональные социально-экономические, экологические, культурные, демографические и другие особенности; отражаются вопросы, отнесенные к ведению субъектов РФ, органов местного самоуправления, региональных отраслевых ведомств [9; 10].

Проектный подход, в свою очередь, рассматривается как комплекс, состоящий из взаимосвязанных задач (работ) с четко определенными целями, расписанием (графиком работ), бюджетом, рассчитанный, как правило, на среднесрочный период (обычно менее 3 лет). В данном случае проект рассматривается как «пакет проектов» или «матрица проектов» [11].

Проектный подход как вторая часть структуры региональной программы развития системы профессионального образования представляет собой также систему, состоящую из двух или более приоритетных (инновационных) проектов, направленных на решение проблем стратегического характера, а именно, эффективного функционирования ОПК как высокотехнологичного многопрофильного сектора экономики страны.

Проект, в свою очередь, – это комплекс, состоящий из взаимосвязанных задач (работ), с четко определенными целями, расписанием (графиком работ), бюджетом, рассчитанный, как правило, на среднесрочный

период (обычно менее 3 лет). Следовательно, проект можно рассматривать как «пакет работ» или «матрицу задач» [11]. Работа (задача) в терминологии проектного менеджмента – это краткосрочная деятельность, необходимая для достижения конкретного результата. Момент окончания работы означает факт получения этого результата. Работа является базовым понятием и предоставляет основу для организации данных в системах управления проектами [11].

Другими словами, проект – это процесс создания определенных результатов. Проект можно рассматривать как целостный процесс, необходимый для создания нового продукта (товара или услуги), новой технологии или иных заранее определенных результатов.

При использовании классического программно-целевого подхода программа разрабатывается по схеме «цели – задачи – мероприятия по решению». Проектный подход также ориентирован на данную схему, но с включением формально противоположенного пути «проблемы – стратегии – социально-экономический результат», реализуемого в нескольких вариантах при использовании сценарного подхода.

Программно-проектный подход позволяет выделить несколько уровней программирования: федеральный и региональный, текущий, среднесрочный и ориентиры долгосрочного (инновационного); отразить управление развитием профессионального образования по образовательным ступеням и уровням; сформировать приоритетные, экономически значимые и инновационные направления регионального развития предприятий ОПК и т. д. При этом принцип структуризации программы развития по направлениям с соответствующим проектным обеспечением является основным. В результате чего возникает задача формирования необходимого пакета проектов по каждому направлению развития ОПК из имеющихся или предлагаемых инвестиционно-инновационных проектов. При формировании проектов анализируется состояние на момент исследования, формулируются проблемы, разрабатывается стратегия, проектируются мероприятия и ожидаемые результаты. Кроме того, проекты могут включать механизмы осуществления деятельности, план мероприятий, сроки, исполнителей, источники финансирования.

Основными концептуальными положениями инновационного управления развитием системы подготовки и переподготовки кадров для предприятий ОПК на региональном уровне на основе программно-проектного подхода являются:

- комплексное развитие системы в интересах всего общества, государства, региона и конкретного предприятия ОПК;
- определение стратегии приоритетного развития системы профессионального образования как важного фактора экономического и социокультурного развития регионального социума;

– многоуровневость цели, необходимость ее декомпозиции на задачи и отдельные проекты, раскрытие их логических и объемных соотношений [12].

Достоинством данного подхода при формировании региональных программ развития будет являться то,

что матрица проектов формируется на основе анализа и оценки результатов, полученных в ходе реализации целевых программ за предыдущий период, а также в контексте инновационных программных задач путем согласования проектных предложений, основанных на предложениях ОПК региона; предложений, обоснованных системным видением и основными инновационными задачами, стоящими перед программой, которые разрабатываются преимущественно представителями региональных государственных органов управления в сфере образования.

Здесь следует отметить, что в профессиональном образовании, как и в других отраслях и сферах деятельности, в настоящее время можно выделить три основных метода к осуществлению управленческой деятельности: функциональный, процессный, проектный.

Поскольку проект представляет собой уникальный комплекс действий, не замыкающийся и не привязанный жестко к организационной структуре, имеющий определенные даты начала и окончания, стоимость, расписание и техническое задание, поскольку управление проектом существенно отличается от управления функциональным подразделением, в котором постоянно выполняется одна и та же деятельность (или работа в терминологии проектного управления), не имеющая четкой даты начала и окончания. Другими словами, управление проектом существенно отличается от управления функциональным подразделением или бизнес-процессом, где постоянно выполняется одна и та же работа, не имеющая четкой даты начала и завершения [13].

Но означает ли это, что эти три управленческих метода находятся в соотношении взаимоисключаемости, т. е. что применение одного из них исключает возможность одновременного использования других? Нет, управленческие инструменты и механизмы, присущие каждому из перечисленных методов, могут одновременно эффективно применяться в управленческих системах различного типа и уровня (организации, отрасли, регионе и т. д.). Другими словами, они находятся в отношении взаимодополняемости, т. е. применение функционального метода не исключает, а напротив, может быть обогащено разработкой и реализацией проектов в организации, отрасли, регионе. Аналогично, совершенствование деловых процессов (бизнес-процессов), позволяющее системно влиять на качество предоставляемых услуг или производимой продукции, вовсе не исключает осуществление управленческих функций или разработку и реализацию проектов [14].

Вместе с тем необходимо осознавать характер динамической взаимосвязи этих управленческих методов. Можно говорить о достаточно четком характере динамической согласованности функционального и проектного методов. В нормальном бизнес-цикле проекты предшествуют функциональной деятельности, так как проекты нацелены на создание продукта, технологии и т. п., а функциональная деятельность направлена на поддержание и продолжение использования технологии или производство продукции.

Действительно, успешную функциональную деятельность можно представить как постоянный непре-

рывный поток действий, оканчивающийся предсказуемым набором исходных результатов, в то время как проект рассматривается как временный импульс активности, порождающий уникальный единичный результат. Функциональная деятельность, вообще говоря, продолжается и после достижения определенных результатов, а проекты прекращаются, когда результат достигнут.

Что же касается процессного метода к управлению, то он занимает хотя и самостоятельное, но в определенном смысле промежуточное место между функциональным и проектным управлением. Задачей процессного управления является совершенствование бизнес-процессов, т. е. осуществляемых видов деятельности (в том числе и видов деятельности, связанных с выполнением определенных управленческих функций). При этом само совершенствование бизнес-процессов (например, в случае реинжиниринга) осуществляется на проектной основе [15].

Таким образом, применение проектного подхода к системе управления развитием системы подготовки и переподготовки кадров для предприятий ОПК на региональном уровне должно сочетаться и согласовываться с применением функционального и процессного управления. При этом основной областью применения функционального и процессного (в части инкрементального совершенствования) управления является операционный менеджмент, в то время как проектный и процессный (в части реинжиниринга) методы ориентированы преимущественно на решение стратегических задач.

Перспективные проекты программы развития системы подготовки и переподготовки кадров для предприятий ОПК Красноярского края. В сфере профессионального образования региона разнообразие разрабатываемых и реализуемых проектов очень велико. В качестве критерии их классификации можно рассматривать следующие характеристики проекта:

- уровень образования, для которого предназначены результаты проекта;
- размер проекта (могут рассматриваться такие показатели, как объем привлекаемых финансовых средств и других ресурсов, количество вовлеченных специалистов и представителей различных заинтересованных сторон, состав работ и др.);
- сложность проекта, определяемая на основе многообразия целевых установок проекта, количества участвующих в проекте подразделений или организаций, ведомств и т. п. (сложность проекта, как правило, растет экспоненциально с увеличением количества организаций, участвующих в разработке и реализации проекта);
- характер заказчика проекта и степень участия заказчика в проекте;
- уровни проектных рисков.

Исходя из предложенных мероприятий, направленных на инновационное развитие системы подготовки и переподготовки кадров для предприятий ОПК на региональном уровне, авторами исследования предложены перспективные проекты программы развития системы подготовки и переподготовки кадров для предприятий ОПК Красноярского края, позволяющие

в условиях ограниченного бюджетного финансирования системы профессионального образования Красноярского края за счет более эффективного использования ресурсов обеспечить реализацию поставленной цели [11].

Ниже представлен перечень проектов по приоритетным направлениям развития системы профессионального образования Красноярского края, направления проектирования и основные цели проектов [11].

1. Проект «Целевая подготовка кадров для предприятий ОПК Красноярского края». Основная цель проекта – формирование системы целевой подготовки кадров для предприятий ОПК Красноярского края и организация системы повышения квалификации работников, занятых на предприятиях ОПК.

2. Проект «Регионализация и интеграция профессионального образования». Основная цель проекта – прогнозирование и стратегия развития региональных и муниципальных образовательных систем и комплексов; дальнейшая интеграция образовательных учреждений всех уровней; вариативность и преемственность образовательных программ; создание и развитие интегрированных типов учебных заведений профессионального образования.

3. Проект «Сетевое взаимодействие». Основная цель проекта – разработка и внедрение сетевого взаимодействия между учреждениями профессионального образования в целях более эффективного использования своих материально-технических баз в условиях недостаточного бюджетного финансирования; проектирование схем сетевого взаимодействия на основе применения основных принципов логистики.

4. Проект: «Педагогические кадры». Основная цель проекта – создание единой системы подготовки, переподготовки и повышения квалификации кадров в сфере профессионального образования на территории Красноярского края в целях совершенствования содержания и форм повышения квалификации педагогов и мастеров производственного обучения с учетом их интересов и современных требований педагогической теории и практики.

5. Проект «Однопрофильные и многопрофильные учреждения профессионального образования». Основная цель проекта – создание (перепрофилирование) в крупных городах Красноярского края однопрофильных учреждений профессионального образования, создание (перепрофилирование) в городах и поселках городского типа многопрофильных учреждений, исключающих дублирование профессий и специальностей в учреждениях, расположенных на территории данных городов и населенных пунктов, в целях эффективного использования бюджетных средств.

6. Проект «Региональное бюджетное планирование в сфере профессионального образования». Основная цель проекта – формирование новой отраслевой модели бюджетного планирования в сфере профессионального образования на основе нормированного и нормативного подходов с целью оптимизации бюджетных расходов и повышения их эффективности.

Реализация предложенных приоритетных проектов программы развития системы подготовки и переподготовки кадров для предприятий ОПК Краснояр-

ского края позволит изменить существующую структуру воспроизводства трудовых ресурсов в Красноярском крае [11].

Заключение. Определения понятия программы, данные в последних концептуальных документах, рассматривающих проблемы стратегии и политики в области профессионального образования, хорошо согласуются с приведенной общетеоретической трактовкой данного термина. Так, в концепции Федеральной целевой программы развития образования на 2016–2020 годы, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 29 декабря 2014 г. № 2765-р., понятие программы раскрывается следующим образом: программа как организационная основа реализации государственной политики в области образования представляет собой комплекс взаимоувязанных по ресурсам и срокам мероприятий, отражающих изменения в структуре, содержании и технологиях образования, системе управления, организационно-правовых формах субъектов образовательной деятельности и финансово-экономических механизмах.

Приведенная общетеоретическая трактовка понятия программы хорошо согласуется и с дефиницией целевой программы, данной в постановлении правительства РФ, где подчеркивается, что «целевые программы являются одним из важнейших средств реализации структурной политики государства, активного воздействия на его социально-экономическое развитие и должны быть сосредоточены на реализации крупномасштабных, наиболее важных для государства инвестиционных научно-технических проектов, направленных на решение системных проблем, входящих в сферу компетенции федеральных органов исполнительной власти».

Таким образом, программно-проектный подход к управлению развитием системы подготовки и переподготовки кадров для предприятий ОПК на региональном уровне позволяет операционизировать стратегию или сделать стратегию операционной, превратить набор стратегических инициатив в систему конкретных действий, мероприятий, а значит, вооружает инструментарием осуществления или выполнения, реализации стратегии управления образовательной системой.

Заметим, что, говоря о программно-проектном, а не просто о проектном подходе к управлению развитием региональной системы подготовки и переподготовки кадров для предприятий ОПК, мы хотим подчеркнуть концентрацию на стратегических проблемах управления. Действительно, управление программами и проектами опирается на единый управленческий инструментарий, имеет общую методологическую основу. Акцент на программности в названии подхода фокусирует внимание на долгосрочности и инновационном характере управления развитием.

Значение и особенности предлагаемого программно-проектного подхода при управлении инновационным развитием региональной системой подготовки и переподготовки кадров для предприятий ОПК как новой формы проектного управления в сфере профессионального образования во многом еще предстоит

осмыслить как в теоретическом, так и в практическом плане. Но уже сегодня не вызывает сомнения то, что появление приоритетных национальных проектов является подтверждением важности и эффективности проектного подхода к решению государственных стратегических и инновационных задач в области подготовки и переподготовки кадров для предприятий ОПК конкретного региона.

На основании этого предлагается осуществлять работы в направлении повышения степени интеграции различных типов программ в области подготовки и переподготовки кадров для предприятий ОПК. Важную роль в управлении инновационным развитием сферой профессионального образования сыграет новый тип разрабатываемой программы развития, такой как государственная региональная программа развития.

Библиографические ссылки

1. Об утверждении Стратегии инновационного развития Российской Федерации до 2020 года : распоряжение Правительства РФ от 08.12.2001 г. № 2227-р [Электронный ресурс]. URL: <http://www.docs.cntd.ru/document/902317973> (дата обращения: 18.02.2016).

2. Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Центрального федерального округа до 2020 года : распоряжение Правительства РФ от 06.09.2011 г. № 1540-р [Электронный ресурс]. URL: <http://www.docs.cntd.ru/document/902311321> (дата обращения: 18.02.2016).

3. 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> (дата обращения: 18.02.2016).

4. 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> (дата обращения: 18.02.2016).

5. Об утверждении Концепции Федеральной целевой программы развития образования на 2016–2020 годы : распоряжение Правительства Российской Федерации от 29.12.2014 г. № 2765-р. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.docs.cntd.ru/document/420244216> (дата обращения: 18.02.2016).

6. Постановление Правительства Российской Федерации от 05.03.2015 г. № 192 «О государственном плане подготовки кадров со средним профессиональным и высшим образованием для организаций оборонно-промышленного комплекса на 2016–2020 годы» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.docs.cntd.ru/document/420258272> (дата обращения: 18.02.2016).

7. Беляков Г. П. Интегральные процессы в экономике: проблемы, поиски, решения. М. : Изд-во МАИ: Доброе слово, 2003. 244 с.

8. Бутко Е. Я. Проблемы и перспективы развития профессионального образования // Исследование приоритетных проблем развития профоразования :

сб. результатов научных исследований. АПО, 2010. С. 19–29.

9. Кошкин Л. И., Соловьев М. М. Методологические аспекты программно-целевого управления в условиях рыночных преобразований в России // Менеджмент в России и за рубежом. 2012. № 6. С. 30–42.

10. Химин Е. Б., Беляков Г. П. Проблемы системы экономических отношений в профессиональном образовании // Вестник СибГАУ, 2009. Вып. 2 (23). С. 377–382.

11. Химин Е. Б. Управление развитием системы профессионального образования на региональном уровне: механизмы и инструменты : автореф. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2010. 112 с.

12. Беляков Г. П. Оборонно-промышленный комплекс: проблемы реформирования и развития : моногр. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2003. 112 с.

13. Арчибалд Р. Управление высокотехнологичными программами и проектами. М. : ДМК-Пресс, Компания «Айт», 2006. 512 с.

14. Усакова С. И. Программирование как основа стратегического планирования // Проблемы современной экономики. 2009. № 1(29) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.m-economy.ru/art.php?nArtId=2416> (дата обращения: 10.02.2016).

15. Лапушкинская Г. К. Формирование системы планирования развития территориального комплекса профессионального образования в условиях рыночной трансформации социальной сферы : дис. ... д-ра экон. наук / Санкт-Петербург. гос. ун-т экономики и финансов. СПб., 2004. 296 с.

References

1. 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.). Available at: <http://www.docs.cntd.ru/document/902317973> (accessed 18.02.2014).

2. 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.). Available at: <http://www.docs.cntd.ru/document/902311321> (accessed 18.02.2014).

3. 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.). Available at: <http://www.docs.cntd.ru/document/985015773> (accessed 18.02.2014).

4. 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.). Available at: <http://www.docs.cntd.ru/document/985024710> (accessed 18.02.2014).

5. Order of the RF Government of 29.12.14 г. № 2765-р “The concept of the Federal target program of education development for 2016–2020 years” (In Russ.). Available at: <http://www.docs.cntd.ru/document/420244216> (accessed 18.02.2014).

6. Decree of the RF Government of 05.03.15 г. № 192 "About the state plan for training with secondary vocational and higher education institutions for the military-industrial complex in the 2016–2020 years" (In Russ.). Available at: <http://www.docs.cntd.ru/document/420258272> (accessed 18.02.2014).
7. 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.
8. Butko E. Ya. [Problems and prospects of development of vocational education]. *Issledovanie prioritetnykh problem razvitiya profobrazovaniya*. [Study of the priority issues of vocational. Sat development. research results]. APO, 2010, P. 19–29.
9. Koshkin L. I., Solov'ev M. M. [Methodological aspects of program-oriented management in the conditions of market transformations in Russia]. *Menedzhment v Rossii i za rubezhom*. 2012, No. 6, P. 30–42 (In Russ.).
10. Khimin E. B., Belyakov G. P. [Problems of the system of economic relations in vocational training]. *Vestnik SibGAU*, 2009, No. 2 (23), P. 377–382 (In Russ.).
11. Khimin E. B. *Upravlenie razvitiem sistemy professional'nogo obrazovaniya na regional'nom urovne: mekhanizmy i instrumenty*. [Management of development of vocational education system at the regional level: mechanisms and tools: abstract]. Sib. Gos. aerokosmich. Univ. Krasnoyarsk, 2010, P. 12.
12. Belyakov G. P. *Oboronno-promyshlennyi kompleks: problemy reformirovaniya i razvitiya: monogr.* [Military-industrial complex: problems of reforming and development: monograph]. Sib. Gos. Aerokosmich. Univ. Krasnoyarsk, 2003, 112 p.
13. Archibal'd R. *Upravlenie vysokotekhnologichnymi programmami i proektami* [Managing of high-technology programs and projects]. Moscow, DMK Press Publ., 2006, P. 512.
14. Usakova S. I. [Programming as a basis for strategic planning]. *Problemy sovremennoy ekonomiki*. 2009. № 1 (29) (In Russ.). Available at: <http://www.m-economy.ru/art.php?nArtId=2416> (accessed 10.02.2016).
15. Lapushinskaya G. K. *Formirovanie sistemy planirovaniya razvitiya territorial'nogo kompleksa professional'nogo obrazovaniya v usloviyah rynochnoy transformatsii sotsial'noy sfery. Dokt. Diss.* [Formation of the complex territorial planning system of vocational training in the conditions of market transformation of the social sphere. Doct. Diss.]. 2004, 296 p.

© Химин Е. Б., Беляков Г. П., 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Акзигитов Артур Ревович – старший преподаватель, преподаватель кафедры технической эксплуатации авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: aakzigitov88@mail.ru.

Акзигитов Рево Авхадиевич – доцент, заместитель декана по учебной работе, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: akzigitov-r@mail.ru.

Андронов Александр Сергеевич – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: andronov-80@mail.ru.

Анищенко Юлия Анатольевна – кандидат экономических наук, доцент кафедры организации и управления научноемкими производствами, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: julya104@mail.ru.

Артемьев Евгений Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева.

Архипов Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, ведущий инженер, Астрокосмический центр Физического института академии наук имени П. Н. Лебедева. E-mail: rusengineer@mail.ru.

Ашейчик Анатолий Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. E-mail: aseichik52@mail.ru.

Баданина Юлия Олеговна – инженер-конструктор 2 категории, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». E-mail: secret398@mail.ru.

Бельская Екатерина Николаевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инженерной экологии, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ketrin_nii@mail.ru.

Беляков Геннадий Павлович – доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры организации и управления научноемкими производствами, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: gpbelakov@mail.ru.

Браништи Владислав Владимирович – старший преподаватель кафедры высшей математики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: branishti-v-v@yandex.ru.

Бревнов Василий Григорьевич – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: Vasiliy.brevnov@mail.ru.

Брестер Кристина Юрьевна – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: christina.brester@gmail.com.

Валов Михаил Владимирович – начальник группы, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». E-mail: valov@iss-reshetnev.ru.

Вашкевич Вадим Петрович – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва; инженер, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». E-mail: iss.patent@mail.ru.

Владимиров Валерий Михайлович – доктор технических наук, профессор, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. Тел. 8 (391) 249-44-94.

Границкий Лев Васильевич – кандидат физико-математических наук, профессор, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. Тел. 8 (913) 581-19-10.

Дроздов Игорь Геннадьевич – доктор технических наук, профессор, первый проректор, Воронежский государственный технический университет. E-mail: drozdov_ig@mail.ru.

Жнидаршич Аня – PhD, доцент кафедры вычислительных методов, факультет организационных наук, Мариборский университет, Словения. E-mail: anja.znidarsic@fov.uni-mb.si.

Зеньков Игорь Владимирович – доктор технических наук, доцент ВАК, профессор, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва; старший научный сотрудник, Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука» КНЦ СО РАН. E-mail zenkoviv@mail.ru.

Зимин Иван Иванович – инженер-конструктор 2 категории, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: i.zimin@iss-reshetnev.ru.

Иванов Илья Андреевич – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ilyaiv92@gmail.com.

Картамышев Александр Сергеевич – начальник группы автоматизации задач управления, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». E-mail: kartam@iss-reshetnev.ru.

Кацура Александр Владимирович – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической эксплуатации авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: pnk-sibsau@mail.ru.

Ковалев Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры системного анализа, ректор, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kovalev.fsu@mail.ru.

Кожухов Николай Николаевич – кандидат технических наук, доцент, доцент, Воронежский государственный технический университет. E-mail: k0zhukhov@yandex.ru.

Козлов Сергей Анатольевич – инженер-электроник, ООО «Прикладная механика». E-mail: yusov@amech.ru.

Коломенцев Александр Иванович – кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры 202 «Ракетные двигатели», Московский авиационный институт. E-mail: a.i.kolomentsev@yandex.ru.

Колосницын Антон Васильевич – младший научный сотрудник, Институт систем энергетики имени Л. А. Мелентьева СО РАН. E-mail: ankolas25@mail.ru.

Коновалов Дмитрий Альбертович – кандидат технических наук, старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет. E-mail: dmikonovalov@yandex.ru.

Кононова Елена Сергеевна – аспирант, ассистент кафедры менеджмента организации, Красноярский государственный педагогический университет имени В. П. Астафьева. E-mail: elkask@rambler.ru.

Костров Евгений Александрович – кандидат технических наук, научный сотрудник Физического института академии наук имени П. Н. Лебедева. E-mail: kostrov@lebedev.ru.

Кофьяч Даворин – PhD, доцент и исследователь в лаборатории кибернетики и систем поддержки принятия решений, факультет организационных наук, Мариборский университет, Словения. E-mail: davorin.kofjac@fov.uni-mb.si.

Крушенко Генрих Гаврилович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт вычислительного моделирования СО РАН. E-mail: genry@icm.krasn.ru.

Кузьмина Инна Анатольевна – ассистент, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана. E-mail: kuzminainna@yandex.ru

Лапухин Евгений Геннадьевич – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: lapukhineg@sibsau.ru.

Липинский Леонид Витальевич – кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: lipinskiy@mail.ru.

Лосева Елена Давидовна – магистрант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: rabota_lena_19@mail.ru.

Лукьяннова Анна Александровна – доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой менеджмента организации, Красноярский государственный педагогический университет имени В. П. Астафьева. E-mail: aaluk110@mail.ru.

Медведев Александр Васильевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры системного анализа и исследования операций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. Тел. 8(3912)905011.

Минарченко Илья Михайлович – младший научный сотрудник, Институт систем энергетики имени Л. А. Мелентьева СО РАН. E-mail: eq.progr@gmail.com.

Минкер Вольфганг – доктор, доктор-инженер, профессор и ассоциативный директор, Институт телекоммуникационных технологий, университет города Ульма, Германия. E-mail: wolfgang.minker@uni-ulm.de.

Михов Евгений Дмитриевич – аспирант кафедры информационных систем, Сибирский федеральный университет. E-mail: edmihovi@mail.ru.

Мошков Петр Александрович – инженер, Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского. E-mail: moshkov89@bk.ru.

Мурыгин Александр Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-управляющих систем, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: avm514@mail.ru.

Наговицын Василий Николаевич – кандидат технических наук, доцент, Сибирский федеральный университет; главный специалист, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: nnv@iss-reshetnev.ru.

Немировский Юрий Владимирович – академик Академии военных наук Российской Федерации, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики имени С. А. Христиановича СО РАН. E-mail: nemirov@itam.nsc.ru.

Пермяков Михаил Юрьевич – начальник группы, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: regmyakov@iss-reshetnev.ru.

Полонский Владимир Львович – кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. E-mail: Vladidir.polonsky@gmail.com.

Розман Чртомир – профессор в области сельскохозяйственного управления кафедры агрокультурной экономики и развития сельских районов, факультет агрокультуры и наук о жизни, Мариборский университет, Словения. E-mail: crt.rozman@um.si.

Сабиров Рашид Альтавович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедр технической механики, летательных аппаратов, компьютерного моделирования, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: rashidsab@mail.ru.

Самохин Валерий Федорович – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Центральный аэрогидродинамический институт имени проф. Н. Е. Жуковского. E-mail: samohin_vf@mail.ru.

Сафонов Константин Владимирович – доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной математики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: safonovkv@rambler.ru.

Сафонов Михаил Викторович – старший преподаватель кафедры организации и управления наукоемкими производствами, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: smv-agi@mail.ru.

Семенкин Евгений Станиславович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры системного анализа данных и исследования операций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: eugeneselemenkin@yandex.ru.

Семенкина Ольга Эрнестовна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры высшей математики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: semenkina.olga@mail.ru.

Семенова Лилия Александровна – доцент кафедры летательных аппаратов, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: semenova@aibsau.ru.

Сергиенко Роман Борисович – кандидат технических наук, старший исследователь научной группы «Диалоговые системы», Институт телекоммуникационных технологий, университет города Ульма, Германия. E-mail: romaserg@list.ru.

Сидоров Максим Юрьевич – магистр системного анализа и управления, научный сотрудник и аспирант кафедры диалоговых систем, Институт телекоммуникационных технологий, университет города Ульма, Германия. E-mail: maxim.sidorov@uni-ulm.de.

Спирина Анастасия Викторовна – аспирант кафедры системного анализа и исследования операций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва; аспирант кафедры диалоговых систем, Институт телекоммуникационных технологий, университет города Ульма, Германия. E-mail: s_nastia@mail.ru; anastasiia.spirina@uni-ulm.de.

Становов Владимир Вадимович – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: vladimirstanovov@yandex.ru.

Строков Дмитрий Евгеньевич – студент, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: DimaStr20@gmail.com.

Тасейко Ольга Викторовна – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры инженерной экологии, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: taseiko@gmail.com.

Тестоедов Николай Алексеевич – доктор технических наук, член-корреспондент РАН, генеральный директор, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». E-mail: office@iss-reshetnev.ru.

Товстоношенко Валентина Николаевна – доцент кафедры логистики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: teachervalua@mail.ru.

Федорова Наталья Александровна – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики и компьютерной безопасности, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: feodorova.natalia@mail.ru.

Финогенов Сергей Леонардович – старший научный сотрудник кафедры 202 «Ракетные двигатели», Московский авиационный институт. E-mail: sfmai2015@mail.ru.

Хамисов Олег Валерьевич, доктор физико-математических наук, заведующий отделом, Институт систем энергетики имени Л. А. Мелентьева СО РАН. E-mail: khamisov@isem.irk.ru.

Химин Евгений Борисович – кандидат экономических наук, доцент кафедры менеджмента, Институт экономики, управления и природопользования, Сибирский федеральный университет. E-mail: e.himin@yandex.ru.

Шестаков Иван Яковлевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электронной техники и телекоммуникаций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail:yakovlevish@mail.ru.

Шкраба Андрей – PhD, доцент и исследователь в лаборатории кибернетики и систем поддержки принятия решений, факультет организационных наук, Мариборский университет, Словения. E-mail: andrej.skraba@fov.uni-mb.si.

Юлдашев Турсун Камалдинович – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: tursumbay@rambler.ru.

Юсов Александр Викторович – главный конструктор, заместитель генерального директора, ООО «Прикладная механика». E-mail: yusov@amech.ru.

Якимов Лев Евгеньевич – старший преподаватель кафедры физики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: leofant@mail.ru.

Яковлев Андрей Викторович – начальник отдела, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». E-mail: yav@iss-reshetnev.ru.

Яковлев Евгений Иосифович – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail:yei@nm.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Akzigitov Artur Revovich – senior teacher, lecturer, Department of Technical Operation of Aircraft Electric and Navigation Systems, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: aakzigitov88@mail.ru.

Akzigitov Revo Avkhadievich – Docent, deputy dean for study and educational work, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: akzigitov-r@mail.ru.

Andronov Aleksandr Sergeevich – postgraduate student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: andronov-80@mail.ru.

Anischenko Yuliya Anatol'evna – Cand. Sc., Docent, Department of Organization and Management of Science Intensive Production, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: julya104@mail.ru.

Arkhipov Mikhail Yuryevich – Cand. Sc., Lead Engineer, Astro Space Center, Lebedev Physical Institute SB RAS. E-mail: rusengineer@mail.ru.

Artem'ev Evgeniy Mikhaylovich – Dr. Sc., professor, Physics Department, Reshetnev Siberian State Aerospace University.

Asheichik Anatoly Anatol'evich – Cand. Sc., Docent, St. Petersburg Polytechnical University Peter the Great. E-mail: aseichik52@mail.ru.

Badanina Julia Olegovna – design engineer of the 2d category, JSC “Information satellite systems” named after academician M. F. Reshetnev”. E-mail: secret398@mail.ru.

Belyakov Gennadiy Pavlovich – Dr. Sc., professor, professor of Department of Organization and Management of Science Intensive Production, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: gpbelbelyakov@mail.ru.

Bel'skaya Ekaterina Nikolaevna – Cand. Sc., Docent, Department of Engineering Ecology, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: ketrin_nii@mail.ru.

Branishti Vladislav Vladimirovich – senior teacher, Department of Higher Mathematics, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: branishti-v-v@yandex.ru.

Brester Christina Yurievna – postgraduate student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: christina.brester@gmail.com.

Brevnov Vasily Grigoryevich – postgraduate student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: Vasiliy.brevnov@mail.ru.

Drozdov Igor' Gennad'evich – Dr. Sc., professor, first vice-rector, Voronezh State Technical University. E-mail: drozdov_ig@mail.ru.

Feodorova Natal'ya Aleksandrovna – Cand. Sc., Docent, Department of Applied Mathematics and Computer Security, Siberian Federal University. E-mail: feodorova.natalia@mail.ru.

Finogenov Sergei Leonidovich – Senior Researcher at Department 202 “Rocket Engines”, Moscow Aviation Institute (National Research University). E-mail: sfmai2015@mail.ru.

Granitskiy Lev Vasilevich – Cand. Sc., professor, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: lapukhineg@sibsa.sau.ru

Himin Evgeny Borisovich – Cand. Sc., Docent of Management department of the Institute of Economics, Management and Environmental Sciences, Siberian Federal University. E-mail: e.himin@yandex.ru. +7 (391) 241-33-29.

Ivanov Ilia Andreevich – postgraduate student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: ilyaiv92@gmail.com.

Kartamyshev Alexandr Sergeevich – Chief of control process automation group in the Company, JSC “Information Satellite System” named after academician M. F. Reshetnev”. E-mail: kartam@iss-reshetnev.ru.

Katsura Aleksandr Vladimirovich – Cand. Sc., professor, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: pnk-sibsa@mail.ru.

Khamisov Oleg Valer'evich – Dr. Sc., professor, Head of Applied Mathematical Department, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS. E-mail: khamisov@isem.irk.ru.

Kofjač Davorin – PhD, Docent and researcher in the Cybernetics & Decision Support Systems Laboratory at the Faculty of Organizational Sciences, University of Maribor, Slovenia. E-mail: davorin.kofjac@fov.uni-mb.si.

Kolomentsev Alexander Ivanovich – Cand. Sc., professor, professor at Department 202 “Rocket Engines”, Moscow Aviation Institute (National Research University). E-mail: a.i.kolomentsev@yandex.ru.

Kolosnitsyn Anton Vasilievich – junior research fellow, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS. E-mail: ankulos25@mail.ru.

Kononova Elena Sergeevna – postgraduate student, assistant of Department of Management of Organization, Krasnoyarsk State Pedagogical University named after V. P. Astafiev. E-mail: elkask@rambler.ru.

Konovalov Dmitrij Al'bertovich – Cand. Sc., senior teacher, Voronezh State Technical University. E-mail: dmikonovalov@yandex.ru.

Kostrov Yevgeniy Aleksandrovich – Cand. Sc., Lead Engineer, Research Scientist, Lebedev Physical Institute SB RAS. E-mail: kostrov@lebedev.ru.

Kovalev Igor Vladimirovich – Dr. Sc., professor, Department of System analysis, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: kovalev.fsu@mail.ru.

Kozhukhov Nikolay Nikolaevich – Cand. Sc., Docent, Voronezh State Technical University. E-mail: k0zhukhov@yandex.ru.

Kozlov Sergey Anatolyevich – Electronic Engineer, LLC “Prikladnaya Mekhanika”. E-mail: yusov@amech.ru.

Krushenko Genry Gavrilovich – Dr. Sc., professor, Chief research officer, Institute of Computational Modeling SB RAS. E-mail: genry@icm.krasn.ru.

Kuzmina Inna Anatol'evna – assistant, Bauman Moscow State Technical University. E-mail: kuzminainna@yandex.ru.

Lapukhin Evgeniy Gennad'evich – postgraduate student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: lapukhineg@sibsau.ru

Lipinsky Leonid Vitalievich – Cand. Sc., Docent, Department of Systems Analysis, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: lipinskiyl@mail.ru.

Loseva Elena Davidovna – Master's Degree student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: rabota_lena_19@mail.ru.

Lukyanova Anna Aleksandrovna – Dr. Sc., professor, head of Department of Management of Organization, Krasnoyarsk State Pedagogical University named after V. P. Astafiev. E-mail: aluk110@mail.ru.

Medvedev Alexandr Vasiljevich – Dr. Sc., professor, Department of System Analysis and Research of Operations, Reshetnev Siberian State Aerospace University.

Mikhov Evgenii Dmitrievich – postgraduate student, Department of Information Systems, Siberian Federal University. E-mail: edmihovi@mail.ru.

Minarchenko Il'ya Mikhaylovich – junior research fellow, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS. E-mail: eq.progr@gmail.com.

Minker Wolfgang – Doctor, Doctor of Engineering Science, professor and associative director, Institute of Communications Engineering, University of Ulm (Germany). E-mail: wolfgang.minker@uni-ulm.de.

Moshkov Petr Aleksandrovich – engineer, Central Aerohydrodynamic Institute named after N. E. Zhukovsky. E-mail: moshkov89@bk.ru.

Murygin Alexandr Vladimirovich – Dr. Sc., professor, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: avm514@mail.ru.

Nagovitsin Vasiliy Nikolaevich – Cand. Sc., Docent, Siberian Federal University; Chief Specialist, JSC “Information Satellite System” named after academician M. F. Reshetnev”. E-mail: nvn@iss-reshetnev.ru.

Nemirovsky Yury Vladimirovich – academician of the Academy of military Sciences of the Russian Federation, Dr. Sc., professor, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS. E-mail: nemirov@itam.nsc.ru

Permyakov Mikhail Yurievich – Head of group, JSC “Information Satellite System” named after academician M. F. Reshetnev”. E-mail: permyakov@iss-reshetnev.ru.

Polonsky Vladidir L'vovich – Cand. Sc., Docent, St. Petersburg Polytechnical University Peter the Great. E-mail: Vladidir.polonsky@gmail.com.

Rozman Črtomir – Full Professor for Farm management in the Department for Agriculture Economics and Rural Development, Faculty of Agriculture and Life Sciences, University of Maribor, Slovenia. E-mail: crt.rozman@um.si.

Sabirov Rasheed Altavovich – Cand. Sc., Docent, Department of Technical Mechanics, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: rashidsab@mail.ru.

Safonov Konstantin Vladimirovich – Dr. Sc., Head of Department of Applied Mathematics, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: safonovkv@rambler.ru.

Safronov Mihail Viktorovich – senior teacher, Department of Organization and Management of Science Intensive Production, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: smv-ag@list.ru.

Samokhin Valery Fedorovich – Dr. Sc., chief researcher, Central Aerohydrodynamic Institute named after N. E. Zhukovsky. E-mail: samohin_vf@mail.ru.

Semenkin Eugeny Stanislavovich – Dr. Sc., professor, Department of System Analysis and Operations Research, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: eugeneselemenkin@yandex.ru.

Semenkina Olga Ernestovna – Dr. Sc., professor, professor of Department of Higher Mathematics, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: semenkina.olga@mail.ru.

Semenova Liliya Aleksandrovna – Docent, Department of Aircraft, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: semenova@aibsau.ru.

Sergienko Roman Borisovich – Cand. Sc., senior researcher of the research group of dialogue systems of the Institute of Communications Engineering, University of Ulm (Germany). E-mail: romaserg@list.ru.

Shestakov Ivan Jakovlevich – Dr. Sc., Docent, professor, professor of Department of Electronics and Telecommunications, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: yakovlevish@mail.ru.

Sidorov Maxim Yuryevich – Master's Degree student of Department of Systems Analysis and Management, postgraduate student of Department of Dialogue Systems, Institute of Communications Engineering, University of Ulm (Germany). E-mail: maxim.sidorov@uni-ulm.de.

Škraba Andrej – PhD, associate professor and researcher in the Cybernetics & Decision Support Systems Laboratory at the Faculty of Organizational Sciences, University of Maribor, Slovenia. E-mail: andrej.skraba@fov.uni-mb.si.

Spirina Anastasiia Victorovna – postgraduate student of Department of Systems Analysis and Operations Research, Reshetnev Siberian State Aerospace University, PhD-student of Department of Dialogue Systems of the Institute of Communications Engineering, University of Ulm (Germany). E-mail: s_nastia@mail.ru; anastasiia.spirina@uni-ulm.de.

Stanovov Vladimir Vadimovich – postgraduate student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: vladimirstanovov@yandex.ru.

Strokov Dmitrii Evgen'evich – student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: DimaStr20@gmail.com.

Taseiko Olga Viktorovna – Cand. Sc., Docent, Department of Engineering Ecology, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: taseiko@gmail.com.

Testoedov Nikolai Alekseevich – Dr. Sc., Associate Member of RAS, professor, Director General, JSC “Information Satellite System” named after academician M. F. Reshetnev”. E-mail: office@iss-reshetnev.ru.

Tovstonoshenko Valentina Nikolaevna – Docent of Logistics Department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: teachervalya@mail.ru.

Valov Mikhail Vladimirovich – head of group, JSC “Information satellite systems” named after academician M. F. Reshetnev”. E-mail: valov@iss-reshetnev.ru.

Vashkevich Vadim Petrovich – postgraduate student, Reshetnev Siberian State Aerospace University, engineer, JSC “Information satellite systems” named after academician M. F. Reshetnev”. E-mail: iss.patent@mail.ru.

Vladimirov Valerij Mihajlovich – Dr. Sc., Professor, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: lapukhineg@sibsau.ru.

Yakimov Lev Evgen'evich – senior lecturer, Physics department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: leofant@mail.ru.

Yakovlev Andrey Viktorovich – head of department, JSC “Information satellite systems” named after academician M. F. Reshetnev”. E-mail: yav@iss-reshetnev.ru.

Yakovlev Eugeny Iosiphovich – Cand. Sc., Docent, Docent of Department of Higher Mathematics, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: yei@nm.ru.

Yuldashev Tursun Kamaldinovich – Cand. Sc., Docent, Associate professor of Department of Higher Mathematics, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: tursunbay@rambler.ru.

Yusov Aleksandr Viktorovich – Chief Designer, Deputy General Director, LLC “Prikladnaya Mekhanika”. E-mail: yusov@amech.ru.

Zenkov Igor Vladimirovich – Dr. Sc., Docent, professor, Reshetnev Siberian State Aerospace University; Senior Researcher of Special Design and Technological Bureau “Nauka” KSC SB RAS. E-mail: zenkoviv@mail.ru.

Zimin Ivan Ivanovich – postgraduate student, design engineer, JSC “Information satellite systems” named after academician M. F. Reshetnev”. E-mail: i.zimin@iss-reshetnev.ru.

Žnidaršič Anja – PhD, Docent, Department of Quantitative Methods, Faculty of Organizational Sciences, University of Maribor, Slovenia. E-mail: anja.znidarsic@fov.uni-mb.si.

