СИБИРСКИЙ ЖУРНАЛ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

Том 18, № 2

Красноярск 2017

СИБИРСКИЙ ЖУРНАЛ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

Том 18, № 2

Главный редактор
Ковалев Игорь Владимирович, доктор технических наук, профессор

Заместители главного редактора
Логинов Юрий Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор
Сенашов Сергей Иванович, доктор физико-математических наук, профессор
Мурыгин Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор

Ответственный секретарь
Зеленков Павел Викторович, кандидат технических наук

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Аплеснин С. С., доктор физико-математических наук, профессор
Головенкин Е. Н., доктор технических наук, профессор
Ерыгин Ю. В., доктор экономических наук, профессор
Лаптенок В. Д., доктор технических наук, профессор
Медведев А. В., доктор технических наук, профессор
Михеев А. Е., доктор технических наук, профессор
Москвичев В. В., доктор технических наук, профессор
Сафонов К. В., доктор физико-математических наук, доцент
Смирнов Н. А., доктор технических наук, профессор
Сомов В. Г., доктор технических наук, доцент

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

© СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2017

SIBERIAN JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

Vol. 18, No 2

Chief Editor:
Kovalev I. V.
Dr.Sc., Professor

Deputy Chief Editors
Loginov Y. Y., Dr.Sc., Professor
Senashov S. I., Dr.Sc., Professor
Murygin A. V., Dr.Sc., Professor

Executive Secretary
Zelenkov P. V., Cand.Sc.

EDITORIAL BOARD

Aplesnin S. S., Dr.Sc., Professor
Golovenkin E. N., Dr.Sc., Professor
Erygin Y. V., Dr.Sc., Professor
Laptenok V. D., Dr.Sc., Professor
Medvedev A. V., Dr.Sc., Professor
Mikheev A. E., Dr.Sc., Professor
Moskvichev V. V., Dr.Sc., Professor
Safonov K. V., Dr.Sc., Docent
Smirnov N. A., Dr.Sc., Professor
Somov V. G., Dr.Sc., Docent

EDITORIAL COUNCIL

Vasiliev S. N., Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Moscow)
Degermendzhi A. G., Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)
Degterev A. S., Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)
Kalvoda L., Cand.Sc.-Ing., Associate Professor (Prague, Czech Republic)
Kolmykov V. A., Cand.Sc., Professor (Krasnoyarsk)
Kratochvilova I., Dr.-Ing., Associate Professor (Prague, Czech Republic)
Kraus I., Sc.D., Professor (Prague, Czech Republic)
Lopatin A. V., Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)
Liu T., Ph.D., Professor (Beijing, China)
Minker W., Dr.-Ing., Professor (Ulm, Germany)
Mironov V. L., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)
Mladenov G., Corresponding Member of Bulgarian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Sofia, Bulgaria)
Pawera R., Associate Professor (Bratislava, Slovakia)
Semenkin E. S., Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)
Testoedov N. A., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Zheleznogorsk)
Užule K., Ph.D. (Riga, Latvia)
Fošner M., Ph.D. Associate Professor (Maribor, Slovenia)
Zhang S., Ph.D. (Tianjin, China)
Shabanov V. F., Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)
Shaidurov V. V., Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)
Shvidenko A., Dr.-Ing., Professor (Laxenburg, Austria)
Oye H., Dr.-Ing, Professor (Trondheim, Norway)

© Reshetnev University, 2017

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ

«Сибирский журнал науки и технологий» является научным, производственно-практическим рецензируемым изданием. Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-70577 от 03.08.2017 г. ISSN 2587-6066. 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»), до мая 2017 года – «Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева».

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.

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 «Сибирский журнал науки и технологий» ссылка обязательна.

Учредитель и издатель
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева» (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

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

INFORMATION FOR AUTHORS AND SUBSCRIBERS

Siberian Journal of Science and Technology 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.

The journal is the official periodical of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology.

The journal holds a Certificate of Registration as a Mass Media Resource. Certificate (Cyrillic): PI No. FC 77-70577, dated 03 August 2017.

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 academika M. F. Reshetneva (Vestnik SAA)*, prior to may 2017 it had the title *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M. F. Reshetneva (Vestnik SibGAU)*.

Siberian Journal of Science and Technology 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.

The journal is published four times a year.

An online version can been viewed at http://www.elibrary.ru

Siberian Journal of Science and Technology should be cited when reprinting or citing materials from the journal.

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

Редактор: О. А. Плехова
Редактор английского текста С. Г. Эфа
Оригинал-макет и верстка О. В. Булатниковой
Подписано в печать 20.06.2017. Формат 70×108/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Усл. печ. л. 25,4.
Уч.-изд. л. 31,7. Тираж 1000 экз. Заказ 22/258. С 113/17.
Редакционно-издательский отдел СибГУ им. М.Ф. Решетнева.
Отпечатано в редакционно-издательском центре СибГУ им. М.Ф. Решетнева.
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.
Дата выхода в свет: 28.08.2017. Свободная цена

Editor O. A. Plekhova, *Editor* (*English Language*) S. G. Efa
Layout original O. V. Bulatnikova
Signed (for printing): 20.06.2017. Format 70×108/16.
Offset Paper. Print flat. 25,4. Published sheets 31,7.
1000 copies. Order 22/258. C 113/17.
Printing and Publication Department Reshetnev University.
Printed in the Department of copying and duplicating equipment Reshetnev University.
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation.
Date of publication: 28.08.2017. Free price

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. МАТЕМАТИКА. МЕХАНИКА, ИНФОРМАТИКА

Лебедева К. Е., Лебедев Р. В., Мурыгин А. В. Методика повышения надежности видеоконференцсвязи 274
Пятаева А. В., Куликова Ю. Д. Обнаружение динамических текстур по видеопоследовательностям в условиях недостаточной освещенности 283
Сенашов В. И. Свойства локально-циклических групп 290
Треногин Н. Г., Петров М. Н., Соколов Д. Е. Эмпирические соотношения для оценки длины очереди в системе с фрактальным дробовым входным потоком 294
Тюрин С. Ф. Отказоустойчивый элемент голосования по меньшинству для аэрокосмических вычислительных комплексов 300
Шахматов А. В., Лепешкина Е. С., Ханов В. Х. Система программно-управляемой верификации сетевых сложнофункциональных блоков в эталонной системе на кристалле 307

РАЗДЕЛ 2. АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Альтшулер А. Ш., Бобронников В. Т., Трифонов М. В. Разработка алгоритма управления движением ракеты-носителя на начальном участке полета с использованием метода АКОР 314
Асланян Р. О., Анисимов Д. И., Марченко И. А., Пантелеев В. И. Имитаторы солнечного излучения для термовакуумных испытаний космического аппарата 323
Беляев Е. Н., Воробьев А. Г. Влияние параметров запуска жидкостного ракетного двигателя на баланс осевых сил в турбонасосном агрегате 328
Карцан И. Н., Киселева Е. А., Скопинцева Л. М., Шангина Е. А., Ефремова С. В. Проблемы надежности адаптивной цифровой антенной решетки 338
Кириллов В. А., Багатеев И. Р., Тарлецкий И. С., Баландина Т. Н., Баландин Е. А. Анализ концепций очистки околоземного космического пространства 343
Колинчук А. В. Выравнивание поля освещенности имитатора солнечного излучения на основе конического рефлектора 352

РАЗДЕЛ 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

Антонец И. В., Борсоев В. А., Кацура А. В., Степанов С. М. Исследование весоизмерительного устройства на основе кольцевого упругого чувствительного элемента и вторичного струнного датчика 358
Баранов М. Е., Герасимова Л. А., Хижняк С. В., Дубынин П. А. Исследование воздействия компонентов ракетного топлива на состояние сосны обыкновенной 367
Гурулев А. А., Цыренжапов С. В., Харин Ю. В. Исследование излучательных и радарных характеристик растущего ледяного покрова 373
Индаков Н. С., Гордеев Ю. И., Бинчуров А. С., Киселев Д. И., Ясинский В. Б. Влияние кинематических и технологических параметров ротационного точения многогранными резцами на формирование стружки и шероховатость поверхности 379
Калинин А. О., Посконин М. В., Сарамуд М. В., Лосев В. В., Ковалев И. В. Методика расчета временных характеристик элементов автоматизированной системы управления на примере замкнутого контура регулирования давления на участке трубопровода под управлением контроллера ОВЕН ПЛК100 220 387
Носков Ф. М., Квеглис Л. И., Волочаев М. Н., Абкарян А. К., Жигалов В. С. Формирование кластерных агрегатов с пентагональной симметрией в пластически деформированных образцах $Ni_{51}Ti_{49}$ 396
Погарцева М. М. Методика создания управляющих программ для обтяжных прессов, применяемых в авиационной промышленности 404
Попов В. Н. Численное моделирование распределения модифицирующих частиц в поверхностном слое металла при импульсном индукционном нагреве 415
Трифанов В. И., Оборина Л. И., Суханова О. А., Трифанов И. В., Рыжов Д. Р. Преобразование энергии пучков электронов в электрическую мощность 423
Харьков А. М., Ситников М. Н., Масюгин А. Н. Влияние анионного замещения на магниторезистивные свойства халькогенидов марганца 433

РАЗДЕЛ 4. ЭКОНОМИКА

Аврамчикова Н. Т., Волков Д. О., Захарова Л. Н. Методы и формы государственной поддержки инновационной деятельности в регионе (на примере Красноярского края) 442
Бревнов В. Г. Факторы устойчивого развития машиностроительных предприятий оборонно-промышленного комплекса 452
Ерыгин Ю. В., Борисова Е. В. Матрица распределения бизнес-процессов инновационных проектов как инструмент формирования архитектуры инновационной инфраструктуры региона 458
Орлов А. И., Цисарский А. Д. Организационно-экономическая модель оценки рисков проектов 464
Суходолов А. П., Суходолов Я. А. Перспективы формирования аэрокосмического кластера на востоке России 471

Сведения об авторах 476

CONTENTS

PART 1. MATHEMATICS, MECHANICS, COMPUTER SCIENCE

Lebedeva K. E., Lebedev R. V., Murygin A. V. Methodology of improving video conference reliability 274
Pyataeva A. V., Kulikova Y. D. Video based dynamic texture recognition under specific illumination conditions 283
Senashov V. I. Properties of locally cyclic groups 290
Trenogin N. G., Petrov M. N., Sokolov D. E. Empirical relationship for queue length estimation in a system with fractal shot input 294
Tyurin S. F. Fault tolerant CMOS realization of a minority function for aerospace computer complexes 300
Shahmatov A. V., Lepeshkina E. S., Khanov V. Kh. The system of software-driven verification of network IP-cores in a reference system-on-chip 307

PART 2. AVIATION AND SPACECRAFT ENGINEERING

Altshuler A. Sh., Bobronnikov V. T., Trifonov M. V. Development of launch vehicle control algorithm for the initial part of the trajectory using the ACOR method 314
Aslanyan R. O., Anisimov D. I., Marchenko I. A., Panteleev V. I. Solar simulators for thermal vacuum tests of spacecraft 323
Belayev E. N., Vorobyev A. G. Influence of launch parameters of liquid rocket engine on the balance of axial forces in the turbopump 328
Kartsan I. N., Kiseleva E. A., Skopintseva L. M., Shangina E. A., Efremova S. V. Issues of reliability insmart antennas 338
Kirillov V. A., Bagateev I. R., Tarleckiy I. S., Balandina T. N., Balandin E. A. Analysis of cleaning concepts of near-Earth space 343
Kolinchuk A. V. Alignment of the field of illumination of the solar simulator based on a conical reflector 352

PART 3. TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIAL SCIENCE

Antonets I. V., Borsoev V. A., Katsura A. V., Stepanov S. M. The study of weight measuring devices based on ring of elastic sensitive element and secondary sensor string 358
Baranov M. E., Gerasimova L. A., Khizhnyak S. V., Dubynin P. A. Investigation of impact of rocket fuel components on the condition of scotch pine 367
Gurulev A. A., Tsyrenzhapov S. V., Kharin Y. V. Research of radiation and radar characteristics of a growing ice cover 373
Indakov N. S., Gordeev Yu. I., Binchurov A. S., Kiselev D. I., Jasinski V. B. Influence of cinematic and technological parameters of rotary turning by multifaceted cutters on chip formation and surface roughness 379
Kalinin A. O., Poskonin M. V., Saramud M. V., Losev V. V., Kovalev I. V. Methods for calculating the time characteristics of the elements of an automated control system on the example of a closed loop for regulating the pressure in a pipeline section under the control of the “OWEN PLC100 220” 387
Noskov F. M., Kveglis L. I., Volochaev M. N., Abkaryan A. K., Zhigalov V. S. Formation of cluster aggregate with pentagonal symmetry in plastically deformed samples $Ni_{51}Ti_{49}$ 396
Pogartseva M. M. Methodology of creating management programs for case presses used in the aviation industry 404
Popov V. N. Numerical simulation of modifying material distribution during the impulse induction heating of metal surface 415
Trifanov V. I., Oborina L. I., Sukhanova O. A., Trifanov I. V., Ryzhov D. R. The conversion of electron beams energy in electric power 423
Kharkov A. M., Sitnikov M. N., Masyugin A. N. Influence of anionic substitution on the magnetic-resistance properties of the manganese chalkogenides 433

PART 4. ECONOMICS AEROSPACE INDUSTRY

Avramchikova N. T., Wolkov D. O., Zakharova L. N. Methods and forms of state support of innovative activities in the region (on the example of Krasnoyarsk region) 442
Brevnov V. G. Sustainable development factors of machine-building enterprises of military-industrial complex 452
Erygin Yu. V., Borisova E. V. The business processes allocation matrix as the instrument of architecture formation of innovative infrastructure in the region 458
Orlov A. I., Tsisarskiy A. D. Business model of risks evaluation of projects 464
Sukhodolov A. P., Sukhodolov Y. A. Prospects for creating an aerospace cluster in the east of Russia 471

Information about the authors 480

Раздел
Part
1

МАТЕМАТИКА, МЕХАНИКА, ИНФОРМАТИКА

MATHEMATICS, MECHANICS, COMPUTER SCIENCE

УДК 519.718

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 274–282

МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ВИДЕОКОНФЕРЕНЦСВЯЗИ

К. Е. Лебедева*, Р. В. Лебедев, А. В. Мурыгин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: shudrova87@mail.ru

Основной проблемой организации надежной системы видеоконференцсвязи является обеспечение минимальной скорости передачи данных при поддержании максимальной скорости обработки аудио- и видеопотока. Существующие программные решения имеют ограничения по числу одновременных участников сеанса видеоконференцсвязи, аппаратные системы обладают значительной стоимостью. Основными методами повышения надежности систем видеоконференцсвязи на сегодняшний день являются способы распределения нагрузки. Авторами предложена новая методика повышения надежности видеоконференцсвязи для авторизованных пользователей с гарантированной доставкой сообщений и модели вероятностного доступа к системам видеоконференцсвязи, пригодные для оценки надежности таких систем. Модель верхнего уровня позволяет описать различные системы видеоконференцсвязи, учитывая их характерные особенности. Модель нижнего уровня описывает системы видеоконференцсвязи для авторизованных пользователей с гарантированной доставкой сообщений. Вероятностные модели доступа, предложенные в работе, основаны на следующих понятиях: субъекты, объекты, действия. Для определения вероятности полного доступа к системе видеоконференцсвязи, состоящей из нескольких серверов и клиентов, необходимо определить вероятность доступности серверов и вероятность доступности клиентов. Математический аппарат оценки системы видеоконференцсвязи строится на основе многоканальных систем массового обслуживания (СМО) с ограниченной очередью для случая стандартного режима работы системы и совокупности однородных одноканальных СМО с ограниченной очередью. Приведена оценка эффективности специального режима по отношению к стандартному посредством сравнения вероятностей отказа системы в стандартном и специальном режимах. Используется программное обеспечение, разработанное авторами. На выходе программное обеспечение выдает график в трех координатах $P(k_{total}, k_{spec})$, k_{total}, k_{spec}. При заданном уровне $P(k_{total}, k_{spec})$ по графику определяются k_{total} и k_{spec}. В качестве примера приведен график, отражающий целесообразность использования специального режима в системе видеоконференцсвязи, заданной числовыми параметрами. Представлен график зависимости максимально возможного количества специальных клиентов при заранее заданном общем количестве клиентов и заданном уровне $P(k_{total}, k_{spec})$.

Ключевые слова: видеоконференцсвязь, надежность, система массового обслуживания, вероятность получения доступа.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 274–282

METHODOLOGY OF IMPROVING VIDEO CONFERENCE RELIABILITY

K. E. Lebedeva*, R. V. Lebedev, A. V. Murygin
[2]Reshetnev Siberian State University of Science and Technologies
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: shudrova87@mail.ru

One of the main problems of organizing a reliable videoconference system is to provide minimum data transfer speed while maintaining maximum speed of audio and video stream processing. Existing software solutions have limitations on number of simultaneous participants in a videoconferencing session, hardware systems are expansive. Today the main methods for improving reliability of videoconferencing systems are methods of load sharing. The authors propose a new technique for increasing the reliability of videoconferencing for authorized users with guaranteed messages delivery and model of probabilistic access to videoconference. The model contains two levels. The top-level model allows describing various videoconference systems taking into account their specific features. The low-level model describes videoconference systems for authorized users with guaranteed massage delivery. The model is based on the following concepts: subjects, objects, actions. To determine the probability of full access to a videoconference system consisting of several servers and clients it is necessary to determine the probability of their availability. The mathematical apparatus for evaluating the videoconference system for the standard mode is based on the multi-channel queue system with limited queue, and a set of homogeneous single-channel queue systems with limited queue for special mode.

Evaluating of effectiveness of special and standard mode is performed by comparing the probability of access failure. For those calculations software developed by the authors is used. At the output software issues a graph in three coordinates $P(k_{total}, k_{spec})$, k_{total}, k_{spec}. From the graph for a given level $P(k_{total}, k_{spec})$ can be defined k_{total} and k_{spec}. As the example, the article contains the graph reflecting advisability of using a special mode in a videoconference system specified by numerical parameters. The graph shows the maximum number of special clients for predetermined total number of clients and given level of threshold probability $P(k_{total}, k_{spec})$.

Keywords: videoconferencing, reliability, queuing system, probability of access.

Введение. Увеличение пропускной способности каналов передачи информации сделало видеоконференции удобным средством общения. Видеоконференции проводятся для обмена опытом специалистами в различных областях, проведения корпоративных совещаний, также видеосвязь широко используется в образовательных целях. Системы видеоконференцсвязи активно используются в ракетно-космической отрасли для организации связи между удаленными площадками во время работы над совместными проектами. Одним из приоритетных направлений развития систем видеоконференцсвязи на сегодняшний день является обеспечение их надежности [1]. В сферах применения систем видеоконференцсвязи, связанных с точными операциями (медицина, обучение работе на станке), очень важно поддерживать заданные характеристики качества. Любые искажения могут привести к неправильной трактовке информации и, как следствие, ошибочным действиям участников видеоконференции [2].

Основные проблемы. Сложность обеспечения надежности видеоконференцсвязи связана с необходимостью одновременного поддержания высокой скорости обработки информации и передачи данных с минимальными задержками, а также высокого разрешения изображения и качества звука, при этом современным системам желательно обладать дополнительным инструментарием интерактивного взаимодействия.

Существующие решения также плохо совместимы между собой, так как производители не заинтересованы в интеграции различных систем, напротив, система видеоконференцсвязи чаще всего представляет собой единое целое из программных и аппаратных компонентов, масштабировать такую систему возможно, лишь применяя компоненты того же производителя. Такой подход приводит к дороговизне существующих решений.

Одним из перспективных решений проблемы обеспечения надежности видеоконференцсвязи является использование технологий распределения нагрузки сети. Оптимальное распределение сетевой нагрузки позволяет обеспечивать заданные характеристики видеоконференцсвязи за счет управления информационными потоками.

В настоящее время на рынке средств защиты информации в основном представлены средства зарубежного производства, что несет в себе определенную угрозу при использовании таких систем в государственных учреждениях [3]. Все большей популярностью пользуются различные приложения для проведения видеоконференций через глобальные телекоммуникационные сети [4].

Исследования в области видеоконференцсвязи проводились в основном зарубежными учеными: C. Zhou, W. Feng, Z. Zhou, X. Tian, J. Tian (Research on audio-video quality evaluation system of video conferencing system), J. Li, J. Wang, W. Wu, L. Chen (Design and implementation of web video conferencing system based on Reds), W. Simpson (Video over IP: IPTV, Internet video, H 264, P2P, WebTV and Streaming: a complete guide to understanding the technology), H. Yan, Z. Sun, L. Zhang, H. Yuan (A scalable video communications framework based on D-bus), S. Braun, J. Taylor (Videoconference and remote interpreting in legal proceedings), B. Furht, S. W. Smoliar, H. Zhang (Video and image processing in multimedia systems), Z. Kang, L. Yian-Feng (Design of H.323-based MC Gateway subsystem for video conference) и др.

В работах отечественных авторов В. С. Синепола, И. А. Цикина, Д. О. Кривошеи, В. В. Тупицына, А. Власкина, А. И. Савельева и М. А. Прищепы, Е. А. Будникова и Н. А. Филипповой, Т. Ж. Айдынабай и Г. Ж. Шуйтенова, П. П. Кравченко, Н. Ш. Хусаинова и А. Н. Шкурко, В. А. Ягупова, М. В. Стремоухова, О. О. Басова рассматриваются цифровые методы передачи аудио- и видеоинформации в компьютерных сетях, дан анализ состояния работ по компьютерной видеоконференцсвязи в России, рассмотрены основные проблемы отрасли [1; 5–12].

В работах А. И. Савельева, В. В. Прохорова, И. П. Манаковой, А. А. Кузнецова, С. Г. Семенова, С. Н. Симоненко и Е. В. Мелешко рассмотрены способы повышения надежности видеоконференцсвязи. К таким способам относят:

– управление потоками данных, которое достигается упрощением клиентской части приложения и реорганизацией серверной;

– переподключение для смены источников плееров зрителей;

– управление сетевыми ресурсами с помощью статистики;

– динамическое распределение ресурсов сети [8].

Основными методами повышения надежности систем видеоконференцсвязи на сегодняшний день являются:

1. Использование оптимизированных современных протоколов маршрутизации для оптимального и рационального использования канального ресурса системы.

2. Использование алгоритмов децентрализованных самоорганизующихся сетей, которые позволяют распределить нагрузку на все элементы пропорционально их ресурсам и характеристикам, тем самым увеличивая масштабируемость и уменьшая стоимость такого решения при отсутствии необходимости поддержки

протоколов прикладного уровня на сетевом оборудовании [13].

3. Применение механизмов динамического перераспределения скорости передачи информации при совместном обслуживании трафика сервисов реального времени и трафика данных, допускающего задержку [14].

4. Автоматический способ определения текущего говорящего для назначения его потокам мультимедийных данных наибольшего приоритета при передаче остальным участникам [15].

Основным способом применения управления нагрузкой для организации надежной видеоконференцсвязи на сегодняшний день является обеспечение минимальной скорости передачи данных и максимальной скорости обработки аудио- и видеопотока. Для решения этих проблем разработаны кодеки, позволяющие сжимать сигнал и кодировать его для канала связи, а также восстанавливать и декодировать на приемной стороне. Для организации надежного сеанса видеоконференцсвязи требуется кодек, позволяющий сжать видеоданные, сохранив заданные характеристики качества, и канал, по которому эти данные можно будет передать с приемлемой скоростью.

Существует два основных типа решений с точки зрения топологии системы: система с выделенным центром и распределенная система [16]. Использование одного узла в качестве центрального элемента негативно сказывается на характеристиках работы системы в случае проведения сеанса многопользовательской видеоконференцсвязи. Распределенные системы, использующие в качестве канала передачи сеть Интернет, отличаются низким качеством связи. Использование выделенных каналов связи значительно повышает стоимость системы.

Существует проблема стандартизации, необходимость использования специальных технологий и протоколов в зависимости от производителя системы видеоконференцсвязи. Программные решения существенно ограничивают число одновременных участников сеанса видеоконференцсвязи. С другой стороны, применение специальных аппаратных модулей значительно увеличивает стоимость подобных систем.

Методика повышения надежности. Авторами предложена новая методика повышения надежности видеоконференцсвязи для авторизованных пользователей с гарантированной доставкой сообщений и модели вероятностного доступа к системам видеоконференцсвязи, пригодные для оценки надежности таких систем. Модель верхнего уровня позволяет описать различные системы видеоконференцсвязи, учитывая их характерные особенности. Модель нижнего уровня описывает системы видеоконференцсвязи для авторизованных пользователей с гарантированной доставкой сообщений. Полученные вероятностные значения доступа позволяют определить надежность системы, что ранее являлось трудоемкой задачей (в иных реализациях вероятностной модели доступа) или не рассматривалось (в логических моделях доступа). Результаты получены с учетом широко представленных в научной литературе мандатной модели, дискреционной модели и ролевой модели доступа.

Методика повышения надежности систем видеоконференцсвязи состоит из следующих шагов:

1. Определение исходных параметров системы видеоконференцсвязи.

2. Определение требований к надежности через вероятность получения доступа.

3. Построение моделей доступа верхнего и нижнего уровня: определение значения P – вероятности получения доступа для каждого субъекта.

4. Анализ полученного результата сравнения текущего уровня вероятности доступа с требуемым уровнем вероятности доступа.

5. При необходимости – увеличение вероятности получения доступа с помощью алгоритма повышения надежности.

Модель вероятностного доступа к информационным ресурсам для повышения надежности видеоконференцсвязи (модель верхнего уровня). В ходе исследований была предложена вероятностная модель доступа к системам видеоконференцсвязи, пригодная для оценки надежности таких систем. Разработанная модель позволяет описать различные системы видеоконференцсвязи и учитывает их характерные особенности.

Значение вероятности доступа может быть рассчитано на основе аппарата марковских случайных процессов с дискретными состояниями и непрерывным временем.

Вероятностная модель доступа, предложенная в работе, основана на следующих понятиях: субъекты (*subjects*), объекты (*objects*), действия (*actions*). Для каждого объекта доступным является определенный перечень действий.

Отношения субъектов и объектов представлены в табл. 1, где P_{ijk} – вероятность совершения действия, i – количество действий, которые можно выполнить над объектом, j – количество объектов, k – количество субъектов. Чтобы получить доступ, субъект должен иметь возможность совершить любое из k допустимых действий с j объектами.

Таблица 1

Возможные действия субъектов к объектам

	Object_1			Object_2			…	Object_j		
	subject_1	…	subject_i	subject_1	…	subject_i	…	subject_1	…	subject_i
Action_1	P_{111}	…	P_{i11}	P_{121}	…	P_{i21}	…	P_{1j1}	…	P_{ij1}
Action_2	P_{112}	…	P_{i12}	P_{122}	…	P_{i22}	…	P_{1j2}	…	P_{ij2}
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
Action_k	P_{11k}	…	P_{i1k}	P_{12k}	…	P_{i2k}	…	P_{1jk}	…	P_{ijk}

Вероятность получения каждым субъектом полного доступа к каждому объекту выражена формулой:

$$P = \prod_i P_i. \quad (1)$$

Понятие вероятности получения i-м субъектом доступа к любому объекту для каждого субъекта определено следующим образом:

$$P_i = \prod_j P_{ij}. \quad (2)$$

Вероятность получения доступа субъекта к объекту равна произведению вероятностей всех действий субъекта к объекту:

$$P_{ij} = \prod_k P_{ijk}. \quad (3)$$

Тогда вероятность получения каждым субъектом полного доступа к каждому объекту выражена формулой

$$P = \prod_i \prod_j \prod_k P_{ijk}. \quad (4)$$

Модель вероятностного доступа к информационным ресурсам для повышения надежности видеоконференцсвязи для авторизованных пользователей с гарантированной доставкой сообщений (модель нижнего уровня). Рассмотрим пример. Вероятностная модель доступа, предложенная в работе, основана на следующих понятиях: субъекты, объекты, действия. Ниже приведены используемые обозначения.

Субъекты (*subjects*): S – сервер, C – клиент.

Объекты (*objects*): видеоинформация (*video*), аудиоинформация (*audio*), файл (*file*), сообщение (*message*), виртуальная доска (*board*).

Действия (*actions*): чтение (*read*), запись (*write*), отправка (*send*), редактирование (*edit*), выполнение (*execute*), удаление (*delete*), создание (*create*).

Для каждого объекта доступным является определенный перечень действий. Отношения субъектов и объектов представлены в табл. 2, где «+» – действие возможно с некой вероятностью, «–» – действие по отношению к данному объекту не применяется.

Критерий надежности системы сформулирован следующим образом:

$$P \to 1, \quad (5)$$

Вероятность получения каждым субъектом полного доступа к каждому объекту выражена формулой

$$P = P_s \cdot P_c, \quad (6)$$

где P_s – вероятность доступности сервера; P_c – вероятность доступности клиента;

$$P_s = P_{sv} \cdot P_{sa} \cdot P_{sf} \cdot P_{sm} \cdot P_{sb}, \quad (7)$$

где P_{sv} – доступность видеоинформации на сервере; P_{sa} – доступность аудиоинформации на сервере; P_{sf} – доступность файлов на сервере; P_{sm} – доступность сообщений на сервере; P_{sb} – доступность виртуальной доски на сервере;

$$P_c = P_{cv} \cdot P_{ca} \cdot P_{cf} \cdot P_{cm} \cdot P_{cb}, \quad (8)$$

где P_{cv} – доступность видеоинформации у клиента; P_{ca} – доступность аудиоинформации у клиента; P_{cf} – доступность файлов у клиента; P_{cm} – доступность сообщений у клиента; P_{cb} – доступность виртуальной доски у клиента;

$$P_{sv} = \prod_k P_{svk}, \quad P_{sa} = \prod_k P_{sak}, \quad P_{sf} = \prod_k P_{sfk},$$

$$P_{sm} = \prod_k P_{smk}, \quad P_{sb} = \prod_k P_{sbk},$$

где P_{svk} – вероятность совершения k-го действия с видеоинформацией на сервере; P_{sak} – вероятность совершения k-го действия с аудиоинформацией на сервере; P_{sfk} – вероятность совершения k-го действия с файлами на сервере; P_{smk} – вероятность совершения k-го действия с сообщениями на сервере; P_{sbk} – вероятность совершения k-го действия с виртуальной доской на сервере;

$$P_{cv} = \prod_k P_{cvk}, \quad P_{ca} = \prod_k P_{cak}, \quad P_{cf} = \prod_k P_{cfk},$$

$$P_{cm} = \prod_k P_{cmk}, \quad P_{cb} = \prod_k P_{cbk},$$

где P_{cvk} – вероятность совершения k-го действия с видеоинформацией у клиента; P_{cak} – вероятность совершения k-го действия с аудиоинформацией у клиента; P_{cfk} – вероятность совершения k-го действия с файлами у клиента; P_{cmk} – вероятность совершения k-го действия с сообщениями у клиента; P_{cbk} – вероятность совершения k-го действия с виртуальной доской у клиента.

Для определения вероятности полного доступа к системе видеоконференцсвязи, состоящей из нескольких серверов и клиентов, необходимо определить вероятность доступности серверов и вероятность доступности клиентов. Вероятность доступности клиентов в рамках решаемой задачи принята равной 1. Определим вероятность доступности серверов.

Таблица 2

Возможные действия субъектов к объектам

	Video		Audio		File		Message		Board	
	S	*C*	*S*	*C*	*S*	*C*	*S*	*C*	*S*	*C*
Read	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Write	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Create	–	–	–	–	+	+	+	+	+	+
Edit	–	–	–	–	+	+	+	+	+	+
Execute	–	–	–	–	+	+	+	–	–	–
Delete	–	–	–	–	+	+	+	+	+	+
Send	+	+	+	+	+	+	+	+	–	–

Состояния сервера:

– сервер свободен (или сервер обрабатывает заявки, но принимает новые, поступающие идут на обработку);

– сервер занят обслуживанием заявок и не может больше принимать заявки, все приходящие заявки – в очереди, ограниченной по времени (или неисправен).

P_0 – вероятность того, что все серверы свободны;

P_1 – вероятность того, что один сервер занят, остальные свободны;

P_n – вероятность того, что все серверы заняты, ноль заявок в очереди;

P_{n+m} – вероятность того, что все серверы заняты, m заявок в очереди (вероятность отказа) [17].

Математический аппарат оценки системы видеоконференцсвязи строится на основе многоканальных систем массового обслуживания (СМО) с ограниченной очередью для случая стандартного режима работы системы и совокупности однородных одноканальных СМО с ограниченной очередью.

Модель стандартного режима. Ниже представлены исходные данные:

$S=\left\{s_i,\ i=\overline{1,n}\right\}$ – множество серверов в системе;

$C=\left\{c_j,\ j=\overline{1,k}\right\}$ – множество клиентов в системе;

$M\left(S\right)=n$ – количество серверов в системе;

$M\left(C\right)=k$ – количество клиентов в системе.

Для каждого сервера $s_i \in S$ определено μ_i – скорость обработки заявок. Считаем, что все серверы в системе одинаковы со скоростью обработки заявок μ:

$$\forall s_i, s_j \in S : \mu_i = \mu_j = \mu. \tag{9}$$

Для каждого клиента $c_i \in C$ поступающий поток заявок рассматривается как простой пуассоновский процесс интенсивности λ_i. Считаем, что все клиенты в системе имеют одинаковые характеристики и создают поток заявок (пакетов) одинаковой интенсивности:

$$\forall c_i, c_j \in C : \lambda_i = \lambda_j = \lambda_1, \tag{10}$$

$$\lambda = \sum_{i=1}^{k} \lambda_i = k\lambda_1, \tag{11}$$

где λ – общая интенсивность потока клиентов в системе.

Расчет вероятностей состояния системы:

$$\lambda P_0 = \mu P_1 \to P_1 = \frac{\lambda}{\mu} P_0, \tag{12}$$

$$\lambda P_1 = 2\mu P_2 \to \frac{\lambda^2}{\mu} P_0 = 2\mu P_2 \to P_2 = \frac{1}{2}\frac{\lambda^2}{\mu^2} P_0. \tag{13}$$

Формулы (12) и (13) определяют значение вероятности P_i для $i=1,\ i=2$. Данные формулы можно использовать в качестве базы для применения метода математической индукции. Сделаем предположение для случая $i=k$, запишем формулу для P_k в следующем виде:

$$P_k = \frac{1}{k!}\frac{\lambda^k}{\mu^k} P_0. \tag{14}$$

Тогда

$$\lambda P_k = \left(k+1\right)\mu P_{k+1} \to P_{k+1} = \\ = \frac{1}{k+1}\frac{\lambda}{\mu} P_k = \frac{1}{\left(k+1\right)!}\frac{\lambda^{k+1}}{\mu^{k+1}} P_0. \tag{15}$$

Из (15) следует, что формула (14) для P_k справедлива. Данная формула имеет место для всех s_k, где $k \le n$.

Для случая $k > n$ имеем следующий расчет вероятностей:

$$\lambda P_n = n\mu P_{n+1} \to P_{n+1} = \frac{\lambda}{\mu}\cdot\frac{1}{n}\cdot P_n, \tag{16}$$

$$\lambda P_{n+1} = n\mu P_{n+2} \to P_{n+2} = \frac{\lambda^2}{\mu^2}\cdot\frac{1}{n^2}\cdot P_n. \tag{17}$$

Указанные выражения (16), (17) определяют значение вероятности P_i для $i=n+1$, $i=n+2$, они также могут быть рассмотрены в качестве базы математической индукции. Сделаем индуктивное предположение для $i=t$:

$$P_{n+t} = \frac{\lambda^t}{\mu^t}\cdot\frac{1}{n^t}\cdot P_n, \tag{18}$$

$$\lambda P_{n+t} = n\mu P_{n+t+1} \to P_{n+t+1} = \frac{\lambda}{\mu}\cdot\frac{1}{n}\cdot P_{n+t} = \\ = \frac{\lambda}{\mu}\cdot\frac{1}{n}\cdot\frac{\lambda^t}{\mu^t}\cdot\frac{1}{n^t}\cdot P_n = \frac{\lambda^{t+1}}{\mu^{t+1}}\cdot\frac{1}{n^{t+1}}\cdot P_n. \tag{19}$$

Из (19) следует, что формула (18) для P_t справедлива. Данная формула имеет место для всех s_t, где $t \le m$, где m – длина очереди СМО.

Исходя из полученных расчетов вероятностей состояний системы, справедливы следующие выражения:

$$P_0 + P_1 + \cdots + P_n + P_{n+1} + \cdots + P_{n+m} = 1, \tag{20}$$

$$P_0 + \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i \cdot\frac{1}{i!}\cdot P_0 + \sum_{j=1}^{m}\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{n+j}\cdot\frac{1}{n^j n!}\cdot P_0 = 1. \tag{21}$$

Отсюда выразим вероятность «нулевого» состояния системы P_0. Для упрощения записи формулы примем $\rho = \dfrac{\lambda}{\mu}$:

$$P_0 = \left[1 + \sum_{i=1}^{n}\frac{\rho^i}{i!} + \sum_{j=1}^{m}\frac{\rho^{j+n}}{n^j n!}\right]^{-1}. \tag{22}$$

Тогда вероятность отказа P_{n+m} можно представить следующим образом:

$$P_{n+m} = \frac{\rho^{n+m}}{n^m n!}\left[1 + \sum_{i=1}^{n}\frac{\rho^i}{i!} + \sum_{j=1}^{m}\frac{\rho^{n+j}}{n^j n!}\right]^{-1}. \tag{23}$$

Тогда

$$P = 1 - P_{n+m} = 1 - \left(\frac{\rho^{n+m}}{n^m n!}\left[1 + \sum_{i=1}^{n}\frac{\rho^i}{i!} + \sum_{j=1}^{m}\frac{\rho^{n+j}}{n^j n!}\right]^{-1}\right).$$

Модель специального режима. В специальном режиме системы все клиенты разделяются на группы. Каждая группа клиентов привязывается к определенному серверу. То есть

$$C = \bigcup_{i=1}^{n} C_i \ , \bigcap_{i=1}^{n} C_i = \varnothing, \qquad (24)$$

где C_i – группы клиентов, привязанные к серверу *i*.

Без потери общности рассуждений можно полагать, что клиенты распределяются на равные группы:

$$\forall C_i, C_j : M\left(C_i\right) = M\left(C_j\right) = k/n = \bar{k}.$$

Система в специальном режиме может рассматриваться как совокупность независимых однородных одноканальных СМО с ограниченной очередью и отказами. В этом случае суммарный поток заявок (пакетов) от группы клиентов C_i для *i*-го сервера равен

$$\lambda = \sum_{i=1}^{\bar{k}} \lambda_i = \bar{k}\lambda_1. \qquad (25)$$

Интенсивность обработки заявок $\mu = \text{const}$ для всех состояний системы.

Проведем расчет вероятностей состояний системы в специальном режиме:

$$\lambda P_0 = \mu P_1 \to P_1 = \frac{\lambda}{\mu} P_0, \qquad (26)$$

$$\lambda P_1 = \mu P_2 \to \frac{\lambda^2}{\mu} P_0 = \mu P_2 \to P_2 = \frac{\lambda^2}{\mu^2} P_0. \qquad (27)$$

По аналогии с расчетами, проведенными для обычного режима, применяя метод математической индукции, получим общую формулу расчета вероятности состояния системы для P_k:

$$P_k = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k P_0. \qquad (28)$$

Отсюда, исходя из $P_0 + P_1 + \cdots + P_m = 1$,

$$P_0 = \left[\sum_{i=0}^{m} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i\right]^{-1},$$

$$P_m = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^m \left[\sum_{i=0}^{m} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i\right]^{-1} = \rho^m \left[\sum_{i=0}^{m} \rho^i\right]^{-1}. \qquad (29)$$

Эффективность методики повышения надежности. Полагая, что основу системы видеоконференцсвязи составляют серверы видеоконференцсвязи, во время проведения сеанса видеоконференцсвязи справедливо считать количество серверов неизменным, $n = \text{const}$. Тогда вероятность отказа будет зависеть только от количества клиентов в системе. Необходимо отметить, что для каждого режима работы системы количество клиентов считается независимым:

k_{total} – общее количество клиентов для стандартного режима;

k_{spec} – общее количество клиентов для специального режима.

Оценка эффективности специального режима по отношению к стандартному выполняется посредством сравнения вероятностей отказа системы в стандартном и специальном режимах для определенных значений k_{total} и k_{spec}:

$$P\left(k_{total}, k_{spec}\right) = P_{n+m} - P_m. \qquad (30)$$

Специальный режим считается эффективным, когда $P\left(k_{total}, k_{spec}\right) > 0$.

На практике необходимо определить k_{total} и k_{spec} при желаемом уровне $P\left(k_{total}, k_{spec}\right)$. Используется программное обеспечение, разработанное авторами. На вход подаются следующие параметры:

- поток от одного клиента;
- скорость обработки запросов сервером;
- длина очереди;
- коэффициент наполнения очереди;
- максимум серверов и клиентов.

На выходе программное обеспечение выдает график в трех координатах $\left(P\left(k_{total}, k_{spec}\right), k_{total}, k_{spec}\right)$. При заданном уровне $P\left(k_{total}, k_{spec}\right)$ по графику определяются k_{total} и k_{spec}.

На рис. 1 в качестве примера приведен график, отражающий целесообразность использования специального режима в системе видеоконференцсвязи, заданной следующими параметрами:

- $\rho = \lambda_1/\mu = 1/16$ – отношение интенсивности поступления пакетов от одного клиента к интенсивности обработки пакетов сервером; отношение задано из соображений соотношения количества ядер процессоров для персонального компьютера и вычислительного сервера;
- $n = 5$ – количество серверов в системе;
- $m = \rho^{-1} = 16$ – средняя длина очереди сервера;

$K = 200$ – общее количество клиентов в системе.

На рис. 2 представлен график зависимости максимально возможного количества специальных клиентов при заранее заданном общем количестве клиентов и заданном уровне $P\left(k_{total}, k_{spec}\right)$ (в примере $\left(k_{total}, k_{spec}\right) > 0,2$). Если количество специальных клиентов в системе видеоконференцсвязи меньше максимально возможного, применение алгоритма «Метка привилегий» считается целесообразным при заданном $P\left(k_{total}, k_{spec}\right)$.

Рис. 1 и 2 подтверждают эффективность применяемой методики и определяют границы применимости для заданных числовых значений.

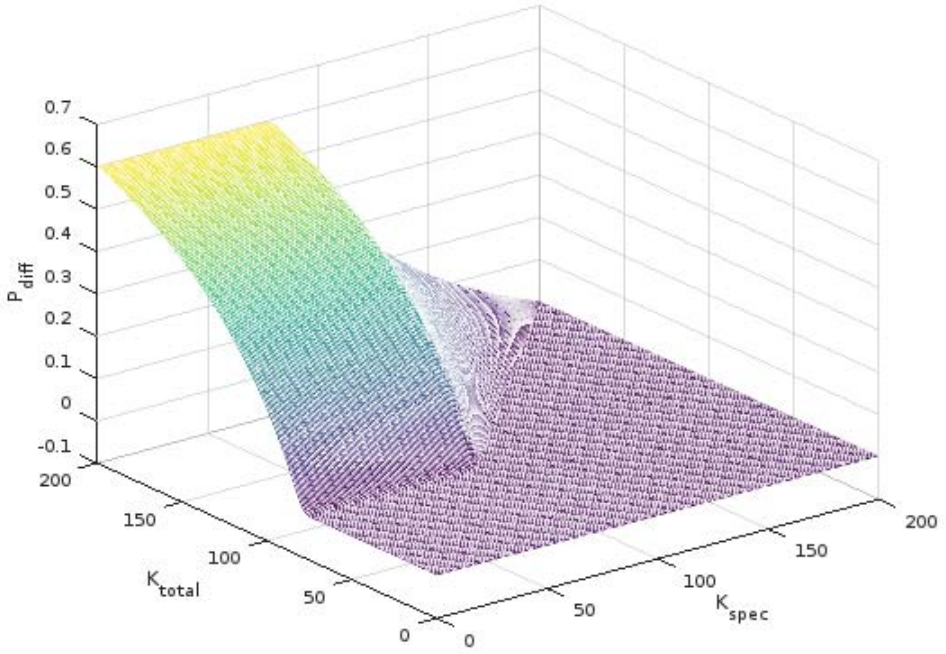


Рис. 1. График эффективности системы видеоконференцсвязи $\left(P\left(k_{total},k_{spec}\right),k_{total},k_{spec}\right)$

Fig. 1. Diagram of effectiveness of videoconference system $\left(P\left(k_{total},k_{spec}\right),k_{total},k_{spec}\right)$

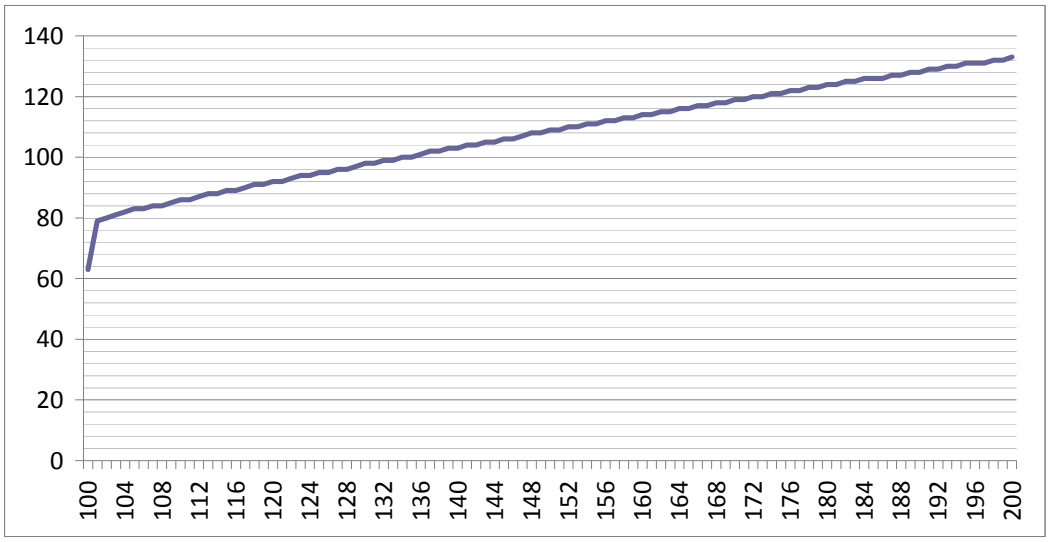


Рис. 2. График эффективности системы видеоконференцсвязи $\left(k_{total},k_{spec}\right)$

Fig. 2. Diagram of effectiveness of videoconference system $\left(k_{total},k_{spec}\right)$

Заключение. Разработана новая методика обработки информации, которая путем выделения привилегированного трафика и оптимизации потоков информации позволяет повысить надежность системы видеоконференцсвязи для авторизованных пользователей с гарантированной доставкой сообщений и повысить вероятность получения доступа к ресурсам систем видеоконференцсвязи. Новая модель вероятностного доступа к информационным ресурсам видеоконференцсвязи (модель верхнего уровня и модель нижнего уровня) позволяет оценить уровень надежности системы видеоконференцсвязи посредством определения вероятности получения доступа к информационным ресурсам. Исследование эффективности предложенной методики повышения надежности подтвердило повышение уровня надежности посредством увеличения вероятности получения доступа к ресурсам системы видеоконференцсвязи путем сравнения вероятностей отказа системы в стандартном и специальном режимах.

Библиографические ссылки

1. Синепол В., Цикин И. Системы компьютерной видеоконференцсвязи. М. : ООО «Мобильные телекоммуникации», 1999. 166 с. Сер. «Связь и бизнес».

2. Лебедева К., Томилина А. Алгоритмы и программные решения организации защищенного доступа к компьютерным видеоконференциям // Решетневские чтения : материалы XVIII Междунар. науч. конф., посвященной 90-летию со дня рождения генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (11–14 нояб. 2014, г. Красноярск). В 3 ч. Ч. 2 / СибГАУ. Красноярск, 2014. С. 320–322.

3. Боровик П. Обеспечение информационной безопасности при использовании технологии видеоконференцсвязи в органах внутренних дел // Материалы XVI науч.-практ. конф. Гродно, 2011.

4. Белашенкова Н., Елизаров В., Семерханов И. Исследование проблем обеспечения информационной безопасности при проведении видеоконференций. СПб. : Изд-во Ун-та ИТМО, 2011.

5. Кривошея Д. Подход к оценке функциональной живучести иерархической системы видеоконференцсвязи на беспроводной ячеистой сети : дис. … к-та техн. наук. Орел, 2014.

6. Тупицын В. Разработка и анализ алгоритма построения топологии сети многоточечной видеоконференцсвязи : дис. … к-та техн. наук. Ярославль, 2013.

7. Власкин А. Видеоконференцсвязь: прошлое, настоящее, будущее // Интернет-журнал по широкополосным сетям и мультимедийным технологиям. Владивосток : ТОВВМУ, 2015. С. 92.

8. Савельев А., Прищепа М. Архитектура обмена данными без потерь в пиринговом веб-приложении видеоконференцсвязи // Управление, вычислительная техника и информатика : доклады ТУСУР. 2014. № 2. С. 238–245.

9. Будников Е., Филиппов Н. Технологии беспроводной передачи данных для организации видеоконференций // Успехи современного естествознания. 2011. № 7. С. 83.

10. Айдынабай Т., Шуйтенова Г. Технологии передачи данных в системах видеоконференцсвязи // Наука, техника и образование. 2015. № 4(10). С. 77–83.

11. Кравченко П., Хусаинов Н., Шкурко А. Программная система аудиовидеоконференцсвязи для локальных и корпоративных IP-сетей // Программные продукты и системы (Software & Systems). 2004. № 1. С. 27–30.

12. Ягупов В., Стремоухов М., Басов О. Применение пространственной фильтрации в задачах кодирования подвижных изображений // Известия ЮФУ. 2012. С. 123–125.

13. Прохоров В., Манакова И. Построение интернет-видеосистем в уловиях существенно ограниченной пропускной способности каналов связи // Аграрный вестник Урала. 2015. № 3 (133). С. 34–38.

14. Павлов А., Датьев И. Протоколы маршрутизации в беспроводных сетях // Труды кольского научного центра РАН. Апатиты : КНЦ РАН, 2014. С. 64–75.

15. Коханович Г., Вербицкий И. Метод динамического перераспределения потоков между портами устройства пакетной коммутации, позволяющий увеличить нагрузку сетевого оборудования // Математические машины и системы. Киев : Ин-т проблем математических машин и систем Национальной академии наук Украины, 2005. С. 148–160.

16. Шудрова К. Анализ видов балансировки нагрузки сети // Актуальные проблемы безопасности информационных технологий : материалы II Междунар. науч.-практ. конф. (9–12 сент. 2008, г. Красноярск). / СибГАУ. Красноярск, 2008. С. 86–90.

17. Экономико-математическое моделирование : учеб.-метод. пособие / О. Казаков, С. Миненко, Г. Смирнов. М. : МГИУ, 2006. С. 73–85.

References

1. Sinepol V., Cikin I. *Sistemy komp'yuternoy videokonferentssvyazi* [Computer video conferencing systems]. Moscow, Mobil'nye telekommunikatsii Publ., 1999, p. 166.

2. Lebedeva K., Tomilina A. [Algorithms and software solutions for secure access to computer video conferencing]. *Reshetnevskie chteniya: materialy XVIII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2014, Vol. 2, P. 320–322 (In Russ.).

3. Borovik P. *Obespechenie informacionnoj bezopasnosti pri ispolzovanii tehnologii videokonferencsvyazi v organah vnutrennih del* [Providing information security when using videoconferencing technology in the internal affairs agencies]. Grodno (Belarus), 2011.

4. Belashenkova N., Elisarov V., Semerhanov I. *Issledovanie problem obespecheniya informatsionnoy bezopasnosti pri provedenii videokonferentsiy* [Investigation of problems of information security in videoconferences]. St. Petersburg, UITMO Publ., 2011.

5. Krivosheya D. *Podhod k ocenke funkcionalnoj zhivuchesti ierarhicheskoj sistemi videokonferencsvyazi na besprovodnoj yacheistoj seti. Dis. kan. tehn. nauk* [An approach to assessing the functional survivability of a hierarchical video conferencing system on a wireless mesh network. Dr. techn. sci. diss]. Orel, 2014.

6. Tupicin V. *Razrabotka I analiz algoritma postroenia topologii seti mnogotochechnoj videokonferencsvazi. Dis. kan. tehn. nauk* [Development and analysis of the algorithm for building the topology of the network of multipoint video conferencing. Dr. techn. sci. diss]. Yaroslavl, 2013.

7. Vlaskin A. *Videokonferencsvyaz: proshloe, nastoyashee, budushee* [Videoconferencing: past, present, future]. Vladivostok, TOVVMU Publ., 2015, P. 92.

8. Saveljev A., Prishepa M. [Lossless data exchange architecture in peer-to-peer videoconferencing Web applications]. *Doklady TUSURa.* 2014, No. 2, P. 238–245 (In Russ.).

9. Budnikov E., Filippov N. [Wireless data transmission technologies for video conferencing]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2011, No. 7, P. 83 (In Russ.).

10. Ajdinabaj T., Shujtenova G. [Technologies of data transmission in videoconferencing systems]. *Nauka, tekhnika i obrazovanie.* 2015, No. 4(10), P. 77–83 (In Russ.).

11. Kravchenko P. Husainov N., Shkurko A. [Software audio-video conferencing system for local and corporate IP networks]. *Programmnye produkty i sistemy (Software & Systems).* 2004, No. 1, P. 27–30 (In Russ.).

12. Yagupov V., Stremouhov V., Basov O. [Application of spatial filtering in moving picture encoding problems]. *Izvestiya YuFU.* 2012, P. 123–125 (In Russ.).

13. Prohorov V., Manakova I. [The construction of Internet video systems in conditions of significantly limited bandwidth channels]. *Agrarnyy vestnik Urala.* 2015, No. 3 (133), P. 34–38 (In Russ.).

14. Pavlov A., Datjev I. *Protokoli marshrutizacii v besprovodnih setyah* [Routing protocols in wireless networks]. Apatiti, Murmanskaya obl.: KNC RAN Publ., 2014, P. 64–75.

15. Kohanovich G. Verbickij I. [The method of dynamic redistribution of flows between the ports of the packet switching device, which allows increasing the load of network equipment]. *Matematicheskie mashiny i sistemy.* 2005, P. 148–160 (In Russ.).

16. Shudrova K. *Analiz vidov balansirovki nagruzki seti* [Analysis of types of network load balancing]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2008, P. 86–90.

17. Kazarov O., Minenko S., Smirnov G. *Ekonomiko-matematicheskoe modelirovarie* [Economic-mathematical modeling]. Moscow, MGIU Publ., 2006, P. 73–85.

© Лебедева К. Е., Лебедев Р. В., Мурыгин А. В., 2017

УДК 004.932.2

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 283–289

ОБНАРУЖЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ТЕКСТУР ПО ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯМ В УСЛОВИЯХ НЕДОСТАТОЧНОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ

А. В. Пятаева*, Ю. Д. Куликова

Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26
*E-mail: anna4u@list.ru

Обнаружение динамических текстур на видеоизображениях в настоящее время находит все более широкое применение как на городских территориях (в частности, на территориях аэродромов), так и на территориях природных парков, лесных массивов. Качество работы алгоритма поиска динамических текстур зависит от наличия шумов, вносимых сложными погодными условиями и недостаточной освещенностью. Для компенсации недостаточной освещенности и повышения качества темных видеоизображений необходимо расширить диапазон яркостей, увеличить среднюю яркость пикселов, повысить контраст и избавиться от аддитивного шума. Для имитации недостаточной освещенности к изображениям с нормальной освещенностью последовательно применена гамма-коррекция, добавлен аддитивный гауссов шум и импульсный шум. Компенсация недостаточной освещенности реализована с помощью многомасштабного алгоритма «Ретинекс» с реставрацией цвета, подавление аддитивного шума выполнено с использованием фильтра Гаусса, импульсный шум устраняется с применением медианного фильтра. Для повышения резкости использован фильтр Лапласа. Использованы видеопоследовательности из набора данных Билькентского университета, компании Wildfilmsindia и др. Дополнительно репрезентативность тестового набора повышена самостоятельно снятой авторами в ночное время видеопоследовательностью. Экспериментальные исследования проведены на примере системы обнаружения дыма на основе локальных бинарных шаблонов. Точность обнаружения дыма в условиях недостаточной освещенности по сравнению с исходным изображением в среднем ниже на 28–30 %, при этом значительно увеличивается число ошибок первого рода и число ложных срабатываний до 34,2 и 27,4 % соответственно. На изображениях, улучшенных с помощью предложенного алгоритма компенсации недостаточной освещенности, точность обнаружения существенно возрастает и составляет 94,41 %, что ниже точности обнаружения дыма относительно исходного изображения всего на 2,3 %. Таким образом, экспериментальные исследования подтверждают эффективность предложенных методов и алгоритмов анализа динамических текстур на примере обнаружения дыма на видеопоследовательностях.

Ключевые слова: недостаточная освещенность, шум, динамические текстуры, видеопоследовательность, дым.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 283–289

VIDEO BASED DYNAMIC TEXTURE RECOGNITION UNDER SPECIFIC ILLUMINATION CONDITIONS

A. V. Pyataeva*, Y. D. Kulikova

Siberian Federal University,
School of Space and Information Technology
26, Kirensky Str., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation
*E-mail: anna4u@list.ru

Nowadays dynamic textures recognition is particularly important in different computer vision community tasks in a variety of fields such as urban scenes and forest scenes. The goal of the dynamic textures recognition can be different. Real scenes may include the objects with dynamic behavior because of possible varying illumination, blurring, or weather conditions. Under bad weather conditions the imaging system is degraded to produce low visibility images. Such effects may significantly degrade the performance of outdoor vision systems which relies on image/video. For illumination effects compensation and visual quality enhancement images it is necessary to average pixel intensity increase, expand the range of brightness, image contrast increase and eliminate influence of the additive noise. For the images obtained in adverse lighting conditions imitation in this work Gamma correction, additive Gaussian noise and impulse noise was applied successively. The proposed algorithm employs Multi Scale Retinex with Color Restoration, Laplacian, Gaussian and median filters.

For experimental researches of the databases of Bilkent University, Video Smoke Detection, Wildfilmsindia, V-MOTE were used. In addition, the representativeness of the test set is increased by a video sequence, which the authors themselves recorded at night. Experiments on video based smoke detection system based on spatio-temporal local binary pattern were computed. True recognition for smoke in adverse lighting conditions is degraded to 65 %. False rare rejection and false alert errors significantly increase to 34.2 % and 27.2 % respectively.

After adverse lighting compensation algorithm work true recognition of smoke regions increases to 94.41 %. This accuracy provides the influence of adverse lighting on a quality of smoke detection is studied. Experimental results show that the proposed method is feasible and effective for video-based dynamic texture analysis in varying illumination conditions

Keywords: varying illumination, noise, dynamic textures, video sequence, smoke.

Введение. Качество работы любого алгоритма компьютерного зрения падает вследствие наличия шумов, вносимых сложными погодными условиями, а также связанных с недостаточной освещенностью. Так, в работе [1] показано, что при наличии атмосферных осадков точность работы алгоритма верификации областей задымления падает на 10–15 %. Время суток существенно влияет на особенности отображения искомого объекта на видеопоследовательности. Уровень освещенности объектов на изображении является одним из основных аспектов, влияющих на качество работы алгоритмов компьютерного зрения, так как правильно различать предметы, например в сумерках при смене времени суток, бывает сложно даже человеку. Например, в работе [2] показано влияние времени суток на качество работы системы видеонаблюдения по обнаружению стоп-линий на регулируемых перекрестках, при этом количество ложных срабатываний зависело от полосы движения, времени суток, солнечной или пасмурной погоды, среднее количество ложных срабатываний варьировалось от 2 до 36 %. Для распознавания лиц при изменяющемся освещении предлагается алгоритм, основанный на представлении исходного изображения в виде матрицы изменения яркостей, что позволяет добиться устойчивости относительно изменений условий освещенности [3]. Снижение качества распознавания из-за изменений условий освещенности было описано в работах [4–9].

За последние годы было предложено множество алгоритмов по способам компенсации недостаточной освещенности, в которых можно выделить три основных подхода [10]:

1. Методы, напрямую моделирующие освещение (построение конусов освещения).

2. Методы, основой которых является представление изображения, нечувствительного к изменению освещенности (операторы Собеля, Робетса, Прюита, метод Канни, вейвлеты Габора).

3. Методы, нормализующие освещенность (методы фильтрации, устранение шумов, методы коррекции).

Для компенсации недостаточной освещенности съемки в работе использованы методы повышения качества изображения, нормализующие освещенность.

Особенности динамических текстур. Обнаружение динамических текстур в настоящее время находит широкое применение в системах видеонаблюдения как на городских территориях, так и при наблюдении за природными объектами. Целями поиска динамических текстур на видеоизображениях могут являться экологический мониторинг, обеспечение безопасности, контроль. К динамическим текстурам относят дым и пламя, воду, группу птиц, листья, облака, толпу людей и др. Динамическая текстура может рассматриваться как расширение статической текстуры, дополнительно содержащей элементы движения. Динамические текстуры – очень широкий, но слабоизученный тип текстур, который используется во многих задачах компьютерного зрения. Динамические текстуры могут иметь стохастическую и регулярную составляющую [11]. К характеристикам динамических текстур можно отнести следующие [12]:

– большое разнообразие форм;

– пространственные и временные закономерности;

– большой объем исходных данных;

– малое количество предопределенных структур.

Вероятностными особенностями динамических текстур являются размер, ориентация в пространстве, формы и расположение составных частей объекта на видеоизображении. Методы анализа динамических текстур зависят от искомого объекта и разделяются на следующие категории:

1. Методы, основанные на нахождении движения. Это наиболее популярная категория методов, так как движение – естественное свойство динамических текстур.

2. Пространственно-временная фильтрация и методы, основанные на преобразованиях. Эта группа методов описывает динамические текстуры в различных масштабах в пространстве и времени. К ней относятся, например, вейвлет-преобразования.

3. Методы, основанные на построении математических моделей, таких как генеративные (порождающие) модели (например, линейные динамические системы). Генеративные модели могут быть использованы для синтеза, сегментации и классификации.

4. Методы, основанные на геометрических пространственно-временных свойствах. Эта группа методов базируется на свойствах движущихся поверхностей. На основе характеристик поверхности возможно выявить особенности движения и определить внешний вид исследуемой текстуры.

Для обнаружения динамических текстур часто используется анализ беспорядка областей. Сложность вариаций контура может быть оценена с помощью фрактальной размерности. Например, фрактальная размерность, описывающая стохастическое поведение каждого набора пикселов, может быть оценена с помощью четырех мер: интенсивности пиксела μ_I, выражение (1), временного градиента яркости μ_B,

выражение (2), нормального потока μ_F, выражение (3) и лапласиана μ_L, выражение (4) [13]:

$$\mu_I(p_0,t_0) = \iint\limits_{B(p_0,t_0,r_s,r_t)} I(p,t)dpdt, \qquad (1)$$

где $I(p, t)$ – значение интенсивности пиксела p в видеопоследовательности изображений градации серого, $t = 1, 2, \ldots, N$; выражение $B(p_0, t_0, r_s, r_t)$ определяет 3D-куб с центром в точке (p_0, t_0), с пространственным радиусом r_s и временным радиусом r_t. Таким образом, определяемая по выражению (1) мера $\mu_I(p_0,t_0)$ показывает общую интенсивность в пространственно-временной области для соседей точки (p_0, t_0). Временной градиент яркости рассчитывается следующим образом:

$$\mu_B(p_0,t_0) = \int\limits_{B(p_0,t_0,r_s)} \frac{\partial I(p,t)}{\partial t}dp, \qquad (2)$$

где $B(p_0, t_0, r_s)$ – пространственный квадрат с центром в точке (p_0, t_0), с пространственным радиусом r_s (таким же, как и у меры μ_I). Эта мера показывает изменение суммарной временной интенсивности динамической текстуры вокруг точки (p_0, t_0). Для вычисления нормального потока используется формула (3), показывающая измерение перемещения пикселов вдоль направления, перпендикулярного градиенту яркости:

$$\mu_F(p_0,t_0) = \int\limits_{B(p_0,t_0,r_s)} \frac{\partial I(p,t)/\partial t}{\|\nabla I(p)\|}dp. \qquad (3)$$

Лапласиан, также используемый в качестве меры для динамического фрактального анализа, рассчитывается по формуле

$$\mu_L(p_0,t_0) = \int\limits_{B(p_0,t_0,r_s)} \Delta I(p,t)dp. \qquad (4)$$

В работе качество работы алгоритма компенсации недостаточной освещенности исследовано на примере сложной динамической текстуры – дыма. В настоящие время задача детектирования дыма на видеопоследовательности является актуальной вследствие сложности объекта исследования – произвольных форм, динамических и фрактальных свойств, вариаций внутри класса, а также из-за возникающих шумов на изображениях.

Компенсация условий недостаточной освещенности. Изображения, полученные при съемке в ночное время, как правило, обладают следующими особенностями [10]:

– ограниченный диапазон малых значений яркостей;
– низкая контрастность;
– присутствие аддитивного шума.

Следовательно, для компенсации недостаточной освещенности и повышения качества темных изображений необходимо расширить диапазон яркостей, увеличить среднюю яркость пикселов изображений, повысить контраст и избавиться от аддитивного шума.

Для компенсации недостаточной освещенности могут быть использованы методы гистограммной коррекции и усовершенствованные его формы (AHE, CLAHE, MAHE), спецификация, гомоморфный фильтр и др. В работе использован многомасштабный алгоритм «Ретинекс» (Multi Scale Retinex) [14]. Многомасштабный алгоритм «Ретинекс» основан на понятии цветопостоянства и представляется уравнением

$$R_i(x,y) = C(x,y)\times \\ \times\sum_{i=1}^{N} W_i\left(\log[I_i(x,y)] - \log[I_i(x,y)\cdot F(x,y)]\right). \qquad (5)$$

Для подавления шума на изображениях, как правило, применяют низкочастотные фильтры. К таким фильтрам относятся линейные усредняющие, нелинейные усредняющие, ранговые, полиномиальные. Наиболее эффективными фильтрами устранения аддитивного шума являются линейные усредняющие фильтры [15], основанные на операции линейной свертки, вычисляемой согласно формуле

$$G_{i,j} = \sum_{s=(m-1)/2}^{(m-1)/2}\sum_{t=(t-1)/2}^{(n-1)/2} W_{s,t}\cdot E_{(i+s),(j+t)}, \qquad (6)$$

где $[G_{i,j}]$ – элемент матрицы изображения после фильтрации; $[W_{s,t}]$ – элемент массива ядра свертки изображения, имеющий размеры $m\times n$; $[E_{i,j}]$ – элемент матрицы исходного изображения.

Основными моделями аддитивного шума являются шум Гаусса, Релея, Эрланга, экспоненциальный, белый и шум квантования. Шум Гаусса, или нормальный шум, образуется в собственных электрических цепях цифровых аппаратов и в фотосенсорах при недостаточной освещенности и сильных перепадах температур. Для устранения такого шума используется фильтр Гаусса, характерный фильтр размытия изображения, который использует нормальное распределение для вычисления преобразования, применяемого к каждому пикселу изображения. Распределения Гаусса в N измерениях имеет вид

$$G(r) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{N/2}}e^{-r^2/(2\sigma^2)}, \qquad (7)$$

или, в частном случае, для двух измерений:

$$G(u,v) = \frac{1}{2\pi\sigma^2}e^{-\left(u^2+v^2\right)/\left(2\sigma^2\right)}, \qquad (8)$$

где r – это радиус размытия, $r^2 = u^2 + v^2$; σ – стандартное отклонение распределения Гаусса. В случае двух измерений эта формула задает поверхность, имеющую вид концентрических окружностей с распределением Гаусса от центральной точки. Пикселы, где распределение отлично от нуля, используются для построения матрицы свертки, которая применяется к исходному изображению. Значение каждого пиксела становится средневзвешенным для окрестности. Исходное значение пиксела принимает наибольший вес (имеет наивысшее гауссово значение), и соседние пикселы принимают меньшие веса в зависимости от расстояния до них.

Импульсный шум возникает в результате ошибок декодирования, в процессе передачи фото- и видеоизображений вследствие электромагнитных наводок на канал передачи, а также в результате ошибок записи на устройствах хранения. Он характеризуется появлением случайных белых и черных точек. Наиболее

эффективными фильтрами для подавления импульсного шума являются усредняющие фильтры, а именно, медианная фильтрация, которая позволяет сохранить четкость деталей изображения. Медианные фильтры основаны на том, чтобы избавиться от резко отличающихся от других значений яркости пикселов, заменяя их значениями медианы яркости окрестности согласно выражению

$$G_{i,j} = \mathrm{med}[E_{i+s,j+t}; (s,t) \in W]; \quad i, j \in Z^2, \qquad (9)$$

где $[G_{i,j}]$ – элемент матрицы изображения после фильтрации; $[W_{s,t}]$ – элемент массива апертуры изображения, имеющий размеры $m \times n$; $[E_{i,j}]$ – элемент матрицы исходного изображения.

Медианный фильтр и фильтр Гаусса не только удаляют шум, но и «размывают» мелкие детали изображений посредством удаления высоких частот, поэтому в качестве способа постобработки целесообразно для повышения резкости использовать фильтр Лапласа. Дискретный лапласиан определяется как сумма вторых производных, а вычисляется как линейная аппроксимация суммы перепадов на соседних пикселах относительно центрального пиксела:

$$\begin{aligned} &\left[f(x+1,y) + f(x-1,y) - 2f(x,y)\right] + \\ &+\left[f(x,y+1) + f(x,y-1) - 2f(x,y)\right] = \\ &= f(x+1,y) + f(x-1,y) + f(x,y+1) + \\ &\quad + f(x,y-1) - 4f(x,y). \end{aligned} \qquad (10)$$

Таким образом, маска фильтра, используемого для реализации дискретного лапласиана, задается матрицей (11):

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \qquad (11)$$

Для повышения резкости изображения с помощью лапласиана необходимо вычесть из исходного изображения лапласиан. Итоговая маска задается матрицей (12):

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}. \qquad (12)$$

Таким образом, работа алгоритма компенсации пониженной освещенности выполняется следующим образом:

1. Расширение динамического диапазона видеоизображения и увеличение контрастности с помощью многомасштабного алгоритма «Ретинекс» с реставрацией цвета (Multi Scale Retinex with Color Restoration).
2. Подавление аддитивного шума с использованием фильтра Гаусса.
3. Подавление импульсного шума применением медианного фильтра.
4. Повышение резкости изображения с помощью фильтра Лапласа.

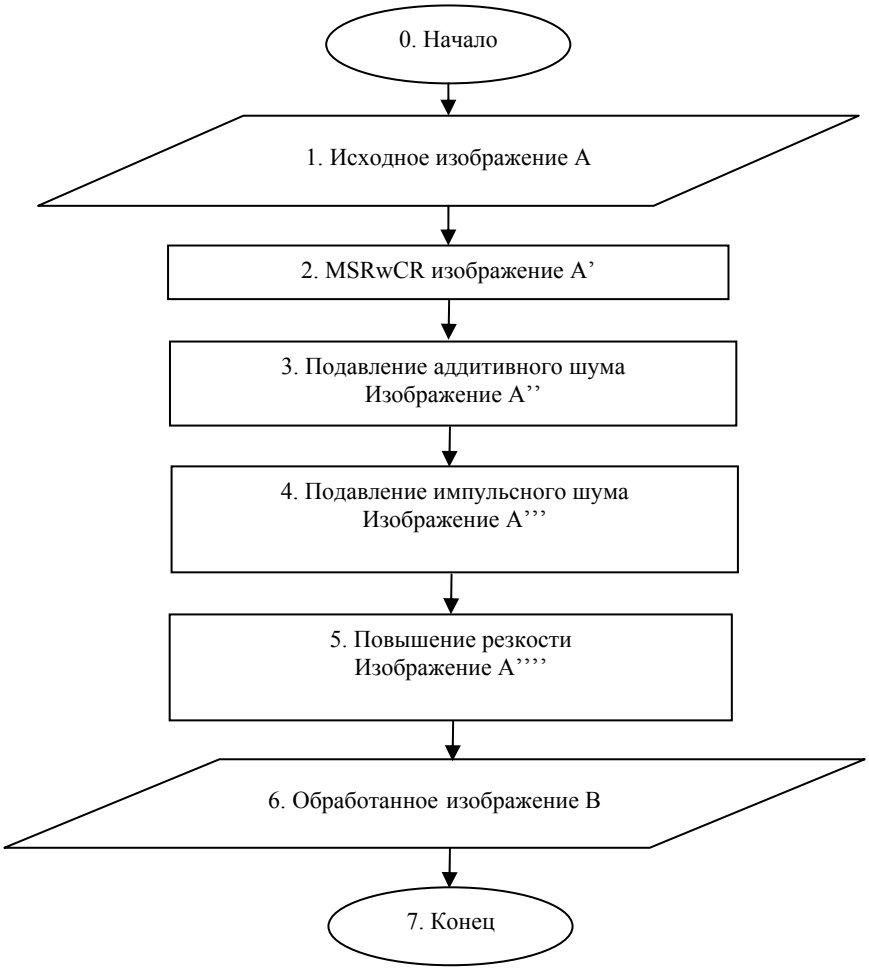
Блок-схема алгоритма компенсации недостаточной освещенности показана на рисунке.

Экспериментальные исследования. Для оценки качества работы алгоритма компенсации недостаточной освещенности использована система обнаружения областей задымления на видеопоследовательности с применением локальных бинарных шаблонов [16]. Дым как динамическая текстура обладает следующими особенностями: турбулентность, изменчивость, цветовые особенности, специфический способ распространения. К основным признакам визуального обнаружения дыма можно отнести цвет, форму, движение, текстуру, прозрачность. Как правило, для детектирования дыма не используют только один признак, а применяют сочетание нескольких классификаторов. Для детектирования дыма на видеоизображении в системе обнаружения областей задымления на видеопоследовательности с применением локальных бинарных шаблонов используется комбинированный способ распознавания дыма, позволяющий не только выделить движение на видеопоследовательности, но и учесть пространственно-временные свойства дыма, что увеличивает точность детектирования и уменьшает число ложных срабатываний.

Для проведения экспериментальных исследований использованы 5 видеопоследовательностей из известных тестовых наборов данных [17–20] и одна видеопоследовательность, снятая самостоятельно [21]. На видеопоследовательности, снятой самостоятельно, низкая освещенность была получена естественным образом. Для получения изображений, имитирующих условия недостаточной освещенности съемки, были последовательно применены гамма-коррекция ($\gamma = 1{,}9$), а также изображения были зашумлены аддитивным гауссовым шумом ($m = 0$, $\sigma^2 = 0{,}2$, $0{,}5$) и импульсным шумом с плотностью $\rho = 0{,}1$, $0{,}2$. Кадры использованных видеопоследовательностей, а также результат компенсации низкой освещенности показаны в табл. 1.

Результаты обнаружения дыма по видеопоследовательностям на открытых пространствах показаны в табл. 2. Результаты приведены для изображений, полученных при нормальной освещенности, в условиях шума (ночной съемки для самостоятельно полученной видеопоследовательности) и при компенсации влияния недостаточной освещенности. Оценивание выполнялось с помощью следующих характеристик: True Recognition (TR), % – точность распознавания, False Rejection Rate (FRR), % – ошибка первого рода, False Acceptance Rate (FAR), % – ошибка второго рода.

Точность обнаружения дыма в условиях недостаточной освещенности по сравнению с исходным изображением в среднем ниже на 28–30 %, при этом значительно увеличивается число ошибок первого рода и число ложных срабатываний до 34,2 и 27,4 % соответственно. На изображениях, улучшенных с помощью предложенного алгоритма компенсации недостаточной освещенности, точность обнаружения существенно возрастает и составляет 94,41 %, что ниже точности обнаружения дыма относительно исходного изображения всего на 2,3 %. Таким образом, экспериментальные исследования подтверждают эффективность предложенных методов и алгоритмов компенсации недостаточной освещенности при анализе динамических текстур (на примере обнаружения дыма на видеопоследовательностях).



Блок-схема алгоритма компенсации низкой освещенности

Flow chart of compensation algorithm of low light conditions

Таблица 1

Примеры кадров использованных видеопоследовательностей

Исходное изображение	Зашумленное изображение	Улучшенное изображение
Video smoke detection / dry_leaf, кадр 1155 (URL: http://staff.ustc.edu.cn /~yfn/vsd.html), разрешение, пикселы: 320×240, количество кадров: 1,2000		
Wildfilmsindia/ Smoke billows from the chimney of a brick factory, кадр 122 (URL: https://www.youtube.com/ watch?v=-TUbP5ENr8w), разрешение, пикселы: 1280×720, количество кадров: 1711		
Youtube/firenight, кадр 48 (URL: https://www.youtube.com/watch?v=tmBG_ v23zbk&t=12s), разрешение, пикселы: 1280×720, количество кадров: 1330		

Окончание табл. 1

Исходное изображение	Зашумленное изображение	Улучшенное изображение
	–	

Таблица 2

Результаты обнаружения дыма по видеопоследовательностям в различных условиях освещенности

Видеопоследовательность	Исходное изображение			Зашумленное изображение			Улучшенное изображение		
	TR	FRR	FAR	TR	FRR	FAR	TR	FRR	FAR
Video smoke detection / dry_leaf	100,0	0,00	2,07	74,12	25,88	17,21	97,98	2,02	4,12
Wildfilmsindia/ Smoke billows from the chimney of a brick factory	100,0	0,00	1,63	82,14	17,86	16,25	98,74	1,26	2,52
V-MOTE/DV_004	97,69	2,31	2,87	72,19	27,81	31,21	96,12	3,88	4,12
Bilkent/DumanTest5	90,65	8,25	7,14	53,11	46,89	30,28	88,41	11,59	10,0
Bilkent/SmokeManavgatRaw	96,88	1,53	14,2	52,14	47,86	40,42	94,32	5,68	15,2
Youtube/firenight	–	–	–	61,21	38,79	29,12	90,88	9,12	4,01
Среднее значение	97,04	2,42	5,58	65,82	34,18	27,42	94,41	5,59	6,66

Заключение. В работе показано, что изображения, полученные в реальных условиях съемки при недостаточном освещении, обладают ограниченным диапазоном малых значений яркостей, низкой контрастностью и наличием аддитивного шума. Для борьбы с влиянием недостаточной освещенности на качество изображения использован многомасштабный алгоритм «Ретинекс» с цветовой коррекцией, применены фильтры Гаусса, Лапласа и медианный фильтр. Качество обнаружения динамических текстур на видеоизображениях исследовано на примере дыма. Экспериментальные исследования подтверждают эффективность предложенного алгоритма компенсации недостаточной освещенности.

Библиографические ссылки

1. Фаворская М. Н., Пятаева, А. В. Детектирование дыма на открытых пространствах в сложных погодных условиях с применением пространственно-временных локальных бинарных шаблонов // Информационно-управляющие системы. 2016. № 1 (80). С. 16–25.
2. Madhav V. Chitturi, Juan C. Medina, Rahim (Ray) F. Benekohal. Effect of Shadows and Time of Day on Performance of Video Detection Systems at Signalized Intersections // Transportation Research. Part C: Emerging Technologies. 2010. Vol. 18, iss. 2. P. 176–186.
3. Гончаров А. В., Каракищенко А. Н. Влияние освещенности на качество распознавания фронтальных лиц // Известия ЮФУ. Технические науки. 2008. № 4. С. 88–92.
4. Adnin Y., Moses Y., Ullman S. Face recognition: The problem of compensating for changes in illumination direction // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1997. Vol. 19, No. 7. P. 712–732.
5. Ramamoorthi R. Analytic PCA Construction for Theoretical Analysis of Lighting Variability in Images of a Lambertian Object // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligenc. 2002. Vol. 24, No. 10. P. 10–21.
6. Riklin-Raviv T., Shashua A. The Quotient image: Class based recognition and synthesis under varying illumination // Proceedings of the 1999 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 1999. P. 566–571.
7. Georghiades A. S., Belhumeur P. N. Illumination cone models for Faces recognition under variable lighting and Pose // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intelligence. 1998. No. 23(6). P. 643–660.
8. Shashua A., Riklin-Raviv T. The quotient image: Class-based re-rendering and recognition with varying illuminations // Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2001. Vol. 23, No. 2. P. 129–139.
9. Faraji M. R., Qi X. Face recognition under varying illuminations using logarithmic fractal dimension-based complete eight local directional patterns // Neurocomputing. 2016. Vol. 99. P. 16–30.
10. Analysis and Modeling of Faces and Gestures / S. K. Zhou [et al.] // Proc. of the Third International Workshop, AMFG. 2007. Vol. 2688. P. 10–18.
11. Goncalves W. N., Machado B. B., Bruno O. M. A complex network approach for dynamic texture recognition // Neurocomputing. 2015. Vol. 153. P. 211–220.
12. A survey on visual 316 content-based video indexing and retrieval / W. Hu [et al.] // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 2011. P. C 41 (6). Pp. 797–819.

13. Dynamic Texture Classification Using Dynamic Fractal Analysis / Y. Xu [et al.] // 2011 International Conference on Computer Vision. Barcelona, Spain, 2011. P. 1219–1226.

14. Lin H., Shi Z. Multi-scale retinex improvement for nighttime image enhancement // Optik – International Journal for Light and Electron Optics. 2014. Vol. 125, iss. 24. P. 7143–7148.

15. Хрящев Д. А. Об одном методе анализа цифрового изображения с применением гистограмм // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. «Управление, вычислительная техника и информатика». 2010. № 1. С. 109–113.

16. Система обнаружения областей задымления на видеопоследовательности с применением локальных бинарных шаблонов (DKL 3.15) : свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ / А. В. Пятаева, М. Н. Фаворская. № 2015615904. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 27.05.2015.

17. Video smoke detection [Электронный ресурс]. URL: http://staff.ustc.edu.cn/~yfn/vsd.html (дата обращения: 01.04.2017).

18. Database of Wildfilmsindia [Электронный ресурс]. URL: www wildfilmsindia com (дата обращения: 01.04.2017).

19. V-MOTE Database [Электронный ресурс]. URL: http://www2.imse-cnm.csic.es/vmote/english_version/index.php (дата обращения: 01.04.2017).

20. Database of Bilkent University [Электронный ресурс]. URL: http://signal.ee.bilkent.edu.tr/VisiFire/Demo/ (дата обращения: 01.04.2017).

21. Видеопоследовательность, снятая самостоятельно [Электронный ресурс]. URL: https://www.youtube.com/watch?v=tmBG_ v23zbk&t=12s (дата обращения: 01.04.2017).

References

1. Favorskaya M. N. Pyataeva A. V. [Verification of smoke detection in video sequences based on spatio-temporal local binary patterns in outdoor spaces with different weather conditions]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy.* 2016, Vol. 1(80), P. 16–25 (In Russ.).

2. Madhav V. Chitturi, Juan C. Medina, Rahim (Ray) F. Benekohal. Effect of Shadows and Time of Day on Performance of Video Detection Systems at Signalized Intersections. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies.* 2010, Vol. 18, Iss. 2, P. 176–186.

3. Goncharov A. V., Karakishchenko A. N. [Influence of Illumination on a Quality of Frontal Face Recognition]. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki.* 2008, No. 4, P. 88–924 (In Russ.).

4. Adnin Y., Moses Y., Ullman S. Face recognition: The problem of compensating for changes in illumination direction. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1997, Vol. 19, No. 7, P. 712–732.

5. Ramamoorthi R. Analytic PCA Construction for Theoretical Analysis of Lighting Variability in Images of a Lambertian Object. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2002, Vol. 24, No. 10, P. 10–21.

6. Riklin-Raviv T., Shashua A. The Quotient image: Class based recognition and synthesis under varying illumination. *In Proceedings of the 1999 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 1999, P. 566–571.

7. Georghiades A. S., Belhumeur P. N. Illumination cone models for Faces recognition under variable lighting and Pose. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intelligence*. 1998, No. 23(6), P. 643–660.

8. Shashua A., Riklin-Raviv T. The quotient image: Class-based re-rendering and recognition with varying illuminations. *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.* 2001, Vol. 23, No. 2, P. 129–139.

9. Faraji M. R., Qi X. Face recognition under varying illuminations using logarithmic fractal dimension-based complete eight local directional patterns. *Neurocomputing.* 2016, Vol. 99, P. 16–30.

10. Zhou S. K., Zhao W., Tang X., Gong S. Analysis and Modeling of Faces and Gestures. *Proc. of the Third International Workshop, AMFG Rio de Janeiro.* 2007, Vol. 2688, P. 10–18.

11. Goncalves W. N., Machado B. B., Bruno O. M. A complex network approach for dynamic texture recognition. *Neurocomputing.* 2015, Vol. 153, P. 211–220.

12. Hu, W., Xie N., Li L., Zeng X., Maybank S. J. A survey on visual 316 content-based video indexing and retrieval. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 2011, Part C 41 (6), P. 797–819.

13. Xu Y., Quan Y., Ling H., Ji H. Dynamic Texture Classification Using Dynamic Fractal Analysis. *2011 International Conference on Computer Vision.* 2011, P. 1219–1226.

14. Lin H., Shi Z. Multi-scale retinex improvement for nighttime image enhancement. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics.* 2014, Vol. 125, Iss. 24, P. 7143–7148.

15. Khryashchev D. A. [On a method of the analysis of digital image using histograms]. *Vestnik Astrahanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta, seriya Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika.* 2010, No. 1, P. 109–113 (In Russ.).

16. Pyataeva A. V., Favorskaya M. N. *Sistema obnaruzhenija oblastej zadymlenija na videoposledovatel'nosti s primeneniem lokal'nyh binarnyh shablonov* [Video-based smoke detection system based on spatio-temporal local binary patterns (DKL 3.15)]. Patent RF, No. 2015615904, 2015.

17. Video smoke detection. Available at: http://staff.ustc.edu.cn/~yfn/vsd.html (accessed: 01.04.2017).

18. Database of Wildfilmsindia. Available at: www wildfilmsindia com (accessed: 01.04.2017).

19. V-MOTE Database. Available at: http://www.2.imse-cnm.csic.es/vmote/english_version/index.php (accessed: 01.04.2017).

20. Database of Bilkent University. Available at: http://signal.ee.bilkent.edu.tr/VisiFire/Demo/ (accessed 08.03.2016).

21. Youtube/firenight. Available at: https://www.youtube.com/watch?v=tmBG_ v23zbk&t=12s (accessed: 01.04.2017).

© Пятаева А. В., Куликова Ю. Д., 2017

UDC 512.54

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 290–293

PROPERTIES OF LOCALLY CYCLIC GROUPS

V. I. Senashov

Institute of Computational Modelling of Siberian Branch of RAS
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
Siberian Federal University
79, Svobodniy Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
E-mail: sen1112home@mail.ru

Locally cyclic group is a group every finite set of elements of which generates a cyclic subgroup. We give examples of periodic locally cyclic groups and locally cyclic torsion-free groups. Properties of locally cyclic groups are studied. A locally cyclic group cannot be mixed, that is, it cannot contain elements of finite and infinite order simultaneously. A locally cyclic group is Abelian. By their properties periodic locally cyclic groups and locally cyclic torsion-free groups are distinguished. The Sylow subgroups of a periodic locally cyclic group are cyclic or quasi-cyclic. A periodic locally cyclic group decomposes into a direct product of Sylow subgroups. By N. F. Sesekin and A. I. Starostin the following theorem is proved: a locally finite group, all Sylow p-subgroups of which are quasi-cyclic, is a complete periodic locally cyclic group. Here, in addition to this theorem, we consider the structure of a complete periodic locally cyclic group. A complete periodic locally cyclic group decomposes into a direct product of quasi-cyclic subgroups with distinct prime numbers. A complete periodic locally cyclic group is uniquely reconstructed by its lower layer. In this article an example is given of the fact that an arbitrary periodic locally cyclic group is not unique reconstructed by its lower layer. A torsion-free locally cyclic group is isomorphic to a subgroup of the additive group of rational numbers. A periodic locally cyclic group is layer-finite, that is a number of it's elements of each order is finite. A locally cyclic group can be either a layer-finite or a subgroup of additive groups of rational numbers. The results can be applied when encoding information in space communications.

Keywords: periodic group, locally cyclic group, quasi-cyclic group, complete group, layer finiteness.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 290–293

СВОЙСТВА ЛОКАЛЬНО-ЦИКЛИЧЕСКИХ ГРУПП

В. И. Сенашов

Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44
Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: sen1112home@mail.ru

Локально-циклическая группа – это группа, всякое конечное множество элементов которой порождает циклическую подгруппу. Приводятся примеры периодических локально-циклических групп и локально-циклических групп без кручения. Изучаются свойства локально-циклических групп. Локально-циклическая группа не может быть смешанной, т. е. она не может содержать одновременно элементы конечного и бесконечного порядка. Локальная-циклическая группа является абелевой. По своим свойствам различаются периодические локально-циклические группы и локально-циклические группы без кручения. Силовские подгруппы периодической локально-циклической группы являются циклическими или квазициклическими. Периодическая локально-циклическая группа разлагается в прямое произведение силовских подгрупп. Н. Ф. Сесекиным и А. И. Старостиным доказана теорема: локально-конечная группа, все силовские p-подгруппы которой квазицикличны, является полной периодической локально-циклической группой. Здесь в дополнение к этой теореме мы рассмотрим структуру полной периодической локально-циклической группы. Полная периодическая локально-циклическая группа разлагается в прямое произведение квазициклических p-подгрупп по различным простым числам p. Полная периодическая локально-циклическая группа единственным образом восстанавливается по своему нижнему слою. Приводится пример того, что произвольная периодическая локально-циклическая группа не единственным образом восстанавливается по своему нижнему слою. Локальная циклическая группа без кручения изоморфна некоторой подгруппе аддитивной группы рациональных чисел. Периодическая локально-циклическая группа слойно конечна, т. е. в ней конечно число элементов каждого порядка. Локально-

циклическая группа может быть либо слойно конечной, либо подгруппой аддитивной группы рациональных чисел. Результаты могут найти применение при кодировании информации, использующейся в сеансах космической связи.

Ключевые слова: периодическая группа, локально-циклическая группа, квазициклическая группа, полная группа, слойная конечность.

Introduction. The aim of this paper is to establish the basic properties of the locally cyclic group classes.

Definition. A group is said to be locally cyclic if every finite set of its elements generates a cyclic subgroup. Example of locally cyclic groups is an additive group of rational numbers, a quasi-cyclic group.

A quasi-cyclic group is a G group which is constructed as follows: supposing a cyclic group $\langle a_1 \rangle$ of prime order p is embedded in a cyclic group $\langle a_2 \rangle$ of order p^2, the last group, in its turn, is embedded in a cyclic group $\langle a_3 \rangle$ of order p^3 etc. The group is formed by combining an infinite chain of nested groups $\langle a_1 \rangle \subset \langle a_2 \rangle \subset \ldots \subset \langle a_n \rangle \subset \ldots$ In other words, the quasi-cyclic group can be defined as root groups of a unit of prime order p, order p^2, order p^3, etc.

The class of periodic locally cyclic groups is contained in the class of layer-finite groups whose properties are described in [1]. Layer-finite groups were investigated by S. N. Chernikov [2–4], R. Baer [5], Kh. Kh. Mukhamedzhan [6], Ya. D. Polovitsky [7]. Near layer-finite groups are described in the works of the author [8–11]. As S. N. Chernikov pointed out in the mathematical encyclopedia, layer-finite groups proved to be the most studied ones among the groups with finite classes of conjugate elements. This implies the finiteness of the conjugate elements classes in periodic locally cyclic groups. The arrangement of layer-finite groups with related classes is shown in the research paper [12].

Basic results. In this section we are going to consider the properties of locally cyclic groups.

A locally cyclic group cannot be mixed, that is, it cannot contain elements of finite and infinite order simultaneously:

Property 1. *Locally cyclic group can be either periodical or a torsion-free group.*

Evidence. It is obviously seen from the definition that a locally cyclic group cannot be mixed, that is, contain elements of both finite and infinite orders. Indeed, the subgroup, generated by an element of finite order and an element of infinite order, according to the definition of a locally cyclic group, must be cyclic. Thus there is a contradiction with the theorem on the structure of subgroups of an infinite cyclic group. It should be noted that each non-identity subgroup of an infinite cyclic group is infinite cyclic one. The property is proved.

Property 2. *Locally cyclic group is Abelian.*

Evidence. The validity of the statement immediately goes from the definition of a locally cyclic group.

Periodic locally cyclic groups and locally cyclic torsion-free groups differ substantially according to their properties.

At first, it is necessary to distinguish the properties of periodic locally cyclic groups.

Property 3. *Sylow p-subgroups of periodic locally cyclic group G are cyclic or quasi-cyclic.*

Evidence. Supposing that $\Im$ is a set of all p-elements of a locally cyclic group G for some prime number p. If $\Im$ is a finite set, then according to the definition of a locally cyclic group its elements generate a cyclic group. In the case if $\Im$ is an infinite set, we will prove that they form a quasi-cyclic group. Indeed, let us consider that $\Im$ is an infinite set. Let us deal with a subset $\{a_1, a_2, \ldots, a_n, \ldots\}$ of the set $\Im$. Group $\langle a_1, a_2 \rangle$, generated by the elements a_1 and a_2 is a cyclic p-subgroup, therefore, either $\langle a_1 \rangle \supseteq \langle a_2 \rangle$ or $\langle a_1 \rangle \subseteq \langle a_2 \rangle$. The bigger one of these groups is defined as $\langle a_{i_1} \rangle$. The same idea can be referred to the cyclic subgroups $\langle a_{i_1} \rangle$, $\langle a_3 \rangle$. The bigger one of these groups is defined as $\langle a_{i_2} \rangle$.

If we continue the argumentation in the same way, we will get an increasing chain of cyclic p-subgroups:

$$\langle a_{i_1} \rangle \subseteq \langle a_{i_2} \rangle \subseteq \langle a_{i_3} \rangle \subseteq \ldots$$

Obviously, the union A of these subgroups is a quasi-cyclic p-group. If not all elements of the set $\Im$ are in A, then the group, generated by an element $b \in \Im \setminus A$ and an element a of the same order of A is not cyclic. A contradiction with the definition of a locally cyclic group means that all elements of the set $\Im$ are contained in A. The property is proved.

Property 4. A periodic locally cyclic group decompounds into a direct product of Sylow subgroups.

Obviously, ***the evidence*** of this property follows from the fact that the periodic locally cyclic group is Abelian according to the property 2. The example of periodic locally cyclic group, which is different from quasi-cyclic group, is a direct product $\langle a_1 \rangle \times \langle a_2 \rangle \times \ldots$ of cyclic groups $\langle a_1 \rangle$, $\langle a_2 \rangle$, … of different direct orders p_1, p_2, … respectively.

Property 5. *A periodic locally cyclic group decompounds into a direct product of cyclic or quasi-cyclic p-subgroups with distinct prime numbers.*

Evidence of this property goes from the properties 3 and 4.

Locally finite groups are studied in the work of N. F. Sesekin and A. I. Starostin [13], all their Sylow-subgroups are quasi-cyclic.

Property 6. *Locally finite group, whose Sylow p-subgroups are quasi-cyclic, is a complete periodic locally cyclic group.*

In addition to this theorem, we are going to consider the structure of a complete periodic locally cyclic group:

Property 7. *A complete periodic locally cyclic group decompounds into a direct product of quasi-cyclic p-subgroups with distinct prime numbers.*

Evidence. A complete Abelian group decompounds into a direct product of quasi-cyclic *p*-subgroups and an additive group of rational numbers according to the theorem 9.1.6 from [14]. Since the additive group of rational numbers is not a periodic group we obtain a property statement (validity) using property 5. The property is proved.

Property 8. *A complete periodic locally cyclic group is uniquely recovered from its lower layer.*

The evidence *of this property goes from the property 7.*

At the same time, not every periodic locally cyclic group is uniquely recovered from its lower layer. For example, in two different periodic locally cyclic groups $C_{p^2} \times C_{q^\infty}$ *and* $C_{p^\infty} \times C_{q^2}$ *the lower layers are the same.*

Let us give one more characteristic of periodic locally cyclic groups developed by N. F. Sesekin and A. I. Starostin:

Property 9. *Only periodic locally cyclic groups are Abelian locally finite groups, all their Sylow p-subgroups are locally cyclic [13].*

Here it is necessary to give a description of a group that can be decompounded into a semidirect product of periodic locally cyclic groups:

Property 10. *If the group* G *is decompounded into a semidirect product of two periodic locally cyclic groups* $G = A\lambda B$*, whose orders of elements are relatively prime, then the* G *– locally finite group, whose Sylow p-subgroups are locally cyclic, and* A *contain the commutant of the group* G *[13].*

Let us now describe locally torsion-free cyclic groups.

Locally cyclic groups are groups of the first rank. Taking this into account that the following property is proved in the theorem 7.2.1 from [14]:

Property 11. *A local torsion-free cyclic group is isomorphic a subgroup of the additive group of rational numbers.*

Property 12. *A complete locally cyclic torsion-free group is isomorphic in relation to the additive group of rational numbers.*

Evidence. A complete locally cyclic torsion-free group in compliance with the property 2 and the theorem 9.1.6 from [14] decompounds into a direct product of quasi-cyclic *p*-subgroups and an additive group of rational numbers. Since quasi-cyclic subgroups of the direct product are not torsion-free groups, we can see the validity of the property. The property is proved.

Property 13. *A periodic locally cyclic group is layer-finite.*

Evidence. Let us consider that G is a periodic locally cyclic group. If $a_1, a_2, ..., a_n$ are elements of the order m of the group G, then the subgroup H, generated by these elements, is cyclic according to the definition of a locally cyclic group. Obviously, there is not more than $m-1$ elements of the order m in a cyclic group. Thus, we can say that $n \le m-1$ and this also means that the *m*-layer of the group *G* is finite and is *G* is a layer-finite group. The property is proved.

Property 14. *A locally cyclic group can be either leaf-finite or a subgroup of additive groups of rational numbers.*

The evidence of this property follows from the properties 1, 11, 13.

Definitions. Let us define the terms that were used in the work. A group *G* has a *finite rank r*. If *r* is the smallest number with the property defining that every finite generated subgroup of a group *G* is a part of a subgroup which contains r' components ($r' \le r$).

The lower layer of a group is the set of all its elements of prime order. A group is said to be layer-finite if the set of its elements of any given order is finite. The definitions of other terms used are standard and can be found in monographs [14; 15].

The conclusion. The main properties of locally cyclic groups are researched in this work. Periodic locally cyclic groups and locally cyclic torsion-free groups are described separately. Various examples of such groups are given.

Acknowledgments. This work was supported by the grant of the Siberian Federal University (Project – Algebra-logical structures and complex analysis).

References

1. Senashov V. I. *Sloyno konechnyye gruppy* [Layer-finite groups]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1993, 159 p.

2. Chernikov S. N. [On special *p*-groups]. *Mat. sb.* 1950, Vol. 27 (69), P. 185–200 (In Russ.).

3. Chernikov S. N. [Groups with finite classes of conjugate elements]. *DAN SSSR*. 1957, Vol. 114, P. 1177–1179 (In Russ.).

4. Chernikov S. N. [On layer finite groups]. *Mat. sb*. 1958, Vol. 45 (87), P. 415–416 (In Russ.).

5. Baer R. [Finiteness properties of groups]. *Duke Math. J.* 1948, Vol. 15, P. 1021–1032.

6. Mukhammedzhan Kh. Kh. [On groups with ascending central series]. *Mat. sb*. 1951, Vol. 28 (70), P. 201–218 (In Russ.).

7. Polovitskii Ya. D. [Layer-extreme group]. *Dokl. AN SSSR*. 1960, No. 3 (134), P. 533–535 (In Russ.).

8. Senashov V. I. [Structure of Almost Layer-Finite Groups]. *AMSE Transactions, Advances in Modeling and Analysis*. 2011, Vol. 48, No. 1, P. 28–38.

9. Senashov V. I. [Properties of a class of almost layer-finite groups and their characterization]. *Inf. tekhnologii i mat. modelirovaniye: izbr. stat'i VIII Nauchnoy internet-konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [Inf. Technology and math. Modeling: fav. Article VIII of the Internet scientific conference with international participation]. Krasnoyarsk. 2016, P. 116–140 (In Russ.).

10. Senashov V. I. [Characterizations of almost layer-finite groups]. *Reshetnevskiye chteniya* [Reshetnev's readings]. Part 2. 2016, P. 107 (In Russ.).

11. Senashov V. I. [Characterizations of Layer-Finite Groups and Their Extensions]. *Vestnik SFU*. 2009, Vol. 58, No. 3, P. 279–287 (In Russ.).

12. Senashov V. I. [Mutual relations of almost layered finite groups with close classes]. *Vestnik SibGAU*. 2014. Vol. 15, No. 1, P. 76–79 (In Russ.).

13. Sesekin N. F., Starostin A. I. [On a class of periodic groups]. *Uspekhi Matematicheskikh Nauk*. 1954, Vol. 9, No. 4 (62), P. 225–228 (In Russ.).

14. Kargapolov M. I., Merzlyakov Yu. I. *Osnovy teorii grupp* [Fundamentals of group theory]. Moscow, Nauka Publ., 1982, 288 p.

15. Kurosh A. G. *Teoriya grupp* [Theory of Groups]. Moscow, Nauka Publ., 1967, 648 p.

Библиографические ссылки

1. Сенашов В. И. Слойно конечные группы. Новосибирск : Наука, 1993. 158 с.

2. Черников С. Н. О специальных *p*-группах // Мат. сб. 1950. Т. 27(69). С. 185–200.

3. Черников С. Н. О группах с конечными классами сопряженных элементов // Докл. АН СССР. 1957. Т. 114. С. 1177–1179.

4. Черников С. Н. О слойно конечных группах // Мат. сб. 1958. Т. 45(87). С. 415–416.

5. Baer R. Finiteness properties of groups // Duke Math. J. 1948. Vol. 15. P. 1021–1032.

6. Мухаммеджан Х. Х. О группах с возрастающим центральным рядом // Мат. сб. 1951. Т. 28 (70). С. 201–218.

7. Половицкий Я. Д. Слойно экстремальные группы // Докл. АН СССР. 1960. № 3 (134). С. 533–535.

8. Senashov V. I. Structure of Almost Layer-Finite Groups // AMSE Transactions, Advances in Modelling and analysis. 2011. Vol. 48, № 1. P. 28–38.

9. Сенашов В. И. Свойства класса почти слойно конечных групп и их характеризации // Инф. технологии и мат. моделирование : избр. ст. VIII науч. интернет-конф. с междунар. участием / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т ; Ун-т Гвадалахары. Красноярск. 2016. С. 116–140.

10. Сенашов В. И. Характеризации почти слойно конечных групп // Решетневские чтения / СибГАУ. 2016. Ч. 2. С. 107.

11. Senashov V. I. Characterizations of Layer-Finite Groups and Their Extensions // Вестник СФУ. 2009. № 3 (58). С. 279–287.

12. Сенашов В. И. Взаимоотношения почти слойно конечных групп с близкими классами // Вестник СибГАУ. 2014. № 1 (15). С. 76–79.

13. Сесекин Н. Ф., Старостин А. И. Об одном классе периодических групп // Успехи математических наук. 1954. Вып. 4 (9). С. 225–228.

14. Каргаполов М. И., Мерзляков Ю. И. Основы теории групп. 3-е изд. М. : Наука, 1982. 288 с.

15. Курош А. Г. Теория групп. 3-е изд. М. : Наука, 1967. 648 с.

© Senashov V. I., 2017

UDC 621.396.67

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 294–299

EMPIRICAL RELATIONSHIP FOR QUEUE LENGTH ESTIMATION IN A SYSTEM WITH FRACTAL SHOT INPUT

N. G. Trenogin[1], M. N. Petrov[2*], D. E. Sokolov[1]

[1]Macroregional branch "Sibir" of PJSC Rostelecom
53, M. Gorky St., Novosibirsk, 630099, Russian Federation
[2]Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[*]E-mail: ettk@bk.ru

Traffic in modern data networks and information systems are most adequately described by different classes of fractal models. This kind of models takes into account the following key characteristics of traffic as high variability events grouping and explicit correlation structure on different time scales. Fractal shot process FSNDP, referring to the fractal point process is sufficiently accurate approximation of the network load at individual workstations or small workgroups, is defined with five numerical parameters, with known estimating algorithms on available samples (based on actual traffic dumps). Studies based on queueing system simulation with input FSNDP stream managed to establish a stable relationship between the change in each of the input parameters and the average queue length in the system. Confirmed direct correlation queue length of the parameter characterizing the amplitude of the individual load bursts, found an inverse relationship of the index related to the Hurst parameter and master degree of fractal properties. Based on the identified dependencies, obtained empirical relations between parameters of FSNDP process and the average queue length in single-channel queueing system with unlimited queue and deterministic service discipline FSNDP/D/1. These relationships allow to estimate the average volume of buffer used and the average delay introduced by the network equipment in the load conditions expressed fractal properties from measurements of real traffic. The presence of the formulae increases the importance of traffic models based on FSNPD, since it makes possible to perform a full cycle analysis of queueing systems and queueing networks without involving the simulation methods.

Keywords: fractal traffic, fractal shot-noise driven Poisson, FSNDP, queueing system, simulation.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 294–299

ЭМПИРИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДЛИНЫ ОЧЕРЕДИ В СИСТЕМЕ С ФРАКТАЛЬНЫМ ДРОБОВЫМ ВХОДНЫМ ПОТОКОМ

Н. Г. Треногин[1], М. Н. Петров[2*], Д. Е. Соколов[1]

[1]Макрорегиональный филиал «Сибирь» ПАО «Ростелеком»
Российская Федерация, 630099, г. Новосибирск, ул. М. Горького, 53
[2]Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[*]E-mail: ettk@bk.ru

Трафик в современных сетях передачи данных и информационных системах наиболее адекватно описывается различными классами фрактальных моделей. Этот класс моделей учитывает такие ключевые свойства трафика, как высокая вариативность, группировка событий и выраженная корреляционная структура на различных временных масштабах. Фрактальный дробовой процесс FSNDP, относящийся к фрактальным точечным процессам, является достаточно точной аппроксимацией сетевой нагрузки на уровне отдельных рабочих станций или малых рабочих групп, описывается пятью числовыми параметрами, для которых известны алгоритмы оценки по имеющимся выборкам (на основе реальных дампов трафика). В ходе исследований на основе имитационного моделирования системы массового обслуживания, на вход которой поступает поток FSNDP, удалось установить устойчивые зависимости между изменением каждого из параметров входного потока и средней длиной очереди в системе. Подтверждена прямая зависимость длины очереди от параметра, характеризующего амплитуду отдельных всплесков нагрузки, обнаружена обратная зависимость от показателя, связанного с параметром Херста и задающего степень выраженности фрактальных свойств. На основании выявленных зависимостей получены эмпирические соотношения, связывающие параметры потока FSNDP и среднюю длину очереди в одноканальной системе массового обслуживания с неограниченной очередью и детерминированной дисциплиной обслуживания FSNDP/D/1. Полученные соотношения позволяют оценить средний используемый объем буфера и среднюю вносимую задержку на сетевом оборудовании в условиях нагрузки

с выраженными фрактальными свойствами по данным измерений реального трафика. Наличие соотношений повышает ценность моделей трафика на основе FSNPD, так как дает возможность проведения полного цикла анализа систем и сетей массового обслуживания без привлечения аппарата имитационного моделирования.

Ключевые слова: фрактальный трафик, фрактальный дробовой процесс, FSNDP, СМО, имитационное моделирование.

Introduction. In recent years the traffic of data communication networks, also as a part of distributed information systems, characterized by high variability and explicit correlation properties, is described by various fractal models [1–4].

Unlike geometrical fractals, determination of which is based on geometrical similarity of a part of an object to the whole, with fractal random processes – the part of a path is similar to the whole statistically: when averaging by time at various scales, the process substantially keeps values of the first and second order statistics, i. e. doesn't smooth out, doesn't lose variability and correlation structure.

Fractal or self-similar properties of the network traffic, revealed originally on the Ethernet networks and broadband access (BBA) in the 1990s [5; 6] explains feeble suitability of classical Markov methods and models of the queueing theory for simulation of the modern high-loaded systems and data communication networks. First of all it is about the explicit correlation structure – the phenomenon of an after-effect which by definition neglects Markov models. However, despite adequacy of traffic streams description using fractal models, receiving of expressions suitable for practical calculations for the queueing system models is connected with considerable difficulties. Several options of formulas for queueing system models with the elementary fractal sequence on the basis of fractional Brownian motion [7; 8] are known, though this flow can be considered adequate for the description of backbone segments traffic, not for distributed information systems at the level of individual workstations and small workgroups. Also there are solutions based not on specific sequence models, but on their universal statistical characteristics [9].

On the basis of simulation modeling the authors managed to receive the ratios suitable for calculation of queue volume in queueing systems with an input flow using the fractal shot process and therefore, for capacity of the appropriate fragments of packet-switching networks estimation.

Fractal shot process (FSNDP) model. According to the result of the research of the Ethernet-traffic real traces, as the authors have shown [10–12] earlier, the adequate model of packet flow in distributed system of data processing with the remote workstations, one of fractal point processes, namely the fractal shot process which is also called FSNDP (Fractal Shot Noise Driven Poisson), belonging to the category of double stochastic Poisson point processes, can be used. For the first time the model of the network traffic based on this process was suggested by S. Lowen and B. Ryu [13, 14]. For the process there are approaches to statistical parameterization on the received dumps of the real traffic, it also can be generated using the correct and moderately labor-consuming calculations within the set parameters.

Time varying rate of FSNDP process is set by the continuous accidental process – fractal shot noise which is received by filtering classical Poisson process.

FSNDP process is completely defined by five numerical parameters (μ, β, K, A, B), having the following value.

Primary Poisson stream $\{ti\}$ with constant rate μ becomes the input to a linear filter with impulse response function

$$h(t) = \begin{cases} Kt^{-\beta}, t \in (A, B), \\ 0, t \notin (A, B), \end{cases} \quad (1)$$

where β is defined by the level of the process self-similarity; A, B – non-negative cut-off parameters; K – the positive constant, determining the amplitude of total process. The filter produces the fractal shot noise

$$I(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} h(t - t_i), , \quad (2)$$

considered as time varying rate for the second Poisson point process, which output is the FSNDP.

FSNDP process acquires steadily self-similar properties under a condition that $A << B$ and A, close enough to zero. With practical modeling it is usually accepted that $A = 0$ or $A = 10^{-7}$.

Parameter β is connected with Hurst parameter H, i. e. defines degree of expressiveness of fractal properties of the resultant process:

$$H = 3/2 - \beta. \quad (3)$$

Hurst parameter of H is the most general characteristic of any fractal process and can accept values from an interval [0.5; 1). Value 0.5 means total absence of fractal properties, growth of H towards 1 – strengthening of expressiveness of self-similar character.

General comments on the approach to simulation modeling. Earlier, on the basis of the analysis of really operating distributed information systems network traffic dumps the fractal shot process of FSNDP was considered to be an adequate model of such traffic. Also numerous estimates of parameters of the FSNDP model on real dumps have been carried out; for generating the artificial sequences in this research the values which are close to the values characterizing some typical dumps of the real traffic [12$ 15], but rounded for simplicity were used. Values μ = 0.1, K = 10, A = 0, B = 100, β = 0.9 have been accepted as a basic set of parameters.

Earlier it has also been confirmed that the stream with constant (deterministic – D) service rate corresponds the most to the real network load for client-server data processing system, i. e. the FSNDP/D/1 system is the most suitable for modeling. In terms and units of information transfer the volume of a packet is accepted as 100 bytes that is also close to real estimates.

The general approach to the research of influence of model parameters on the behavior of the queue is based on generating of pseudorandom sequences of FSNDP stream events with the variation of one or several parameters of rather basic set and use of these sequences as an input stream of simulation model of a single-channel server queueing system with simulated continuous time.

All generated sequences have the symbolic duration of 7200 sec. (2 hours) and volume, depending on the varied parameters, from 25 thousand prior to 450 thousand events.

Influence of process parameters on the average length of the queue. Parameter *K* characterizes amplitude of the resultant process's rate bursts; therefore it is obvious that correlation between *K* and average queueing load ρ will be direct (fig. 1).

Simulation modeling allows to assume direct proportionality of the average queue length estimation from *K*.

Direct influence on the height of the curve queueing system load for β exponent; respectively, the reverse influence of Hurst parameter *H* connected with this indicator is determined. This result, which is steadily shown during the runs of simulation model for various values of the FSNDP parameters, in general differs from the popular conception that for the general case of the fractal traffic a higher degree of self-similarity results in larger queue fill (buffer). The cause of alternative effect for a special FSNDP case needs a future research (fig. 2).

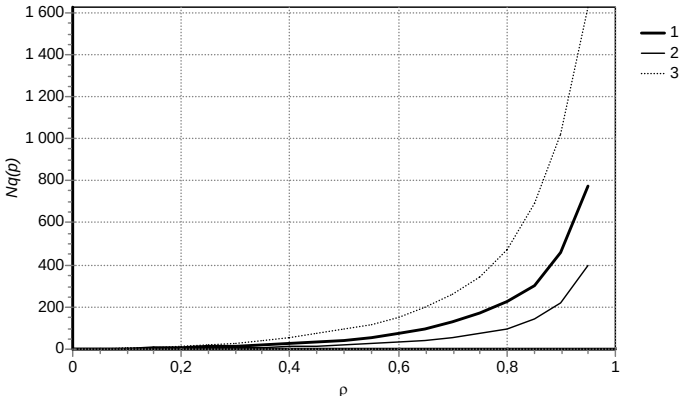
Influence of primary (auxiliary) Poisson sequence μ on characteristics of the queue length has appeared to be significantly lower than of the two above described parameters, and is demonstrated mainly in the field of high load – at ρ > 0.8. According to the earlier research, such loading at a fractal input in practice means the mode close to non-stationary, and doesn't allow traffic and buffer parameters more or less precise estimation. Curve buffer fill for values μ, differing by factor 16 are given in fig. 3.

The only parameter of FSNDP process which influence on the queue under realistic values of the other parameters has not been revealed is *B*. Abcense of the explicit influence corresponds to physical sense of this value: duration of the decreasing intensity intervals, after which the cut-off is done, obviously shouldn't have dramatic impact on queueing system behavior, comparable with the influence of other parameters.

Empirical ratios for the queue length estimation. By comparison of calculated values with the values received as a result of simulation modeling of queueing system behavior with a fractal shot input of FSNDP it is confirmed that under real values of the FSNDP parameters the estimation of the average queue length can be expressed by the ratio

$$q(\rho) = C\frac{K}{H}\frac{\rho}{1-\rho}, \qquad (4)$$

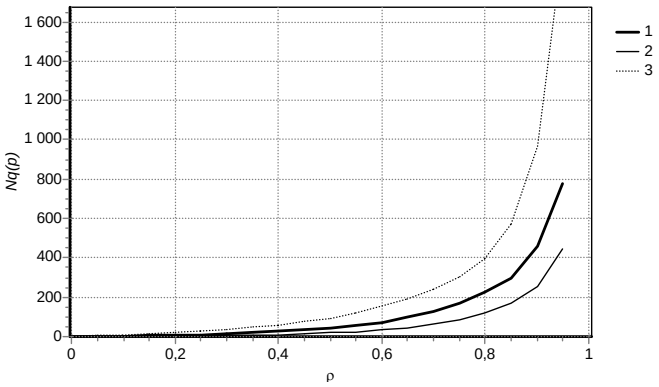
where *C* – positive constat, *H* – Hurst parameter connected with the process β parameter value by ratio (3).



	1	2	3
μ	**0,1**	0,1	0,1
B	**0,9**	0,9	0,9
K	**10**	**5 (1/2)**	**20 (X2)**
A	**0**	0	0
B	**100**	100	100

Fig. 1. The average length of the queue under parameter *K* variation

Рис. 1. Средняя длина очереди при варьировании параметра *K*



	1	2	3
μ	**0,1**	0,1	0,1
B	**0,9**	**0,8▼**	**0,95▲**
K	**10**	10	10
A	**0**	0	0
B	**100**	100	100
H	**0,6**	**0,7▲**	**0,55▼**

Fig. 2. The average length of the queue under parameter β variation

Рис. 2. Средняя длина очереди при варьировании показателя β

In the expression there are no parameters B and μ, significant effect of which on the queue under real conditions isn't revealed in the simulation modeling. However, since μ under ρ > 0.8 can after all impact the queue length, it must be kept in mind that the queue estimation accuracy using this ratio in the queueing modes close to non-stationary mode, will decrease.

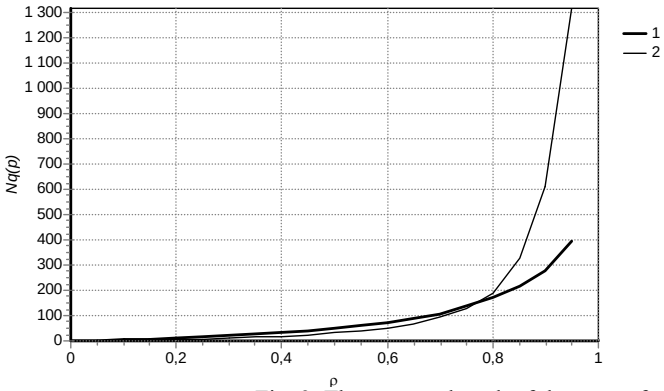
Value of the constant which equals

$$C = 1/2 \quad (5)$$

in the given simulation experiments has shown rather accurate coincidence of experimental and calculated curves for various parameters of the FSNDP modeled fractal shot process.

In fig. 4. examples of curves of the buffer fill $q(\rho)$ for parameter values μ = 0.1, K = 10, A = 0, B = 100 and β = 0.8, β = 0.9 are given, under the constant value according to the assumption (5).

It should be noticed that in the modes of minor load calculated values are slightly higher than those received by simulation modeling, i. e. the received estimation can be considered as the upper bound (fig. 4).



	1	2
μ	**0,025**	0,4
B	**0,9**	0,9
K	**10**	10
A	**0**	0
B	**100**	100

Fig. 3. The average length of the queue for significantly different parameter μ

Рис. 3. Средняя длина очереди при для существенно отличающихся значений μ

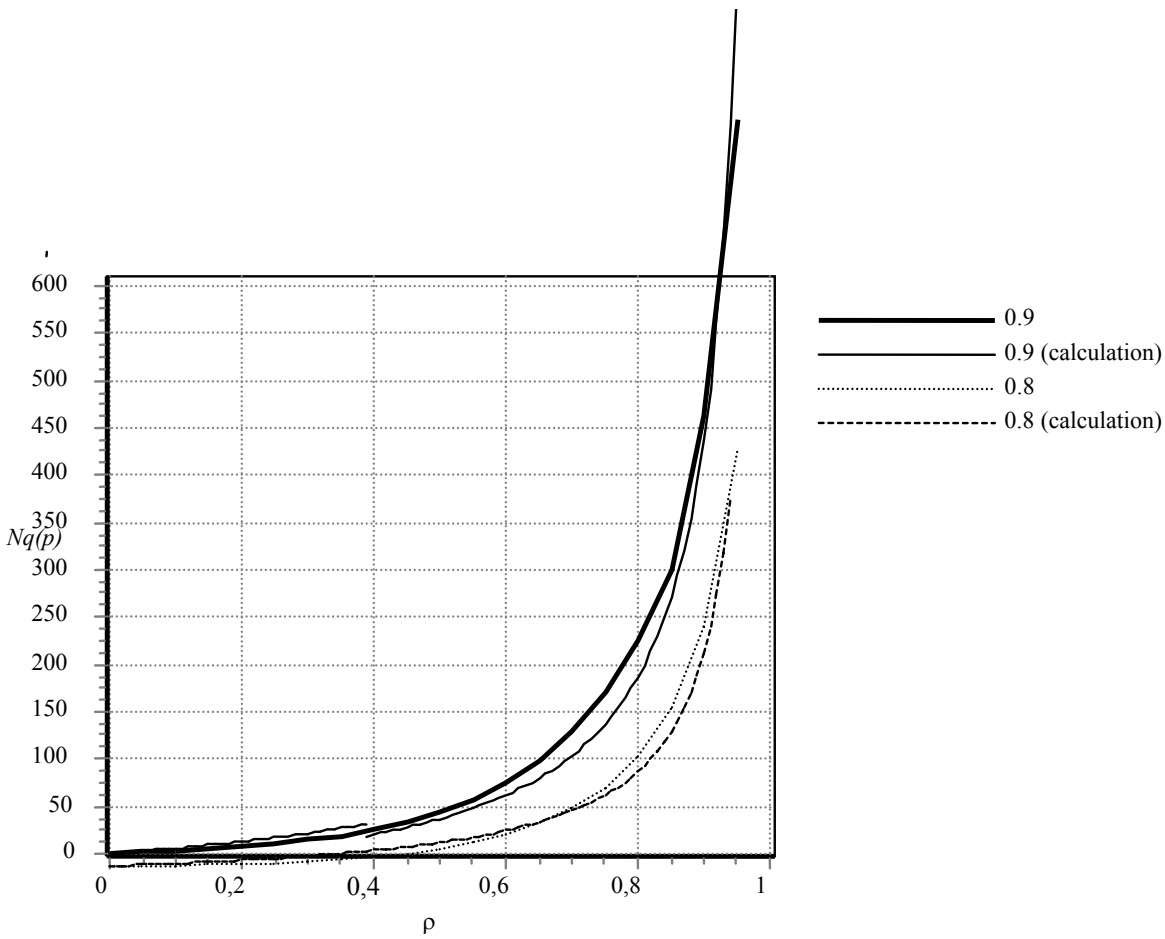


Fig. 4. Simulation and calculation curves of queue lengths under various β

Рис. 4. Имитационные и расчетные кривые длины очереди при различных β

Having combined (3), (4) and (5), it is possible to express the ratio for the average queue length estimation in single-server queueing system with fractal shot FSNDP process and determined maintenance time (FSNDP/D/1) input as:

$$q(\rho) = \frac{1}{2}\frac{K}{H}\frac{\rho}{1-\rho}, \qquad (6)$$

or

$$q(\rho) = \frac{K}{2(3/2-\beta)}\frac{\rho}{1-\rho} = \frac{K}{3-2\beta}\frac{\rho}{1-\rho}. \qquad (7)$$

Conclusion. The offered expressions for the queue length estimation are very low resource-consuming in computation. It allows to use them both in calculation and optimization algorithms to determine throughput of data communication network elements with fractal traffic flows as well as time delays caused by these elements.

Receiving explicit ratios increases the value of the FSNDP traffic model. For this process there are ways of computer parameterization, based on available process path fragments (network traffic dumps); algorithms of the artificial sequences generating with the known parameters. Now there is also an opportunity to calculate the queue and delays in an explicit form, i. e. to carry out a full cycle of model analysis without simulation, or with the minimum use of it.

Also, there are grounds for further research, such as receiving of estimates for the queue statistical characteristics of the second order; and also development of definition methods of queueing networks with fractal flows, in particular on the basis of tensor approaches [15], based on earlier established property of keeping a flow after servicing in the system with queue.

References

1. Shelukhin O., Tenyakshev A., Osin A. *Fraktal'nye protsessy telekommunikatsiyakh* [Fractal processes in telecommunications. Moscow, Radiotechnica Publ., 2004. 480 p.

2. Tsybakov B. S. [Teletraffic model based on Self-similar random process]. *Radiotechnica.* 1999, No. 5, P. 24–31 (In Russ.).

3. Neiman V. I. [New direction in teletraffic theory]. *Electrosvyaz.* 1998, No. 7, P. 27–30 (In Russ.).

4. Neiman V. I. [Self-similar processes and their application in teletraffic theory]. *Trudy Mezhdunarodnoy Akademii Svyazi*. 1999, No. 1, P. 11–15 (In Russ.).

5. Leland W. E., Taqqu M. S., Willinger W., and Wilson, D. V. On the selfsimilarnature of Ethernet traffic (extended version). *IEEE/ACM Trans. Networking*. 1994, Vol 2 (1), P. 1–15.

6. Norros I. The Management of Large Flows of Connectionless Traffic on the Basis of Self-Similar Modeling. *ICC '95, IEEE International Conference on Communications. Seattle.* 1995, P. 451–455.

7. Norros I. On the use of fractional Brownian motion in the theory of connectionless networks. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* 1995, 13 (6), P. 953–962.

8. Chen J., Bhatia H. S., Addie R. G, Zukerman M. Statistical characteristics of queue with fractional Brownian motion input. *Electronics Letters.* 2015, Vol. 51 (9), P. 699–701.

9. Petrov M. N., Ponomaryov D. Y. [Self-similarity in queueing systems with limited buffer]. *Electrosvyaz*. 2002, No. 2, P. 35–39 (In Russ.).

10. Sokolov D. E., Trenogin N. G. [The nature of the network traffic to the client site distributed client-server system]. *Materialy mezhvuzovskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Upravlyayushchie i vychislitel'nye sistemy. Novye tekhnologii"* [International scientific-technical conference Informatics and problems of telecommunications]. Novosibirsk, SibSUTIS Publ., 2001, P. 34–35 (In Russ.).

11. Sokolov D. E. [Modeling of load in a client-server systems based on fractal processes]. *Materialy mezhvuzovskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Upravlyayushchie i vychislitel'nye sistemy. Novye tekhnologii"* [Inter-university scientific-technical conference "Control and computer systems. New technologies"]. Vologda, 2001. P. 59–60 (In Russ.)

12. Sokolov D. E., Trenogin N. G. [Fractal properties of traffic in an actual two-tier data-processing system]. *Sovremennye problemy informatizatsii v tekhnike i technologiyakh.* [Modern problems of informatization in technics and technologies]. Voronezh, Nauchnaya kniga Publ., 2004, No. 10, P. 264–265 (In Russ.).

13. Ryu B. K. Fractal Network Traffic: From Understanding to Implications. Ph.D. thesis. Columbia University, 1996. 143 p.

14. Ryu B., Lowen S. Modeling, analysis and simulation of self-similar traffic using the fractal-shot-noise-driven Poisson process. *Proc. IASTED Modeling and Simulation, Pittsburgh, PA*. 1995, P. 1–4.

15. Trenogin N. G., Velovatiy E. A., Petrov M. N. [Operation and business support system for telecommunication enterprise based on tensor methodology of system analysis]. *Electrosvyaz.* 2013, No. 1, P. 17–20 (In Russ.).

Библиографические ссылки

1. Шелухин О. И., Тенякшев А. М., Осин А. В. Фрактальные процессы в телекоммуникациях : монография. М. : Радиотехника, 2003. 480 с.

2. Цыбаков Б. С. Модель телетрафика на основе самоподобного случайного процесса // Радиотехника. 1999. № 5. С. 24–31.

3. Нейман В. И. Новое направление в теории телетрафика // Электросвязь. 1998. № 7. С. 27–30.

4. Нейман В. И. Самоподобные процессы и их применение в теории телетрафика // Тр. Междунар. Академии связи. 1999. № 1. С.11–15.

5. On the selfsimilarnature of Ethernet traffic (extended version) / W. E. Leland [et al.] // IEEE/ACM Trans. Networking, 1994. Vol. 2 (1). P. 1–15.

6. Norros I. The Management of Large Flows of Connectionless Traffic on the Basis of Self-Similar Modeling // ICC '95, IEEE International Conference on Communications, Seattle. 1995. P. 451–455.

7. Norros I. On the use of fractional Brownian motion in the theory of connectionless networks // IEEE J. Sel. Areas Commun., 1995. Vol. 13. (6). P. 953–962.

8. Statistical characteristics of queue with fractional Brownian motion input / J. Chen [et al.] // Electronics Letters. 2015. Vol. 51 (9). P. 699–701.

9. Петров М. Н., Пономарев Д. Ю. Самоподобие в системах массового обслуживания с ограниченным буфером // Электросвязь. 2002. № 2. С. 35–39.

10. Соколов Д. Е., Треногин Н. Г. Характер сетевого трафика на клиентском участке распределенной клиент-серверной системы // Информатика и проблемы телекоммуникаций: материалы Междунар. науч.-техн. конф. ; СибГУТИ. Новосибирск, 2001. С. 34–35.

11. Соколов Д. Е. Моделирование нагрузки в клиент-серверных системах на основе фрактальных процессов // Управляющие и вычислительные системы. Новые технологии: материалы межвузовской науч.-техн. конф. ; Вологда, 2001. С. 59–60.

12. Соколов Д. Е., Треногин Н. Г. Фрактальные свойства трафика в действующей двухзвенной системе обработки данных // Современные проблемы информатизации в технике и технологиях : сб. тр. Воронеж : Научная книга, 2004. Вып. 10. С. 264–265.

13. Ryu B. K. Fractal Network Traffic: From Understanding to Implications: Ph. D. thesis. Columbia University, 1996. 143 p.

14. Ryu B., Lowen S. Modeling, analysis and simulation of self-similar traffic using the fractal-shot-noise-driven Poisson process // Proc. IASTED Modeling and Simulation. Pittsburgh, PA, 1995. P. 1–4.

15. Треногин Н. Г., Веловатый Е. А., Петров М. Н. Система поддержки операционной и бизнес-деятельности предприятия связи с использованием тензорной методологии анализа систем // Электросвязь. 2013. № 1. С. 17–20

© Trenogin N. G., Petrov M. N., Sokolov D. E., 2017

UDC 681.32

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 300–306

FAULT TOLERANT CMOS REALIZATION OF A MINORITY FUNCTION FOR AEROSPACE COMPUTER COMPLEXES

S. F. Tyurin

Perm National Research Polytechnic University
29, Komsomolsky Av., Perm, 614990, Russian Federation
E-mail: tyurinsergfeo@yandex.ru

In recent years, increased attention is paid to the reliability of the critical applications of digital equipment. Reliability means radiation resistance of digital equipment. For aerospace computer systems it is extremely urgent to develop radiation-resistant components. It is one way to ensure that the radiation resistance is the creation of a special architecture – RHBD (Radiation Hardened by Design). This approach includes triple redundancy (Triple Modular Redundancy, TMR). In implementing the triple redundancy to increase radiation resistance in the Xilinx FPGA Virtex used majoritarian elements based on a tristate buffer. One of the issuance of majority vote circuit for the loading sign to the pins of the FPGA is using a minority voting function. This feature ensures channel disconnection different from the other two. Only in this case, there is no conflict of signals at the outputs of buffers. Then it was realized majority function (voting by a majority). The FPGA logic elements LUT (Look Up Table) werer used for it. However, in this case FPGA logic resources were spent. CMOS implementation element vote on the minority was described. The paper proposes a fault tolerant CMOS implementation of minority voting function as separate elements in order to improve the performance of redundant circuits and do not use FPGA logic resources. Simulation of CMOS voting member in the minority is made in the circuit simulation of National Instruments Electronics Workbench Group system. Simulation confirms efficiency of the proposed element, and evaluation of the probability of failure-free operation shows its high efficiency. Winning there is a considerable range of probabilities as opposed to triple scheme that gets worse unreserved already at the probability of the order of 0.88.

Keywords: Triple Module Redundancy, Majority Vote Circuit, 3-State Buffer, Minority Function, Fault Tolerance.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 300–306

ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫЙ ЭЛЕМЕНТ ГОЛОСОВАНИЯ ПО МЕНЬШИНСТВУ ДЛЯ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

С. Ф. Тюрин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский просп., 29
E-mail: tyurinsergfeo@yandex.ru

Для аэрокосмических вычислительных комплексов необходима надёжная, радиационно стойкая элементная база, в том числе программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС – FPGA). При реализации тройного резервирования (Triple Module Redundancy – TMR) с целью повышения радиационной стойкости в FPGA Virtex фирмы Xilinx используются мажоритарные элементы на основе буферов с тремя состояниями с использованием функции голосования по меньшинству, реализованной на логических элементах LUT (Look Up Table). Предлагается отказоустойчивая КМОП-реализация функции голосования по меньшинству в виде отдельных элементов для того, чтобы повысить быстродействие резервированной схемы и не использовать логические ресурсы ПЛИС. Выполняется моделирование КМОП-элемента голосования по меньшинству в системе схемотехнического моделирования National Instruments Electronics Workbench Group.

Ключевые слова: *мажоритирование, мажоритар, функция голосования по меньшинству, буфер с тремя состояниями на выходе, отказоустойчивость.*

Introduction. In recent years special attention is paid not only to digital equipment of critical application reliability, including aerospace digital computer systems [1; 2], but also to radiation-resistant element basis [3]. The Atmel [4; 5] company is working hard on the creation of radiation-resistant chips. One of ways to ensure radiation resistance is creation of special architecture – RHBD (Radiation Hardened By Design). This approach includes triple redundancy (Triple Modular Redundancy, TMR) or majority function. Majority reservation is planted in the FPGA [6] (field-programmable gate array) programmable logic integrated circuits (PLIC) of the VirtexTM series of

Xilinx [7–9]. At the same time majority devices (Majority Vote Circuits) on the basis of 3-State buffers (BUFT) and vote devices on minority “Minoriti” (minority function, Minority Vote Circuits) are used. It is specified that vote devices on minority can be realized on the basis of so-called LUT (look up table) which represents ROM – multiplexers which inputs of data fix the given logic function [6]. Synthesis of the fault-tolerant device of vote on minority (Minority Vote Circuits) on CMOS transistors for the purpose of their use without involvement of the logical LUT resources and increase in probability of trouble-free (consistent) operation of triplicate digital system arouse interest.

Majority element based on 3-state buffers with minority function vote devices. In FPGA VirtexTM of Xilinx [7–9] realization of majority function on PLIC contact elements (programmable logical integrated circuit) using 3-state buffers and minority vote devices (Minority) is described (fig. 1, 2).

The table of “Minority” (Minority Voted) function validity of three channels A, B, C is suggested in fig. 3.

Thus the Minority Voted function has the following expression:

$$Z = \overline{A}BC \vee A\overline{B}\overline{C}. \quad (1)$$

That is (1) equals one in case of difference of this channel (A, B or C) from two others transfering the output of the corresponding buffer to the third state to avoid conflict between signals with two other buffers having identical outputs. Let’s construct CMOS implementation diagram (1).

CMOS implementation of minority voted function. The suggested simplified diagram of CMOS Minority Voted function implementation (1) is represented in fig. 4.

Element modeling fig. 7 with three additional inverters in the system of circuitry modeling of National Instruments Electronics Workbench Group [10] confirms operability of the element in compliance with the table of validity fig. 3. Fig. 5 represents modeling of working (single) sets A, B, C.

Complexity of LUT [6] taking into account the setting in number of transistors (in connection with restrictions, stated in the Rules of topological design by Mead and Conway [11], n can’t be more than 4) has the following appearance:

$$L_n = 2^n \cdot 8 + 2^{n+1} + 2n. \quad (2)$$

Even if for implementation of minority voting function LUT with $n = 3$ is used, we receive the following number of transistors:

$$L_3 = 2^3 \cdot 8 + 2^{3+1} + 2 \cdot 3 = 86. \quad (3)$$

The suggested implementation is complicated by the complexity of three inverters = 18 transistors, what is more than 4 times as less. However, in case of a minority voting element failure in one channel, the failure in the other channel will lead to a failure of all triplex system.

Fault tolerant CMOS realizations of voting minority function. To follow the Rules of topological design by Mead and Conway [11] on the number of sequentially switched on transistors (no more than 4) decomposition of the initial diagram is needed. One of the options is provided in fig. 6.

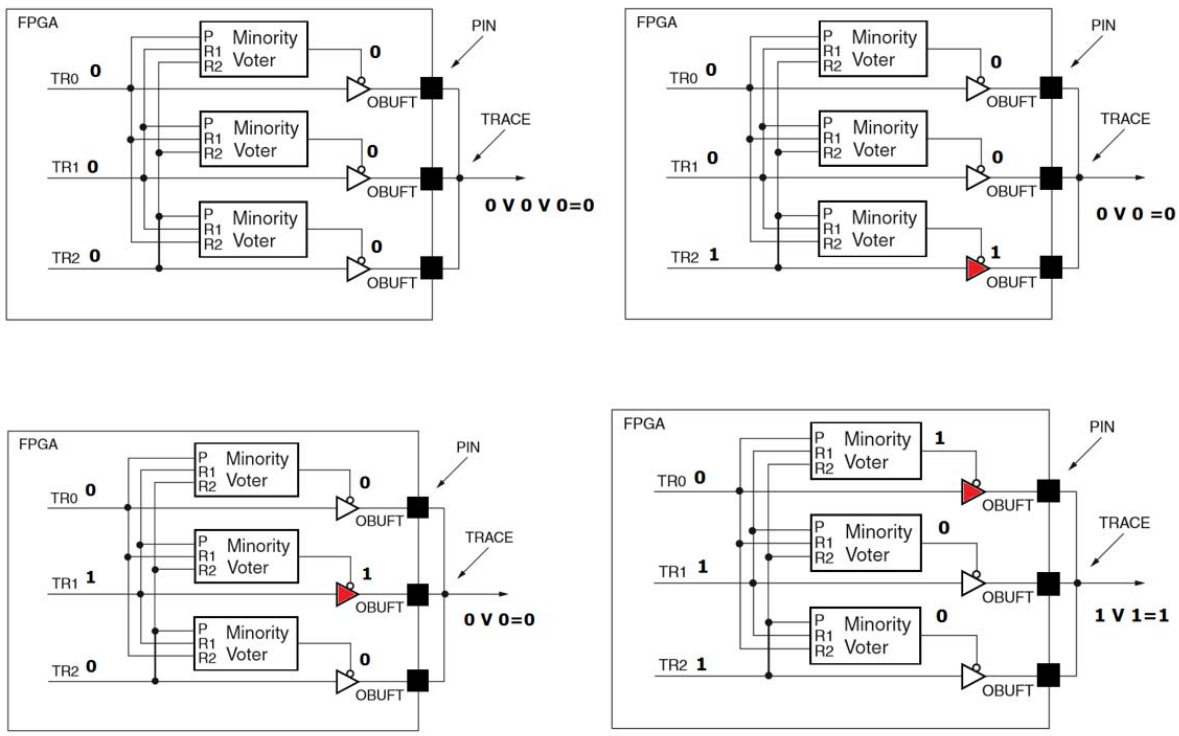


Fig. 1. Majority function implementation using “Minority” diagrams (Minority Voted) in sets 000,001, 010,011

Рис. 1. Реализация мажоритирования с использованием схем «минорити» (Minority Voted) на наборах 000,001, 010,011

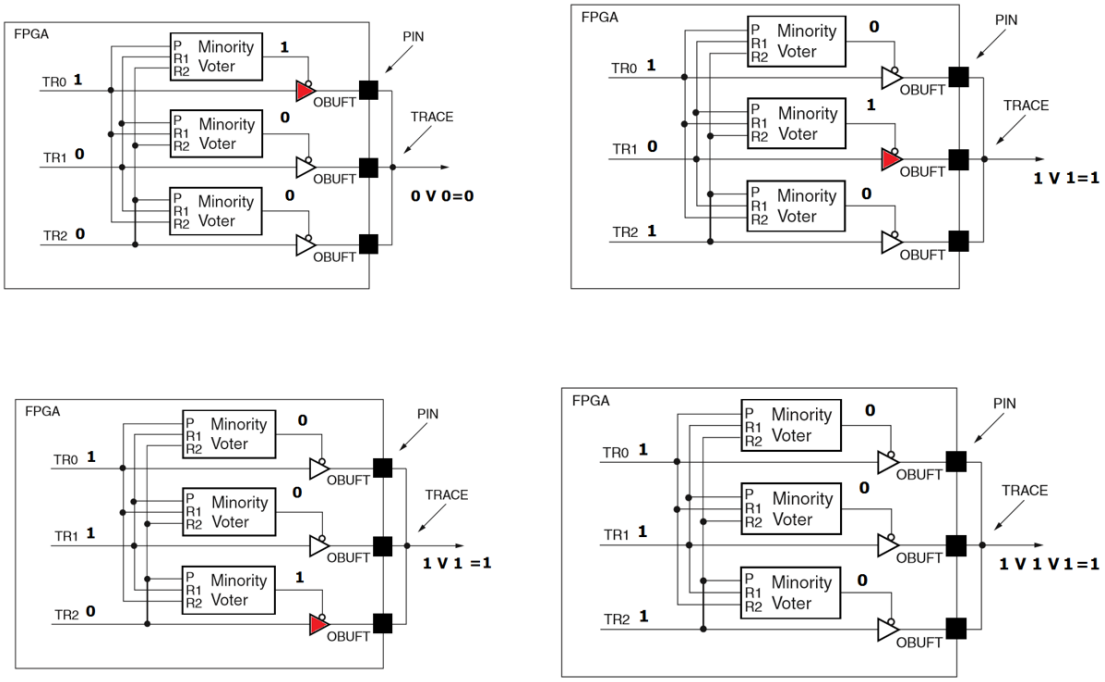


Fig. 2. Majority function implementation using “Minority” diagrams (Minority Voted) in sets 100,101, 110,111

Рис. 2. Реализация мажоритирования с использованием схем «минорити» (Minority Voted) на наборах 100,101, 110,111

A	B	C	Z
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	0

Fig. 3. The table of “Minority” (Minority Voted) function validity

Рис. 3. Таблица истинности функции «минорити» (Minority Voted)

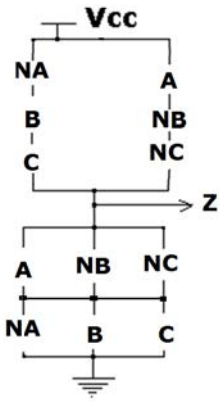
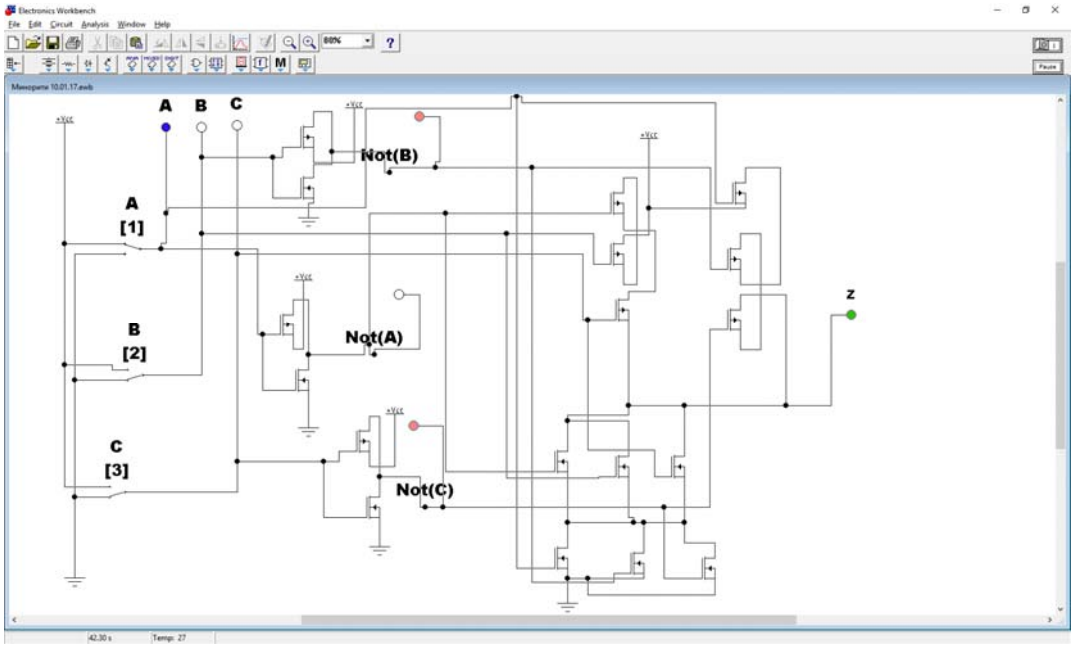
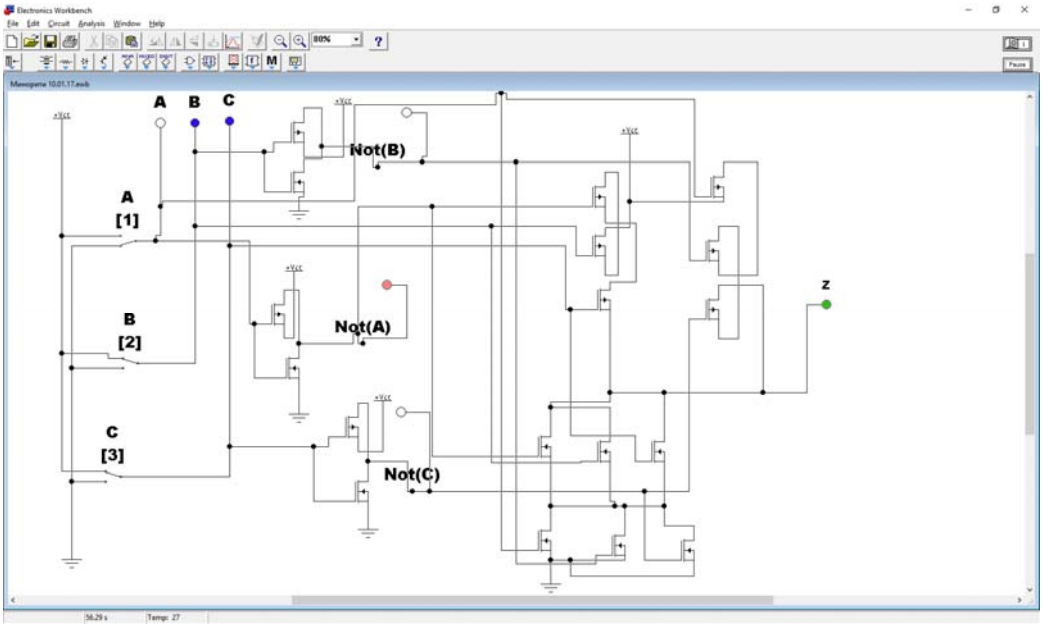


Fig. 4. Simplified diagram of CMOS Minority Voted function implementation

Рис. 4. Упрощённая КМОП схема реализации функции «минорити» (Minority Voted)



a



b

Fig. 5. Modeling of CMOS implementation of the minority voted element: *a* – set 100; *b* – set 011

Рис. 5. Моделирование КМОП реализации элемента голосования по меньшинству: *а* – на наборе 100; *б* – на наборе 011

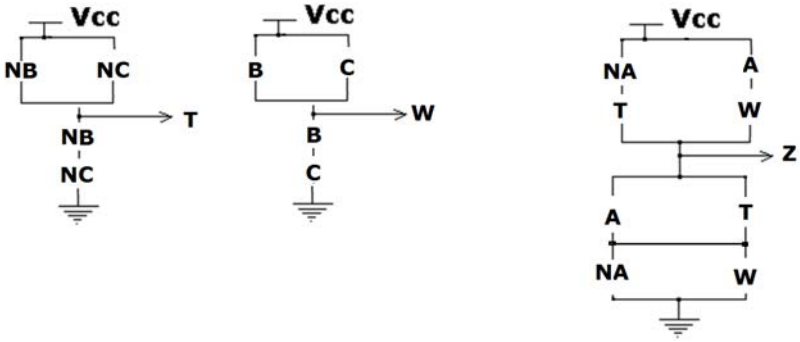


Fig. 6. Decomposition of the simplified CMOS diagram of the “Minority” function realization (Minority Voted)

Рис. 6. Декомпозиция упрощённой КМОП схемы реализации функции «минорити» (Minority Voted)

Further transistors of the decomposed diagram in compliance with [12; 13] are reserved. Simulation of the element of fig. 6 with transistor reservation and with three additional inverters on some input patterns in the system of circuitry simulation of National Instruments Electronics Workbench Group is shown in fig. 7.

Assessment of probability of failure-free operation CMOS voting on minority function realization. For the Veybull model of refusals [14] applied for the purpose of in time radiation resistance assessment of the buffer without reservation we have probability of failure-free operation:

$$e^{-(18)\lambda\cdot t^{\alpha}}, \qquad (4)$$

where failure density of one transistor, α-coefficient, $1 \le \alpha \le 2$; t – an operating time in case of radiation.

For the offered redundant scheme of the voting minority element the probability of failure-free operation will be presented by expression

$$P(t)_{\text{ftm}} = [e^{-4\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}} + 4\cdot e^{-3\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}}(1-e^{-\lambda\cdot t^{\alpha}})]^{22}. \qquad (5)$$

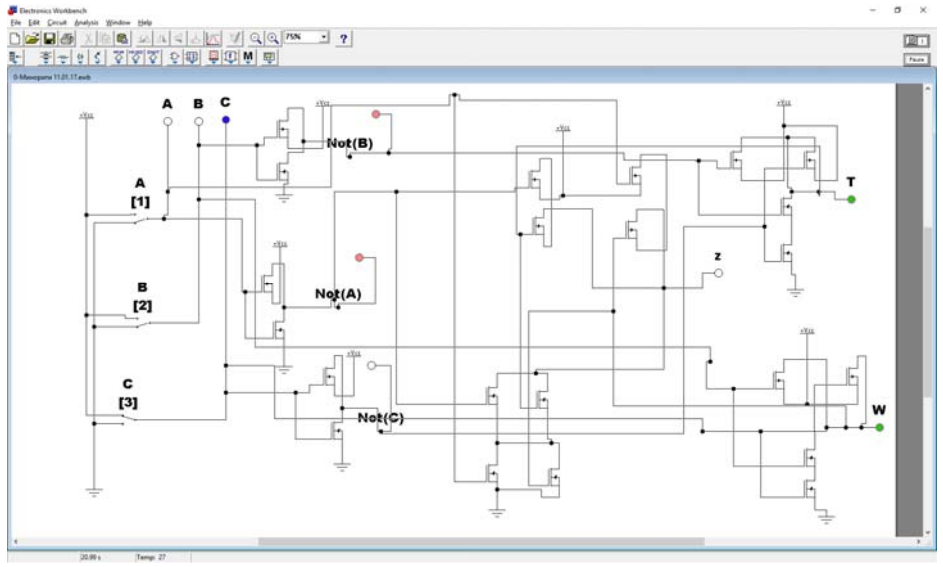
Let's estimate the tripling of the offered element. Under voting elements tripling taking into account one additional majority function:

$$P_3 = (3\cdot e^{-2\cdot(18)\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}} - 2\cdot e^{-3\cdot(18)\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}})e^{-(12)\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}}. \qquad (6)$$

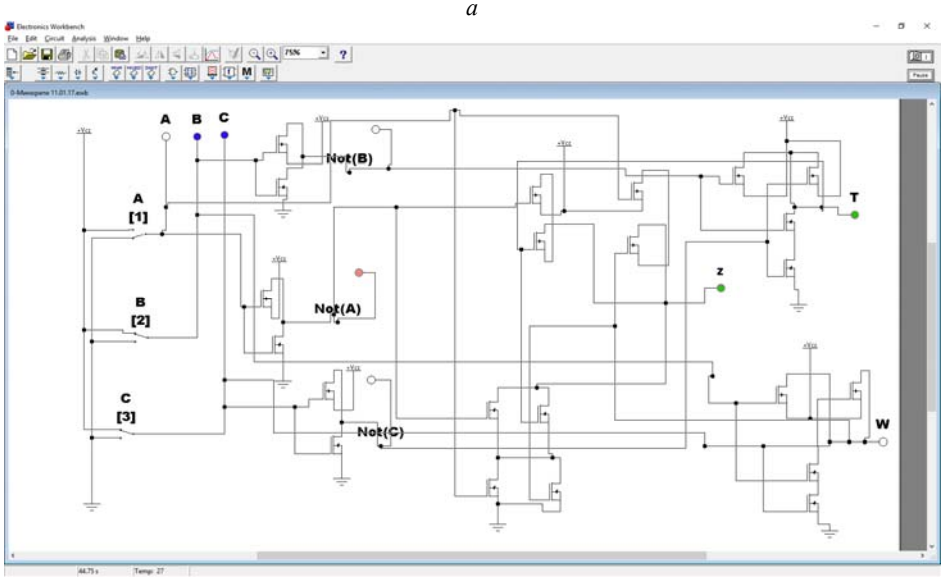
Under voting elements tripling taking into account three additional majority functions:

$$P_{33} = (3\cdot e^{-2\cdot(18)\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}} - 2\cdot e^{-3\cdot(18)\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}})\times \times(3\cdot e^{-2\cdot(12)\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}} - 2\cdot e^{-3\cdot(12)\cdot\lambda\cdot t^{\alpha}}). \qquad (7)$$

Diagrams of failure free operation of minority voting element probability change without reservation, $e^{-(18)\lambda\cdot t^{\alpha}}$, of probability of failure-free operation of the offered redundant diagram, of the tripled with one majority function $P(t)_{\text{ftm}}$, of the tripled diagram P_3 with three majority functions, P_{33}, under failure rate $\lambda = 10^{-5}$ of 1/hour are represented in fig. 8.



a



b

Fig. 7. Modeling of a failure-free element of vote on minority: *a* – in set 100; *b* – in set 011

Рис. 7. Моделирование отказоустойчивого элемента голосования по меньшинству: *а* – на наборе 100; *б* – на наборе 011

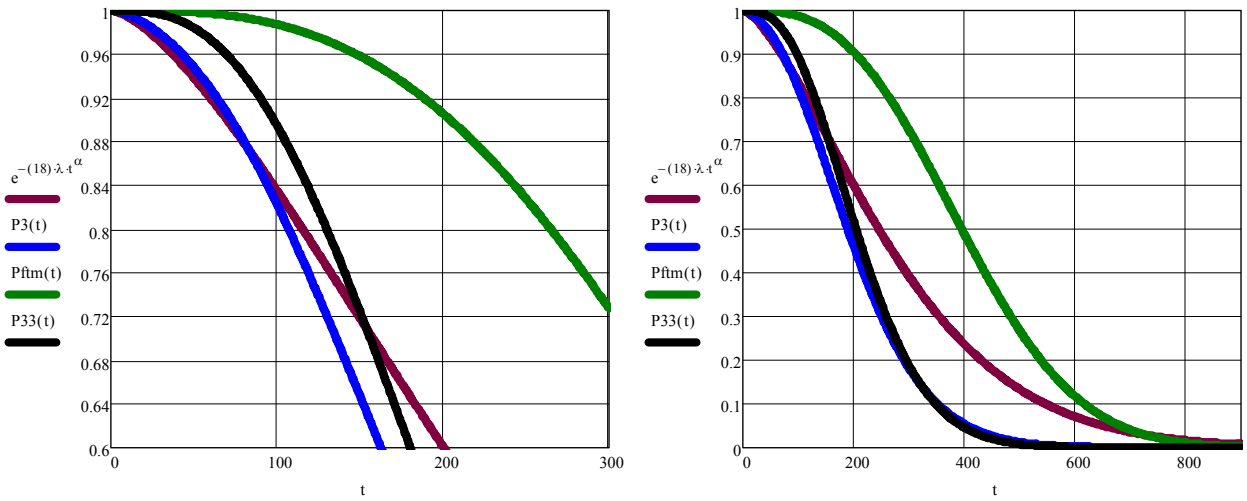


Fig. 8. Diagrams of failure-free operation of the buffer without reservation probability change $e^{-(6)\lambda \cdot t^{\alpha}}$, failure-free operation of the redundant diagram – with transistors titration $P(t)_{\text{ftm}}$, of the triple diagram with one majority function P_3, of triple diagram with three majority functions P_{33} under failure density $\lambda = 10^{-5}$ of 1/hour: *a* – in the range from 1 to 0.6; *b* – in the range of probabilities from 1 to 0

Рис. 8. Графики изменения вероятности безотказной (бессбойной) работы буфера без резервирования $e^{-(6)\lambda \cdot t^{\alpha}}$, вероятности безотказной (бессбойной) работы резервированной схемы – с расчетверением транзисторов $P(t)_{\text{ftm}}$, троированной схемы P_3 с одним мажоритаром, троированной схемы с тремя мажоритарами P_{33} при интенсивности отказов (сбоев) $\lambda = 10^{-5}$ 1/час; *а* – в диапазоне от 1до 0,6; *б* – в диапазоне вероятностей от1 до 0

Conclusion. In FPGA Virtex of Xilinx for the purpose of radiation resistance improvement tripling is used (Triple Module Redundancy – TMR). For the delivery of majority signal on FPMT connections "Minority" functions realized in three LUT are used, where the single signal is formed only in case of difference of this input from two others, providing at the buffers output which aren't in the third state, always 0 or 1 without "mixing". In the article failure-free CMOS realization of the voting minority element, allowing not to use FPMT logical resources and essentially simplify realization of a majority function on the basis of buffers, are described.

The executed modeling in the system of circuitry modeling of National Instruments Electronics Workbench Group has confirmed operability of the scheme offered.

The assessment failure-free operation probability confirms a considerable advantage over the triple diagram. This advantage is observed on the wide range of probability unlike that of the triple diagram which becomes worse than not redundant already at probability of about 0.88.

References

1. GOST 27.002–89. *Nadezhnost' v tekhnike Osnovnye ponyatiya. Terminy i opredeleniya.* [Reliability Technology Concepts. Terms and Definitions]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1990. 42 p. (In Russ.)

2. Shubinskij I. B. *Nadezhnye otkazoustojchivye informatsionnye sistemy. Metody sinteza* [Robust fault-tolerant information systems. Methods of synthesis]. 2016, 544 p. (In Russ.).

3. GOST 18298–79. *Stojkost' apparatury, komplektuyushhikh ehlementov i materialov radiatsionnaya. Terminy i opredeleniya.* [Resistance equipment, components and materials radiating elements. Terms and Definitions]. Available at: http://www.internet-law.ru/gosts/gost/4457/ (accessed 10.1.2017).

4. Donald C. Mayer, Ronald C. Lacoe. Designing Integrated Circuits to Withstand Space Radiation. Available at: http://www.aero.org/publications/crosslink/summer2003/06.html (accessed 11.1.2017).

5. Yudintsev V. *Radiatsionno – stojkie integral'nye skhemy. Nadyozhnost' v kosmose i na zemle* [Radiation – resistant integrated circuits.] *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes: zhurnal.* Available at: http://www.electronics.ru/files/article_pdf/0/article_592_363.pdf (accessed 12.1.2017).

6. Strogonov A., Cybin S. *Programmiruemaya kommutatsiya PLIS: vzglyad iznutri.* [Programmable switching FPGA: a view from the inside.] Available at: http://www.kit-e.ru/articles/plis/2010_11_56.php (accessed 11.1.2017).

7. Carl Carmichael. Triple Module Redundancy Design Techniques for Virtex FPGAs. Available at: https://www.xilinx.com/support/documentation/application_notes/xapp197.pdf (accessed 07.12.2016).

8. Xilinx Reduces Risk and Increases Efficiency for IEC61508 and ISO26262 Certified Safety Applications. WP461 (v1.0) April 9, 2015. Available at: http://www.xilinx.com/support/documentation/white_papers/wp461-functional-safety.pdf (accessed 20.12.2016).

9. QPro Virtex-II 1.5V Platform FPGAs. DS122 (v3.0) April 7, 2014. Available at: http://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds122.pdf (accessed 20.12.2016).

10. *Sayt razrabotchika National Instruments*. [National Instruments Developer Site.] Available at: http://www.ni.com/multisim/ (accessed 22.12.2016).

11. Ulman Dzh. D. *Vychislitelnye aspekty SBIS.* [Computational Aspects of VLSI]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1990, 480 p. (In Russ.).

12. *Nadezhnost i effektivnost v tekhnike: spravochnik* [The reliability and efficacy in the art]. Ed. V. S. Avduevskim. Vol. 2. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987, 280 p.

13. Tyurin S. F. [Functionally complete-tolerant FPGA elements for aerospace computer systems.]. *Vestnik SibGAU*. 2016, No. 2, P. 484–489 (In Russ.).

14. Tyurin S. F. [Modeling fault tolerant element for aerospace computer systems]. *Vestnik SibGAU.* 2016, No. 4, P. 1115–1119 (In Russ.).

Библиографические ссылки

1. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М. : Изд-во стандартов, 1990. 42 с.

2. Шубинский И. Б. Надежные отказоустойчивые информационные системы. Методы синтеза. 2016. 544 с.

3. ГОСТ 18298–79. Стойкость аппаратуры, комплектующих элементов и материалов радиационная. Термины и определения [Электронный ресурс]. URL: http://www.internet-law.ru/gosts/gost/4457/ (дата обращения: 30.12.2016).

4. Donald C. Mayer, Ronald C. Lacoe. Designing Integrated Circuits to Withstand Space Radiation [Электронный ресурс]. URL: http://www.aero.org/publications/crosslink/summer2003/06.html (дата обращения: 10.01.2017).

5. Юдинцев В. Радиационно стойкие интегральные схемы. Надёжность в космосе и на земле // Электроника: наука, технология, бизнес : журнал. URL: http://www.electronics.ru/files/article_pdf/0/article_592_363.pdf (дата обращения: 11.01.2017).

6. Строгонов А., Цыбин С. Программируемая коммутация ПЛИС: взгляд изнутри [Электронный ресурс]. URL: http://www.kit-e.ru/articles/plis/2010_11_56.php (дата обращения: 12.01.2017).

7. Carl Carmichael. Triple Module Redundancy Design Techniques for Virtex FPGAs [Электронный ресурс]. URL: https://www.xilinx.com/support/documentation/application_notes/xapp197.pdf (дата обращения: 07.12.2016).

8. Xilinx Reduces Risk and Increases Efficiency for IEC61508 and ISO26262 Certified Safety Applications, [Электронный ресурс] WP461 (v1.0) April 9, 2015. URL: http://www.xilinx.com/support/documentation/white_papers/wp461-functional-safety.pdf (дата обращения: 20.12.2016).

9. QPro Virtex-II 1.5V Platform FPGAs. DS122 (v3.0) [Электронный ресурс]. April 7, 2014. URL: http://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds122.pdf (дата обращения: 20.12.2016).

10. Сайт разработчика National Instruments [Электронный ресурс]. URL: // http://www.ni.com/multisim/ (дата обращения: 22.12.2016).

11. Ульман Дж. Д. Вычислительные аспекты СБИС / пер. с англ. А. В. Неймана ; под ред. П. П. Пархоменко. М. : Радио и связь, 1990. 480 с.

12. Надежность и эффективность в технике : справочник / ред. совет во главе с В. С. Авдуевским [и др.]. В 10 т. Т. 2. Математические методы в теории надежности и эффективности / под ред. Б. В. Гнеденко. М. : Машиностроение, 1987. 280 с.

13. Тюрин С. Ф. Функционально-полные толерантные элементы ПЛИС (FPGA) для аэрокосмических вычислительных комплексов // Вестник СибГАУ, 2016. № 2. С. 484–489.

14. Тюрин С. Ф. Моделирование отказоустойчивого элемента для аэрокосмических вычислительных комплексов // Вестник СибГАУ. 2016. № 4. С. 1015–1019.

© Tyurin S. F., 2017

UDC 004.318

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 307–311

THE SYSTEM OF SOFTWARE-DRIVEN VERIFICATION OF NETWORK IP-CORES IN A REFERENCE SYSTEM-ON-CHIP

A. V. Shahmatov, E. S. Lepeshkina*, V. Kh. Khanov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technologies
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: klepka1111.93@mail.ru

The article presents the application of network Intellectual Property cores (IP cores) software-driven verification method for network infrastructure devices in the system-on-chip microprocessor (SoC) used as verification environment. The SoC used for verification is a reference system since it consists of previously fully verified and approved IP cores which interact in this system correctly and accurately. Software of a reference system generates test inputs and processes responses to them which are received from a verified device. Conclusions of executed or unexecuted tests are generated on the basis of the expected results. A set of expected results of input action is a reference model of a verified IP core.

General architecture of a verification system of a network device IP core has a form of a classic test loop. The variants of verification architecture given depend on the type of a verified network device: an individual network codec, a network protocol controller or a network switch. The presented architectures show the simplicity of software-driven verification. The test environment naturally results from the reference SoC model and test software developed in such high-level programming language as C/C++.

When the software-driven verification of an IP core takes place in reference SoC environment, the test software consists of two types of tests: directed tests and restricted-random tests. Successive use of both the given types of tests and typical scenarios of network devices interaction which include request-reply packages transmission between network nodes provides high coverage of a verified IP core with test situations. To check fault tolerance function it is supposed to use the scenarios of network devices interaction in conditions of possible faults made by predetermined introducing of errors into packages transmitted over the network connections. Program tests which are developed and proved during the IP core model verification are completely ready to be used in hardware SoC prototype including the given IP core in the programmable logic device.

The presented approach to functional verification was used for IP cores testing in SpaceWire network infrastructure: a fault tolerance codec, a RMAP protocol controller and a routing switch.

Keywords: Intellectual Property cores, functional verification, software-driven verification, reference SoC, verification architecture of intellectual property cores.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 307–311

СИСТЕМА ПРОГРАММНО-УПРАВЛЯЕМОЙ ВЕРИФИКАЦИИ СЕТЕВЫХ СЛОЖНОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БЛОКОВ В ЭТАЛОННОЙ СИСТЕМЕ НА КРИСТАЛЛЕ

А. В. Шахматов, Е. С. Лепёшкина*, В. Х. Ханов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: klepka1111.93@mail.ru

Представлено применение метода программно-управляемой верификации сложнофункциональных блоков (СФ-блоков) устройств сетевой инфраструктуры в микропроцессорной системе на кристалле (СнК), используемой в качестве среды для проведения верификации. Используемая для верификации СнК является эталонной, так как она состоит из ранее полностью верифицированных и апробированных СФ-блоков, которые гарантированно правильно и безошибочно в ней взаимодействуют. Программное обеспечение эталонной системы вырабатывает тестовые воздействия и обрабатывает реакции на них, получаемые от верифицируемого устройства. Заключения о выполнении или невыполнении тестов вырабатываются исходя из ожидаемых результатов. Совокупность ожидаемых результатов на входные воздействия составляет эталонную модель верифицируемого СФ-блока.

Общая архитектура системы верификации СФ-блока сетевого устройства имеет вид классической тестовой петли. Приведены варианты архитектуры верификации в зависимости от вида верифицируемого сетевого устройства: отдельный сетевой кодек, контроллер сетевого протокола или сетевой коммутатор.

Представленные архитектуры демонстрируют простоту программно-управляемой верификации. Окружение тестирования получается естественным образом из модели эталонной СнК и тестового программного обеспечения, разработанного на высокоуровневых языках программирования, обычно C/C++.

При программно-управляемой верификации СФ-блока в среде эталонной СнК тестовое программное обеспечение состоит из двух видов тестов: направленных и ограниченно случайных. Последовательное использование данных видов тестирования, а также типовых сценариев взаимодействия устройств в сети, заключающихся в посылках серий запросных и ответных пакетов между узлами, обеспечивает высокое покрытие верифицируемого СФ-блока тестовыми ситуациями. Для проверки функций отказоустойчивости предлагается использовать сценарии взаимодействия узлов в условиях возможных сбоев, вносимых путем преднамеренного внесения ошибок в передаваемые через сетевые соединения пакеты. Программные тесты, разработанные и отлаженные в процессе верификации модели СФ-блока, полностью готовы к применению в аппаратном прототипе СнК, включающей данный СФ-блок, в устройстве программируемой логики.

Представленный подход к проведению функциональной верификации был использован для тестирования СФ-блоков для инфраструктуры сети SpaceWire: отказоустойчивого кодека, контроллера протокола RMAP и маршрутизирующего коммутатора.

Ключевые слова: сложнофункциональные блоки, функциональная верификация, программно-управляемая верификация, эталонная система на кристалле, схемы верификации сетевых сложнофункциональных блоков.

Introduction. Functional verification (FV) is intended to serve for the validation of a designed device or an intellectual property core (IP-core) to set functional specifications [1]. The FV significance rises together with the increase of designed devices complexity. The FV complexity also increases reaching 70 % of all development work [2]. Usually FV is performed on models of a designed device and then models are converted into a hardware prototype which becomes a base for creating of a target digital device.

FV is divided into 2 large groups of methods: methods based on dynamic modeling or simulation (Simulation-Based Verification, SBV) of a model of Register-Transfer Level (RTL) [1; 2]; and Formal Functional Verification (FFV) methods based on the representation of a verified IP-core as other models that are not RTL, which are called formal and used for logical fault finding [3]. SBV is a traditional approach still having high priority because a target device is synthesized from RTL-model created by Hardware Description Language (HDL).

FFV methods actively developed in recent years are additional and serve to avoid faults at early project stages, to detect faults not identified by SBV-methods; to carry out formal provability of the errorless operation of a designed device. There are also so-called hybrid methods using the combinations of different approaches. Hereinafter the SBV-methods are used in the paper.

In general terms SBV-method consists of creating the test environment where RTL-model of Device Under Test (DUT) is simulated. The test environment generates test inputs (stimuli) on the model in the form of different sequences of input signal sets and analyses responses, or model reactions, that is, changes in its state and its output values. The action described is provided by special programs – RTL-simulators.

At the present moment the simulation of complex digital devices such as microprocessors or devices connected to their internal bus is based on the Transaction Level Modeling (TLM) concept [1; 2]. In this case the stimuli are not specially-generated input signal sets but high-level interaction with DUT (bus exchange operations and input/output interface exchange, processor instructions, and network packages) converted into signals. DUT reactions to transactions are also converted into high-level data saved as response tracks. The given test environment creating simplifies the FV.

For test environment creating one can use both programming languages such as C/C++ or assembler and VHDL. The latter way belongs to autonomous IP-core verification and is inherent in all RTL-simulators. A new stage of its development is presented by such well-known methodologies as Open Verification Methodology (OVM) and Universal Verification Methodology (UVM) [4; 5]. To reduce the time spent on developing the test environment and creating stimuli of any complexity they use such an object-oriented system designing language as System Verilog and UVM class library.

Traditional programming languages are usually used for IP-core verification within an entire system. For example, a well-known approach for processor verification is Instruction Set Simulation (ISS) [6]. The stimuli are program tests of verifiable processor instruction executing and result monitoring. ISS is more flexible: it is used not only for system verification but also for autonomous one on condition of corresponding preparation as well as for hardware and software co-verification.

Such approach is generally called Software-Driven Verification (SDV) [7]. In special literature one can come across another name – Processor-Driven Verification (PVD) [8]. The approach consists of IP-core RTL-model connection to the full-function microprocessor system (MPS) model, for example system-on-chip (SoC), by the standard bus and interface and later verification by MPS program tests.

This paper presents the SoC system for software-driven IP-core verification, where IP-cores are interface devices.

The software-driven verification system. The overall architecture of IP-core verification system for network devices has the form of a classic test loop, when the interaction of a reference device and a tested one is checked under the control of an operating device which in this case is a SoC processor with required test software. A codec test loop is first performed in the model and for FPGA prototyping it is replaced by cable connection.

Depending on the type of network device to be verified – a network codec, a network protocol controller

or a network switch - the architecture of the verification system is modified.

Fig. 1 shows the architecture of network codec IP-core verification system (DUT on fig. 1). All the other SoC devices – a processor, an on-chip bus, and other devices not shown in the figure for simplicity – are reference ones in this case. It is supposed that reference IP-cores were previously fully verified and approved; correctness of their functioning is guaranteed; and they can be fully trusted. The given IP-cores can be self-developed, purchased as commercial products or obtained from information resources as open products, but in any case their correctness is guaranteed. The entire SoC system consisting of reference IP-cores which are guaranteed to correctly and unerringly interact in it is a reference system. In a reference system only one separate IP-core is verified at a time.

The scheme presented in fig. 1 is intended for verification of a new IP-core of a network codec, for example, its fault-tolerant version, by a reference IP-core of a network codec. The test inputs generated by test software are fed to a verified IP-core network codec from two directions: from an on-chip bus and a codec reference IP-core.

Verified IP-core responses to inputs impacts are also processed by test software. The conclusion about executed or unexecuted tests is based on the expected results. The cumulative expected result is a DUT reference model realized in a reference SoC.

The architecture of a verification system of a network protocol controller IP-core is presented in fig. 2. A network controller includes a reference network codec. The logic of a network controller is to be verified. The architecture of network switch verification is built the same way (fig. 3). The network switch has *n* reference network codecs equal to the number of switch ports. A separate network connection using the *n* network codecs of the reference SoC is created for every switch port. Only the network switch logic should be verified.

Presented architectures illustrate the simplicity of software-driven verification. Test environment naturally results from the reference SoC model and test software developed in a high-level programming language, usually C/C++.

Test software. According to general verification methodology, if software-driven IP-core verification takes place in SoC reference environment then the test software consists of two test types: a directed test and a restricted random test.

Directed software tests are designed manually. They are used for initial testing of a verified IP-core basic elements and its basic function as well as for checking of hard to formalize and rare events [6]. Besides, directed software tests allow recreating and checking the typical scenarios of network device interaction which consists of request-reply packages transmission between network nodes.

To check fault tolerance function the network device interaction scenarios can be practised in response to possible faults injected by predetermined fault introducing into packages transmitted over the network connections.

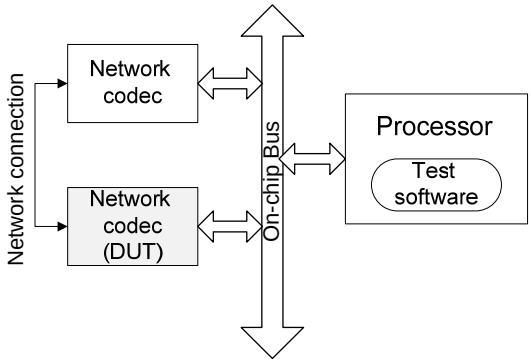


Fig. 1. The architecture of a network codec IP-core verification system

Рис. 1. Архитектура системы верификации СФ-блока сетевого кодека

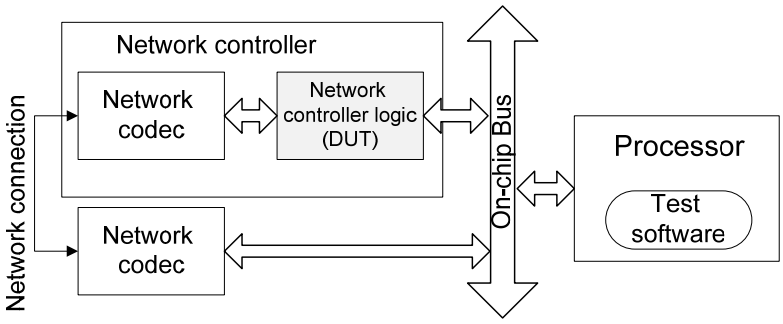


Fig. 2. The architecture of a verification system of a network protocol controller IP-core

Рис. 2. Архитектура системы верификации СФ-блока контроллера сетевого протокола

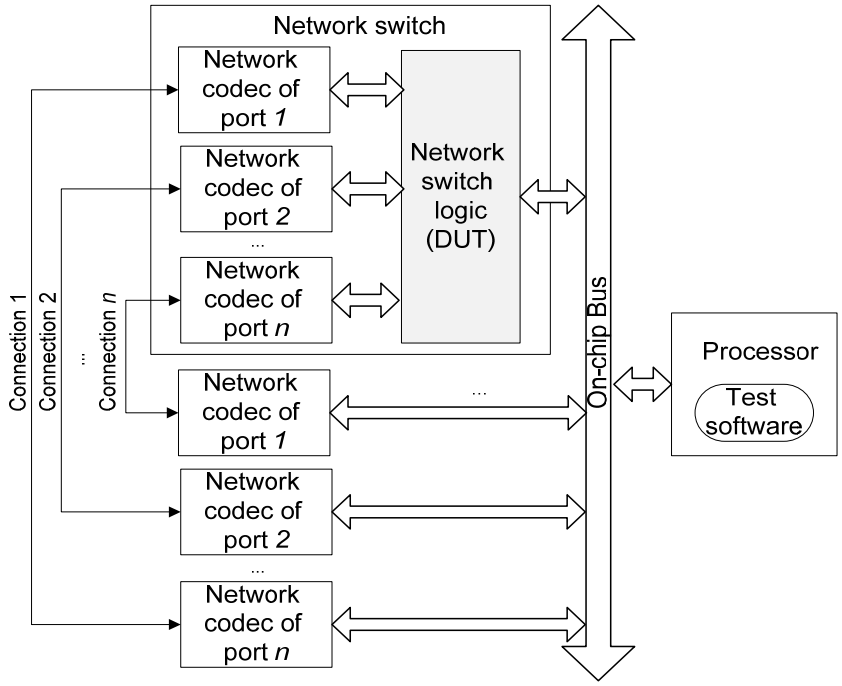


Fig. 3. The architecture of a verification system of a network switch IP-core

Рис. 3. Архитектура системы верификации СФ-блока сетевого коммутатора

The major part of detailed verification is performed by restricted random verification based on the object-oriented programming capability. The method of restricted random (stochastic) testing is that the test sequence is generated automatically according to a set template with parameterized pseudorandom selection of test body instructions and their arguments. The method key benefit is the opportunity to fully automate tests generation and start-up processes, as well as the comparison of tests results which is necessary for mass testing of complex IP-cores [9].

The advantage of the software-driven IP-core verification by reference SoC is naturalness and simplicity. There is no need to study specialized methodologies, language aids and verification libraries, and then with their help to create required verification environment and test inputs. In this case the test environment results naturally from a priori available reference SoC model created by a traditional designing language (VHDL, Verilog), and tests are written in a high-level programming language C/C++, studied in the course of preparation for all engineering degrees at technical universities. The hardware and software co-verification task is also naturally solved because the program tests developed for IP-core verification become the basis for operational software of a given IP-core in a given SoC [10].

The restriction of this methodology usage is the absence of a reference SoC. Such a situation is possible when a principally new SoC with a new processor and a new on-chip bus is developed. But the situation is not typical for the major part of IP-core development and testing processes.

Verification results. Software-driven verification method for a reference SoC and presented verification system architectures are used to verify IP-cores of network infrastructure SpaceWire [11]. The reference SoC as well as the other IP-cores except SpaceWire reference codec are realized on the basis of LEON3 processor core from the open library GR-LIB of Gobham Gaisler [12]. The open codec SpaceWire Light is used as a SpaceWire reference codec [13]. SoC created on the basis of GR-LIB IP-core base can serve as a reference one. Gobham Gaisler Company has a good reputation, its concepts have piloting capacity and are realized both in FPGA and in ASIC.

The architecture presented in fig. 1 is used for SpaceWire fault-tolerant codec verification; the one presented in fig. 2 – for RMAP protocol controller verification [14], and the one presented in fig. 3 – for a routing switch of SpaceWire network.

Verification process is performed in two stages: the first stage – verification on a model and the second one – verification by FPGA prototype. Testing by FPGA implementation allows both detecting errors that were not detected during the model verification, and making sure of IP-core functional specification values for a specific FPGA [15]. In this process the test software which was used for model verification is fully used for FPGA prototype verification which is an important advantage of software-driven verification in a reference SoC. Further the developed test software can be used for target VLSI testing, including a reference SoC and a verified IP-core.

Conclusion. The software-driven IP-core verification method with a reference SoC provides flexibility and variety of possible ways of creating test software; it does not create disparity between verification and synthesis; it provides the SoC hardware and software co-verification; it provides software test portability when tests are created during the verification process of an IP-core model in a computational model on a SoC FPGA-prototype including this IP-core.

Software-driven verification architecture with a reference SoC realizes the classic test loop regardless of a verified network device type. Developed modifications of software-driven verification system with a reference SoC are used for IP-core testing in SpaceWire network: a fault-tolerant codec, a RMAP protocol controller and a routing switch.

References

1. Meyer A. Principles of Functional Verification. *Newnes*, 2003, 217 p.
2. Bergeron J. Writing Testbenches: Functional Verification of HDL Models. *Kluwer Academic Publishers*, 2000. 354 p.
3. Lam W. K. Hardware Design Verification: Simulation and Formal Method-Based Approaches. *Prentice Hall*, 2005, 624 p.
4. Mentor Graphics UVM/OVM Documentation (verification methodology cookbook). *Mentor Graphics Corporation*, 2011, 166 p.
5. Universal Verification Methodology (UVM) 1.1 Class Reference. Available at:www.accellera.org/community/uvm (accessed: 13.01.2017).
6. Kamkin A., Kotsynyak A. *Sredstva funktsional'noy verifikatsii mikroprotsessorov* [Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN]. 2014, Vol. 26, iss. 1, P. 149-200 (In Russ.).
7. Processor-DrivenVerification, Cadence. Available at: www.cadence.com/content/cadence-www/global/en_US/home/tools/system-design-and-verification/software-driven-verification.html (accessed: 10.02.2017).
8. Processor-Driven Verification, Mentor Graphics. Available at: www.mentor.com/products/fv/verificationhorizons/processor-driven-verification (accessed: 10.02.2017).
9. Gribkov I., Zakharov A., Kol'tsov P. *Razvitie sistemy stokhasticheskogo testirovaniya mikroprotsessorov INTEG* [Programmnye produkty i sistemy]. 2010, No. 2, P. 14-23 (In Russ.).
10. Shakhmatov A. *Sistema na kristalle v kachestve testovogo okruzheniya dlya verifikatsii slozhnofunktsional'nykh blokov*. [V mat. XX Mezhdunar. nauchn. konf. Reshetnevskie chteniya]. Krasnoyarsk, 2016, Part 1, P. 357–358. (In Russ.).
11. *ECSSE-ST-50-12C SpaceWire – Links, nodes, routers and networks* [European Cooperation for Space Standardization (ECSS)]. 2008, 129 p.
12. *LEON3 Processor. Available at: www.gaisler.com/index.php/ products/processors/leon3 (accessed: 10.02.2017).*
13. J. Rantwijk, SpaceWire Light v20110709. Available at: www.opencores.org/project, spacewire_light (accessed: 10.02.2017).
14. *ECSSE-ST-50-52C SpaceWire – Remote memory access protocol* [European Cooperation for Space Standardization (ECSS)]. 2010, 109 p.
15. Shakhmatov A., Khanov V., Chekmarev S. *A functional verification system of IP-blocks in network protocols* [12TH International Conference On Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering Proceedings (APEIE-2014)]. Novosibirsk, NSTU, 2014, Vol. 1, P. 247–251.

Библиографические ссылки

1. Meyer A. Principles of Functional Verification. Newnes, 2003. 217 p.
2. Bergeron J. Writing Testbenches: Functional Verification of HDL Models. Kluwer Academic Publishers, 2000. 354 p.
3. Lam W. K. Hardware Design Verification: Simulation and Formal Method-Based Approaches. Prentice Hall, 2005. 624 p.
4. Mentor Graphics UVM/OVM Documentation (verification methodology cookbook). 2011. 166 p.
5. Universal Verification Methodology (UVM) 1.1 Class Reference [Электронный ресурс]. URL: http://www.accellera.org/community/uvm (дата обращения: 13.01.2017).
6. Средства функциональной верификации микропроцессоров / А. С. Камкин [и др.] // Труды Института системного программирования РАН. 2014. Т. 26, вып. 1. С. 149–200.
7. Processor-Driven Verification, Cadence [Электронный ресурс]. URL: https://www.cadence.com/content/cadence-www/global/en_US/home/tools/system-design-and-verification/software-driven-verification.html (дата обращения: 10.02.2017).
8. Processor-Driven Verification, Mentor Graphics [Электронный ресурс]. URL: https://www.mentor.com/products/fv/verificationhorizons/processor-driven-verification (дата обращения: 10.02.2017).
9. Развитие системы стохастического тестирования микропроцессоров INTEG / И. В. Грибков [и др.] // Программные продукты и системы. 2010. № 2. С. 14–23.
10. Шахматов А. В. Система на кристалле в качестве тестового окружения для верификации сложнофункциональных блоков // Решетневские чтения : материалы XX Междунар. науч. конф. / СибГАУ. Красноярск, 2016. Ч. 1. С. 357–358.
11. ECSSE-ST-50-12C SpaceWire – Links, nodes, routers and networks. European Cooperation for Space Standardization (ECSS), 2008. 129 p.
12. LEON3 Processor [Электронный ресурс]. URL: http://www.gaisler.com/index.php/products/processors/leon3 (дата обращения: 10.02.2017).
13. Joris van Rantwijk, SpaceWire Light v20110709 [Электронный ресурс]. URL: http://opencores.org/project, spacewire_light, (дата обращения: 10.02.2017).
14. ECSSE-ST-50-52C SpaceWire – Remote memory access protocol. European Cooperation for Space Standardization (ECSS), 2010. 109 p.
15. Shakhmatov A. V., Khanov V. Kh., Chekmarev S. A. A functional verification system of IP-blocks in network protocols // 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering Proceedings (APEIE-2014). Novosibirsk : NSTU, 2014. Vol. 1. P. 247–251.

© Shahmatov A. V., Lepeshkina E. S., Khanov V. Kh., 2017

Раздел
Part
2

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

AVIATION AND SPACECRAFT ENGINEERING

UDC 629.764.7

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 314–322

DEVELOPMENT OF LAUNCH VEHICLE CONTROL ALGORITHM FOR THE INITIAL PART OF THE TRAJECTORY USING THE ACOR METHOD

A. Sh. Altshuler[1], V. T. Bobronnikov[2], M. V. Trifonov[2*]

[1]Khrunichev State Research and Production Space Center
18, Novozavodskaya Str., Moscow, 121087, Russian Federation
[2]Moscow Aviation Institute (National Research University)
4, Volokolamskoe Shosse, A-80, GSP-3, Moscow, 125993, Russian Federation
[*]E-mail: 3_fonov@mail.ru

The control system of a launch vehicle (LV) at the initial phase of flight at altitudes between 0 and 300 meters is the object of investigation in the article. At this phase the flame of the LV jet engine is the cause of a negative impact on facilities of the launch complex. This effect can be reduced by displacing the jet flame in a certain radial direction with increased resistance of the facilities using a specially developed vehicle motion control program.

The purpose of the article is to develop an algorithm for the controller of the LV motion control system on the considered "displacement phase" of the trajectory that provides an implementation of such a program.

To solve the problem, we developed the modified version of the Letov's method of analytical construction of regulators (ACOR). The peculiarity of the modified statement of the problem solved in the work is that the controlled output vector of the system depends explicitly not only on the LV state vector, but also on the control variable.

The quality of control is evaluated using a quadratic terminal-integral optimality criterion. This kind of criterion allows to trace with the specified accuracy the preliminary calculated program for supporting the required position of the trace of the LV jet flame on the launching plane, and also to ensure the vertical position and the zero angular velocity of the vehicle at the end of the displacement phase.

To solve the problem of constructing the algorithm, a special linearized model of the LV motion has been developed. The results of simulating the controlled motion of a launch vehicle with the use of the algorithm confirm the operability and demonstrate efficiency of the developed optimal regulator of the LV control system at the displacement phase under consideration. Calculation results show that angular position of the LV at the end of the displacement phase is close to vertical, the angle of the engine nozzle deflection is within the permissible limits and the deviation of the current position of the jet flame track from the program value does not exceed 0.5 meters.

Keywords: launch vehicle, facilities of the launch complex, jet flame, displacement phase, optimal regulator, quadratic criterion.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 314–322

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ НА НАЧАЛЬНОМ УЧАСТКЕ ПОЛЕТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АКОР

А. Ш. Альтшулер[1], В. Т. Бобронников[2], М. В. Трифонов[2*]

[1]Государственный космический научно-производственный центр имени М. В. Хруничева
Российская Федерация, 121087, г. Москва, ул. Новозаводская, 18
[2]Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
Российская Федерация, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4, А-80, ГСП-3
[*]E-mail: 3_fonov@mail.ru

В качестве объекта исследования рассматривается система управления движением РН на начальном участке полета 0–300 метров. На этом участке газодинамическая струя двигателя РН оказывает негативное воздействие на сооружения стартового комплекса. Это воздействие может быть снижено за счет увода струи в радиальном направлении от точки старта по заранее заданной программе управления.

Целью исследования является разработка оптимального регулятора СУ РН на этапе увода, обеспечивающего реализацию программы увода.

Предлагается модифицированный вариант решения задачи аналитического конструирования регуляторов А. М. Летова. Особенностью постановки задачи является то, что вектор выхода системы зависит и от вектора состояния РН, и от управляющей переменной, и качество управления в задаче оценивается с использованием квадратичного терминально-интегрального критерия. Такой вид критерия позволяет с заданной точностью отслеживать требуемую программу изменения следа газодинамической струи РН на стартовой плоскости и обеспечить заданное положение РН в конце этапа увода.

Задача решается с использованием линеаризованных уравнений движения РН. Результаты моделирования движения РН подтверждают работоспособность и эффективность разработанного оптимального регулятора системы управления РН. Расчеты показывают, что движение РН на этапе увода близко к вертикальному, угол отклонения сопла двигателя находится в допустимом диапазоне и величина рассогласования текущего положения следа струи с заданным программным не превышает 0,5 метра.

Ключевые слова: ракета-носитель, сооружения стартового комплекса, газодинамическая струя, этап увода, оптимальный регулятор, квадратичный критерий.

Introduction. At the initial stage of the launch vehicle (LV) flight at altitudes between 200–300 meters one of the flight control system's tasks is to displace the launch vehicle's jet engine flame from the launch complex (LC). This process is of great importance as the jet engine flame has a negative impact on the LC [1].

There are several methods to reduce negative thermal effect on LC. Some of them are:

1. Methods of "passive" protection: to use heatproof materials in the constructions of the LC or to use additional measures such as foam or water to cool the launching complex elements [2; 3].

2. To use some modified algorithms of a LV flight control to displace LV jet flame in specially organized direction and so on.

For example, at the LV of ground start "ZENIT" to cool jet engine flame and to protect LC facilities water is used [2]. While at the LV of sea launch "ZENIT-3SL" the technology of jet flame deviation to certain direction by means of modified algorithms of the LV flight control is used [4–6].

Two approaches can be proposed to perform controlled displacement of a LV trajectory using the vehicle flight control system (CS):

1. Using pre-calculated motion program of a LV flight at the displacement phase (DP) taking into account initial and terminal (boundary) states of the vehicle and the subsequent executing of this program with use of the CS of the vehicle.

2. Solving the synthesis problem of flight control taking into account the current and required terminal LV states.

In this paper we consider the second approach – synthesis of the LV fligth control algorithm. Solving the problem of jet engine flame displacement, the position of flame trace on the launch pad is one of output parameters of the LV flight control system.

To implement the controlled DP of the LV flight, the program of flame flow location on the launch pad in the direction of displacement $l_p(h)$ as a function the LV altitude h has to be preliminarily calculated. This program is fulfilled by the LV CS with flight control algorithm (regulator), specially developed for this phase of the LV flight.

In each time of DP the jet engine flame trace must be located inside a circular area of a certain size. The center of the area must be located on the line specifying the direction of the displacement. Size of the area has to be calculated in advance as a function of time for every particular LV and LC. Any high-rise structures should not be located in the direction of displacement.

Generally the model of LV motion at the initial phase of LV flight is described by nonlinear equations. But while solving the problem of LV jet flame displacement from launching complex constructions this model can be replaced by linearized equations with time variant parameters.

The problem of finding the optimal control of the system described by linear equations can be solved using the method of analytical construction of regulators (ACOR). The first scientific papers on this theme belong to A. M. Letov, published in 1960-s [7; 8]. In foreign publications this method is known as the tracking task method.

The aim of this work is to develop the method of construction of optimal regulator of a LV control system for the DP that provides the executing the program of jet flame trace displacement.

The problem is solved for linear equations describing the launch vehicle motion in the direction of displacement. The new modification of the ACOR method is proposed. The modified version of the method allows finding the solution of the problem when the system output is dependent explicitly on input variable.

Statement of the problem. While starting the LV nearest facility of the LC is the cable-filling tower. In order to prevent the LV collision with the tower the program of jet flame trace displacement on the launch pad as a function of trajectory altitude is used (fig. 1).

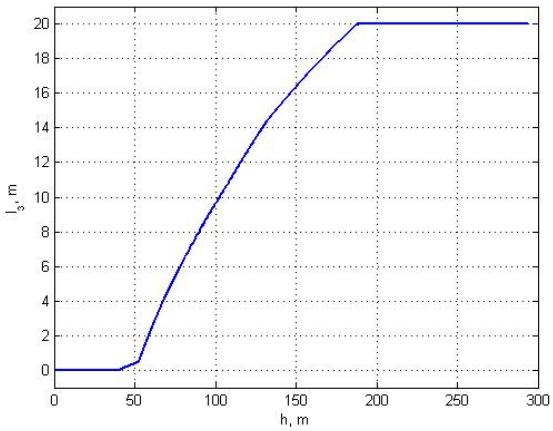


Fig. 1. Preset program changes the LV jet flame trace location as a function of flight altitude

Рис. 1. Заданная программа изменения положения следа оси ГД струи РН в зависимости от высоты полета

Double-stage character of this program is stipulated with the fact that after the lift-off the LV should move vertically to avoid hitting the cable-filling tower, then softly move in the direction of displacement on preset distance from starting point not setting engine plume close to the tower.

The control variable in the jet engine flame displacement problem is the engine nozzle deviation angle δ.

The task is to develop an optimal LV motion control law taking into account LV parameters and preset program of jet flame trace location at the launch pad, to choose the structure and gains of the LV CS regulator for executing the preset program of the jet flame trace displacement.

Efficiency of control is evaluated by quadratic terminal integral criteria. The terminal part of criteria is used to provide preset final angular state of the LV at the end of DP – vertical orientation and zero rate of LV. This requirement is caused by the fact that after completing the DP, the LV must continue its motion according to the regular pitch program. The integral part is some kind of a "penalty" for deviation of current output parameter l_p from its preset program value l_3 [10].

The model of LV motion at the phase of controlled displacement. Parameters describing motion of the LV in the displacement plane are depicted in fig. 2.

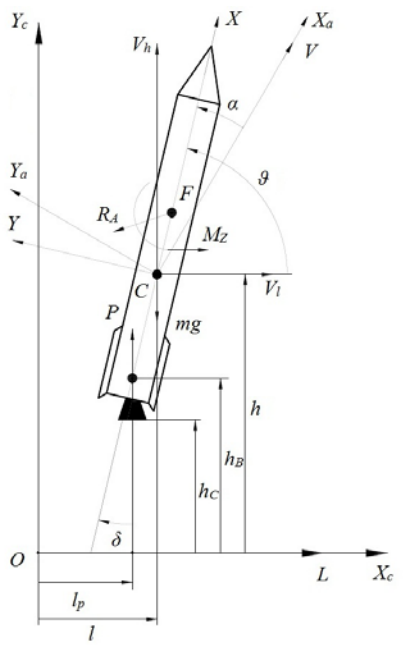


Fig. 2. Parameters of LV motion at the displacement phase in the starting frame

Рис. 2. Параметры движения РН на этапе увода в стартовой системе координат

Fig. 2 shows the main parameters of LV motion [11]: OL is the LV jet flame displacement direction, R_A is the main vector of external forces, acting on LV, C is LV center of mass, F is LV pressure center.

Assumption:

1) LV motion is performed in the plane of displacement maneuver;
2) LV is considered as a solid body;
3) the Earth gravitational field is homogeneous;
4) the Earth is plain and nonrotating;
5) atmospheric density during the DP is constant, wind disturbances are not considered;
6) LV mass and inertia moments during the DP are constant;
7) LV aerodynamic characteristics are: C_x = const, $C_y = C_Y^\alpha \alpha$, C_d = const , where α – angle of attack; C_x – aerodynamic drag force coefficient; C_y – aerodynamic normal force coefficient; C_Y^α – derivative of aerodynamic normal force coefficient; C_d – coefficient of pressure center;
8) LV engine thrust during the DP is constant;
9) the dynamics of engine thrust vector control actuator is neglected.

LV motion equation. Several reference frames are used in the article for description of LV motion (fig. 2): the starting frame $OX_CY_CZ_C$, the body frame $CXYZ$, the flow frame $CX_aY_aZ_a$ [12]. The beginning O of starting frame is located in the crossing point of LV longitudinal axis, when LV is located on the launch pad (LP), with horizontal plane on zero level of launch pad. Axis OZ_C form the right-handed frame $OX_CY_CZ_C$.

With enumerated assumptions the LV motion in the displacement maneuver plane is described by the following differential equations:

$$\begin{gathered}\dot{V}_h = \left(P\ \sin\ (\vartheta + \delta) - mg - X_a \sin\vartheta + Y_a \cos\vartheta\right)/m,\\ \dot{V}_l = \left(P\cos\ (\vartheta+\delta) - Y_a \sin\vartheta - X_a \cos\vartheta\right)/m,\\ \dot{\omega} = \left(-P\sin\delta\ (x_T - x_B) + Y_a(x_d - x_T)\right)/I,\\ \dot{l} = V_l,\\ \dot{h} = V_h,\\ \dot{\vartheta} = \omega,\end{gathered} \tag{1}$$

where m – LV mass; I – moment of inertia relative to lateral axis; V_h и V_l – projections of velocity $V = \sqrt{V_h^2 + V_l^2}$ on flow axes h and l; P – engine thrust; ϑ – pitch angle; $\theta = \mathrm{arctg}\left(V_h/V_l\right)$ – trajectory inclination angle; $X_a = C_X S\rho V^2/2$ – aerodynamic longitudinal force; $Y_a = C_Y^\alpha \alpha\ S\rho V^2/2$ – aerodynamic normal force, $\alpha = \vartheta - \theta$; h – LV center of mass (COG) flight altitude; l – distance from starting point to LV COG projection on the launch pad plane; ω – angular rate of LV relative to lateral axis; x_T – distance from nozzle edge plane of sustainer engine to COG; x_B – distance from nozzle edge plane to center of deviation of sustainer engine chamber; x_d – distance from nozzle edge plane of sustainer engine to LV pressure center: $x_d = L(1 - C_d)$; L – characteristic length; S – characteristic area; ρ – atmospheric density; δ – angle of deviation of sustainer engine chamber; g – gravitational acceleration.

Simplifying and linearization of LV motion model. Considering values δ, α, $\Delta\vartheta = \vartheta - \pi/2$, $\Delta\theta = \theta - \pi/2$ small, we will get:

$$\sin\vartheta \approx 1,\ \cos\vartheta \approx -\Delta\vartheta,\ \sin\delta \approx \delta,\ \cos\delta \approx 1,\ \sin\ (\vartheta+\delta) \approx 1,$$
$$\cos\ (\vartheta+\delta) \approx -\Delta\vartheta - \delta,\ V_h = V\sin\theta \approx V,$$
$$V_l = V\cos\theta \approx -V\Delta\theta.$$

With these assumptions the system (1) transformed to the following two systems:

$$\begin{gathered}\dot{V} = \left(P - mg - C_X S\rho V^2/2\right)/m,\\ \dot{h} = V.\end{gathered} \tag{2}$$

$$\dot{V}_l = \left(-P\Delta\vartheta - P\delta - C_Y^\alpha S\rho V^2\alpha/2 + C_X S\rho V^2\Delta\vartheta/2\right)/m,$$
$$\dot{l} = V_l,$$
$$\dot{\omega} = \left(-P\delta(x_T - x_B) + C_Y^\alpha \alpha S(x_d - x_T)\rho V^2/2\right)/I, \quad (3)$$
$$\Delta\dot{\vartheta} = \omega,$$

where $\alpha = \Delta\vartheta - \Delta\theta$, $\Delta\theta = -V_l/V$.

The system (3) can be rewritten in the following form:

$$\dot{V}_l = \frac{(C_X - C_Y^\alpha)S\rho V^2 - 2P}{2m}\Delta\vartheta - \frac{C_Y^\alpha S\rho V}{2m}V_l - \frac{P}{m}\delta,$$
$$\dot{l} = V_l,$$
$$\dot{\omega} = \frac{C_Y^\alpha (x_d - x_T)S\rho V^2}{2I}\Delta\vartheta + \quad (4)$$
$$+ \frac{C_Y^\alpha (x_d - x_T)S\rho V}{2I}V_l - \frac{P(x_T - x_B)}{I}\delta, \ \Delta\dot{\vartheta} = \omega.$$

System (2) is independent from the system (4). It can be integrated with initial conditions: $V(0) = 0$ and $h(0) = h_0 = x_T$ to get explicit expressions for V and h as functions of time.

Several transformations of the first equation in the system (2) give the following results:

$$\frac{m}{P - mg}\dot{V} = 1 - \frac{C_x\rho S}{2(P - mg)}V^2;$$
$$a = \frac{m}{P - mg}, \quad b = \frac{C_x\rho S}{2(P - mg)};$$
$$a\dot{V} = 1 - bV^2, \ \Rightarrow \int\frac{adV}{1 - bV^2} = \int dt, \ \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \frac{a}{2\sqrt{b}}\ln\frac{1 + \sqrt{b}\ V}{1 - \sqrt{b}\ V} = t + C.$$

As $V(0) = 0$, so $C = 0$ and

$$V(t) = \frac{1}{\sqrt{b}}th\frac{\sqrt{b}}{a}t;$$
$$h(t) = h_0 + \int Vdt = h_0 + \frac{a}{b}\ln ch\frac{\sqrt{b}}{a}t. \quad (5)$$

One of system's output parameter is the coordinate of jet flow trace l_p along axis OL.

Coordinates sustainer chamber center of deviations on the on the starting frame axes are described as follows:

$$l_{\text{ЦК}} = l - (x_T - x_B)\cos\vartheta,$$
$$h_{\text{ЦК}} = h - (x_T - x_B)\sin\vartheta.$$

Equation of the straight-line $H = H(L)$, that goes through the sustainer chamber center of deviations and is parallel to thrust vector:

$$H - h_{\text{ЦК}} = (L - l_{\text{ЦК}})\text{tg}\,(\vartheta + \delta).$$

Coordinate of jet flame trace on the starting plane can be evaluated with $H = 0$:

$$l_p = l_{\text{ЦК}} - h_{\text{ЦК}}\text{ctg}\,(\vartheta + \delta),$$

so

$$l_p = l - (x_T - x_B)\cos\vartheta -$$
$$- (h - (x_T - x_B)\sin\vartheta)\ \text{ctg}\ (\vartheta + \delta).$$

At small angles δ and $\Delta\vartheta = \vartheta - \frac{\pi}{2}$

$$l_p = l + h(\Delta\vartheta + \delta) - (x_T - x_B)\ \delta. \quad (6)$$

So the final formula for calculation of output l_p is:

$$l_p = l + h\Delta\vartheta + h_B\delta, \quad (7)$$

where h is the known function of time (5); $h_B = h - x_T + x_B$ – altitude of sustainer engine chamber center of deviation above the starting plane.

Preset coordinate of LV jet flow trace on the starting plane is denoted as $l_3(h_c)$, where h_c – altitude of nozzle edge plane of the sustainer engine above the starting plane.

$$h_c = h - x_T. \quad (8)$$

Formulas (5), (8) and $l_3(h_c)$ can be used to recalculate the preset coordinate of LV jet flame trace along x axis as a function of flight time.

Motion equation of LV in vector-matrix form. System (4) can be written in normal Cauchy form:

$$\frac{d}{dt}x(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t), \quad (9)$$

where $x = \begin{bmatrix} V_l & \omega & l & \Delta\vartheta \end{bmatrix}^T$ is state vector;

$A = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & a_{14} \\ a_{21} & 0 & 0 & a_{24} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ – dynamic matrix with elements:

$$a_{11} = -C_Y^\alpha\ S\rho V/2m,\ a_{14} = \left[\left(C_X - C_Y^\alpha\right)S\ \rho V^2 - 2P\right]/2m,$$
$$a_{21} = C_Y^\alpha(x_d - x_T)S\rho V/2I,\ a_{24} = C_Y^\alpha\left(x_d - x_T\right)S\rho V^2/2I;$$

$B = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$ – vector with elements:

$$b_1 = -P/m,\ b_2 = -P(x_T - x_B)/I;$$

$u = [\delta]$ – control variable.

The system output vector is described by the algebraic equation:

$$y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t), \quad (10)$$

where $y = \begin{bmatrix} V_l & \omega & l_p & \Delta\vartheta \end{bmatrix}^T$ – vector of output parameters;

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & h_B & 0 \end{bmatrix}^T.$$

Preset vector of output parameters is $z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & l_з & 0 \end{bmatrix}^T$.

Method of analytical construction of regulators (ACOR). Let's consider linear time variable observable and controllable dynamic system (9); (10) with the initial conditions $x(t_0) = x_0$ [9; 13]. In this system $x(t)$ – n-dimensional state vector, $u(t)$ – r-dimensional vector of

control variables, $y(t)$ – m-dimensional vector of outputs, $z(t)$ – m-dimensional vector of demanded outputs.

Vector equation of tracking error at the time t is calculated as follows:

$$e(t) = y(t) - z(t).$$

It is necessary to find the control minimizing the criteria:

$$J(e,u) = \frac{1}{2} e^T(t_к) F e(t_к) + \\ + \frac{1}{2}\int_{t_0}^{t_к} \left(e^T(t) Q(t) e(t) + u^T(t) R(t) u(t) \right) dt. \quad (11)$$

In (11) F, R, Q – preset "weight" matrices, control variables $u(t)$ are not constrained, t_k – preset final time.

It is shown [9; 13], that the solution of the problem if $D = 0$ gives to the optimal control law in the form:

$$u(t) = R^{-1}(t) B^T(t) \left[g(t) - K(t) x(t) \right],$$

where $K(t)$ is n-dimensional quadratic symmetric positive definite matrix, that obey to the matrix differential Riccatti equation:

$$\frac{dK(t)}{dt} = K(t) B(t) R^{-1}(t) B^T(t) K(t) - \\ - K(t) A(t) - A^T(t) K(t) - C^T(t) Q(t) C(t)$$

with terminal condition:

$$K(t_k) = C^T(t_k) F C(t_k);$$

$g(t)$ is n-dimensional column vector that is solution of linear vector differential equation

$$\frac{dg(t)}{dt} = \left[K(t) B(t) R^{-1}(t) B^T - A^T(t) \right] g(t) - C^T(t) Q(t) z(t)$$

with terminal condition:

$$g(t_k) = C^T(t_k) F z(t_k).$$

But such statement of the problem is not general. In the technical task considered in this article, output vector y depends both on state vector x and input variable $u \equiv l_3$.

To find the solution in the such case the ACOR problem has to be reformulated in the following more general form: to find the optimal control law u^* of linear dynamic system (9), (10) with $D(t)u(t)$ term, that minimizes criteria (11). The solution in this case we will call as solution of the modified ACOR problem.

Solution of modified ACOR problem. According to the Pontryagin's principle of maximum the optimal control of linear system (9), (10) must minimize Hamiltonian [14]:

$$H(p,x,u,t) = \frac{1}{2}(z - Cx - Du)^T \times \\ \times Q(z - Cx - Du) + u^T R u + p^T A x + p^T B u,$$

where vector-function $p(t)$ satisfies the vector equation

$$\frac{dp^T}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x},$$

or

$$\frac{dp}{dt} = C^T Q(z - Cx - Du) - A^T p. \quad (12)$$

Control u^* minimizing H can be fined from the necessary optimality condition:

$$\frac{\partial H}{\partial u} = x^T C^T Q D - z^T Q D + u^T \left(R + D^T Q D \right) + p^T B = 0.$$

Solving this equation we get

$$u^* = \left(R + D^T Q D \right)^{-1} \left(D^T Q z - D^T Q C x - B^T p \right). \quad (13)$$

Inserting (13) into (9) и (12) results in the following equations

$$\frac{dx}{dt} = Lx - Mp + Nz, \quad (14)$$

$$\frac{dp}{dt} = -Ux - L^T p + Wz, \quad (15)$$

where $L = A - B\left(R + D^T Q D \right)^{-1} D^T Q C$;

$$M = B\left(R + D^T Q D \right)^{-1} B^T;$$

$$N = B\left(R + D^T Q D \right)^{-1} D^T Q;$$

$$U = C^T Q C - C^T Q D \left(R + D^T Q D \right)^{-1} D^T Q C;$$

$$W = C^T Q - C^T Q D \left(R + D^T Q D \right)^{-1} D^T Q;$$

$\left[R(t) + D^T(t) Q(t) D(t) \right]$ – positively defined symmetric matrix.

The (14) and (15) jointly form nonhomogeneous linear system of differential equations with variables x, p. The solution of this system should satisfy boundary conditions

$$x(t_0) = x_0,$$

$$p(t_к) = C^T(t_к) F C(t_к) x(t_к) - C^T(t_к) F z(t_к). \quad (16)$$

Let's represent the vector–function p in the form

$$p = K(t)x - g(t), \quad (17)$$

where $K(t)$ is square matrix of $n \times n$ size; $g(t)$ – n-dimensional vector.

Make equation for determining $K(t)$ and $g(t)$. For this we differentiate both its parts of (17) by time

$$\frac{dp}{dt} = \frac{dK}{dt} x + K \frac{dx}{dt} - \frac{dg}{dt}.$$

Taking into account (14), (15) and (17)

$$-Vx - L^T \left(Kx - g \right) + Wz = \frac{dK}{dt} x + \\ + KLx - KM\left(Kx - g \right) + KNz - \frac{dg}{dt}. \quad (18)$$

By making coefficients of terms with x equal to free terms in both parts of (18), we get the equations

$$\frac{dK}{dt} = -L^T K - KL + KMK - U, \quad (19)$$

$$\frac{dg}{dt} = \left(KM - L^T \right) g + \left(KN - W \right) z. \quad (20)$$

From the boundary condition (16) and formulae (17) follows that matrix $K(t)$ and vector $g(t)$ satisfy terminal conditions:

$$K(t_k) = C^T(t_k)FC(t_k),\quad g(t_k) = C^T(t_k)Fz(t_k). \tag{21}$$

Resulting optimal control u^* as function of state vector x is described by the following expression

$$u^* = \left(R + D^T QD\right)^{-1}\left(B^T g + D^T Qz - \left(B^T K + D^T QC\right)x\right). \tag{22}$$

When $D(t) = 0$, the equations (19), (20) and (22) coincide with the known equations [9; 13]:

$$\frac{dK}{dt} = -A^T K - KA + KBR^{-1}B^T K - C^T QC,$$

$$K(t_k) = C^T(t_k)FC(t_k),$$

$$\frac{dg}{dt} = \left(KBR^{-1}B^T - A^T\right)g - C^T Qz,$$

$$g(t_k) = C^T(t_k)Fz(t_k),$$

$$u^* = R^{-1}\left(B^T g - B^T Kx\right).$$

So, the solving of modified problem ACOR for the linear non-stationary dynamic system (9), (10) let to get the optimal control u^* (22) with criteria (11).

Numerical solution of the problem. Consider hypothetic LV moving at altitudes from 0 to 300 meters. Given data are the following parameters of the LV: m, P, I, C_x, C_y^{α}, C_d, x_m, x_B, L, S, x_d.

Vertical velocity and altitude of the LV are calculated by (5). The "weight" matrixes F, R, Q (11) have the following forms:

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & f_{44} \end{bmatrix},\quad Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},\quad R = [r].$$

If to state that $u(t_k) = 0$ as state vector x at the end of the displacement phase doesn't affect on the solution, so the criteria (11) has the following scalar form:

$$J = \frac{1}{2}\left(f_{11}V_l^2(t_k) + f_{22}\omega_l^2(t_k) + f_{33}\left(l_p(t_k) - l_Ç(t_k)\right)\right)^2 + \\ + f_{44}\Delta\vartheta^2(t_k) + \frac{1}{2}\int_0^{t_K}\left(q_{33}\left(l_p(t) - l_Ç(t)\right)^2 + r\delta^2(t)\right)dt. \tag{23}$$

In general case "weight" matrixes F, R, Q are unknown and have to be found heuristically. At this technical example elements of "weight" matrixes in criteria (23) were chosen as follows:

$$f_{11} = 0.01\ (\text{с}^2/\text{м}^2),\ f_{22} = 5\ (\text{с}^2),\ f_{33} = 0.05\ (1/\text{м}^2),$$
$$f_{44} = 10,\ q_{33} = 0.02\ (1/\text{м}^2),\ r = 6.$$

It should be pointed out that "weight" coefficient r is the parameter characterizing the "expenditure" of rudder. In the considered task this parameter is the measure of sustainer engine chamber deviation. Consequently at low values of parameter r the deviation angle rises. "Weight" coefficient q_{33} can be interpreted as a "penalty" for deviation of the LV current jet flame trace from preset program value.

If to put (19), (20) with boundary conditions (21) в (22) we get the optimal control in the example task:

$$u^* = K_V V_l + K_\omega\omega + K_l l + K_\vartheta\Delta\vartheta + u_3. \tag{24}$$

Here the terms of (22) and (23) can be compared in the following way:

$$\left[K_{Vl}\quad K_\omega\quad K_l\quad K_{\Delta\vartheta}\right]^T = \\ = -\left(R + D^T(t)QD(t)\right)^{-1}\left(B^T K(t) + D^T(t)QC(t)\right), \tag{25}$$
$$u_Ç = \left(R + D^T(t)QD(t)\right)^{-1}\left(B^T g(t) + D^T(t)Qz(t)\right).$$

In example task the input variable u is nozzle deviation angle of the LV sustain engine δ, which is the function of flight time. The preset program $\delta_3(t)$ is calculated together with the preset pitch angle program calculation: $\delta_3 = -K_{\Delta\vartheta}\Delta\vartheta_Ç$. So optimal program (24) can be rewritten in the following form:

$$\delta(t) = K_{Vl}(t)V_l + K_\omega(t)\omega + K_l(t)l + K_{\Delta\vartheta}(t)\left(\Delta\vartheta - \Delta\vartheta_Ç\right). \tag{26}$$

The first stage of the example task numerical solution is calculation of regulator coefficients by integrating of (19) and (20) in reverse time with boundary conditions (21). The input known data are the elements of matrix $C(t_k)$ and vector $z(t_k)$.

The second stage is simulation of LV CS with regulator coefficients K_v, K_ω, K_l, $K_{\Delta\vartheta}$ calculated in advance.

Several results of numerical solution of the problem are presented below by plots of the LV motion parameters on displacement phase as functions of vehicle flight time (fig. 3–6).

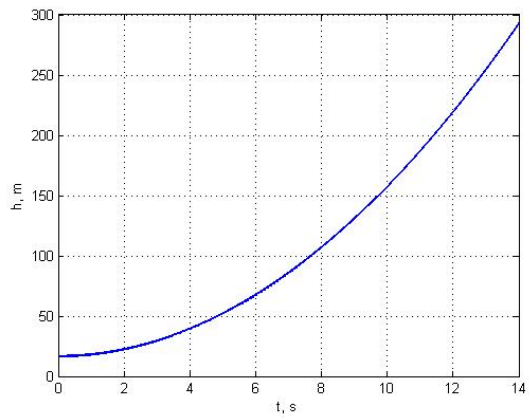


Fig. 3. LV altitude of flight $h(t)$

Рис. 3. Высоты полета ЦМ РН

Fig. 7 demonstrates the LV CS regulator coefficients. Fig. 8 shows, that sustainer engine nozzle deviation angle does not exceed 2.5 degrees. After start LV control system commands to deviate the combustion chamber and to hold the current position of LV jet flame on the preset trajectory on starting plane. At 20–30 meters altitude there is some deviation of executed location of LV jet flame from preset location because LV CS provides conditions for further pitch program executing.

Fig. 9 presents the executed and preset positions of LV jet flame trace on the starting plane.

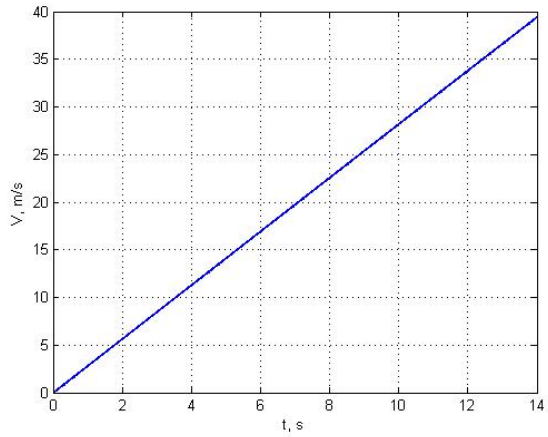


Fig. 4. LV velocity of flight $V(t)$

Рис. 4. Скорость ЦМ РН

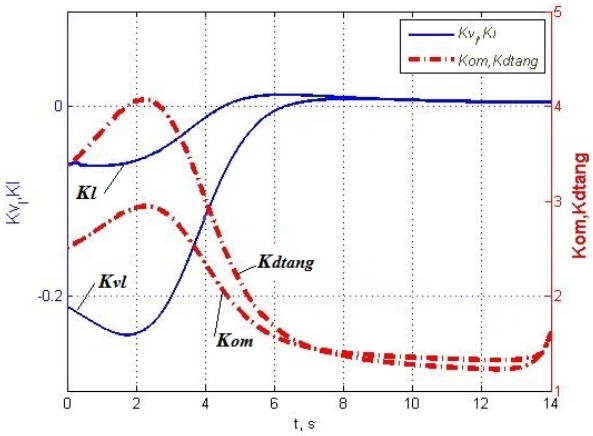


Fig. 7. LV CS regulator coefficients

Рис. 7. Коэффициенты регулятора СУ РН

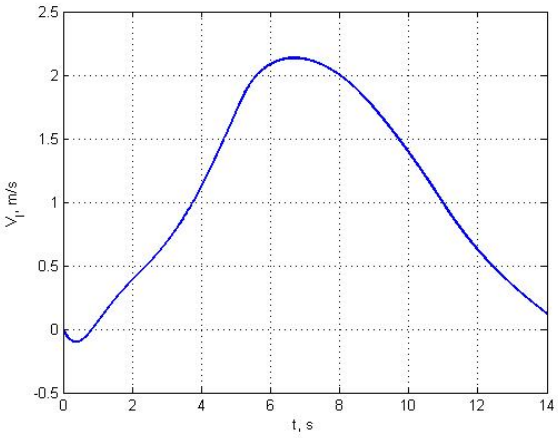


Fig. 5. LV horizontal speed $V_l\,(t)$

Рис. 5. Горизонтальная скорость ЦМ РН

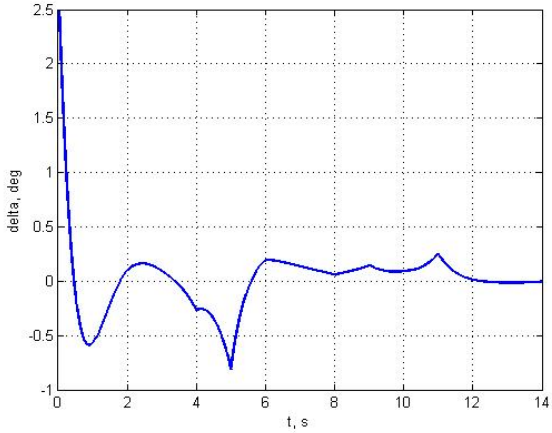


Fig. 8. LV sustainer engine nozzle deviation angle $\delta(t)$

Рис. 8. Угол отклонения сопла МД РН

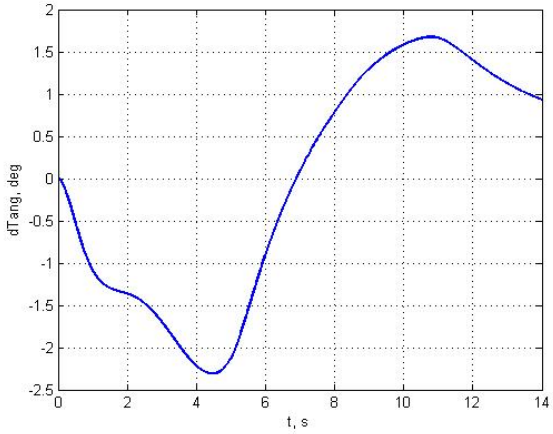


Fig. 6. Increments of LV pitch angle $\vartheta(t)$

Рис. 6. Приращение угла тангажа РН

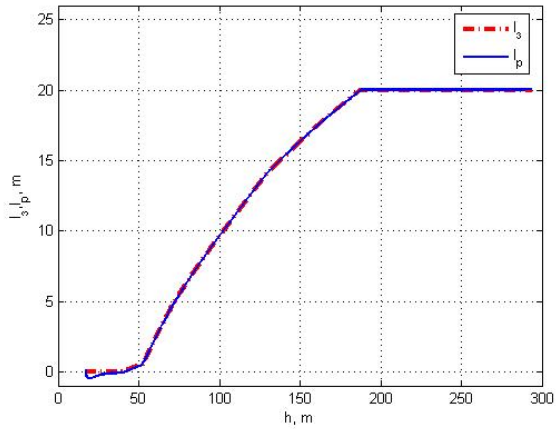


Fig. 9. Preset and executed positions of LV jet flame trace on the starting plane

Рис. 9. Заданное и текущее положения следов струи РН на стартовой плоскости

Fig. 10 show that tracking error does not exceed 0.5 meter. It proves the efficiency of developed algorithms for LV controlled motion displace jet flame from starting complex facilities with tolerated accuracy.

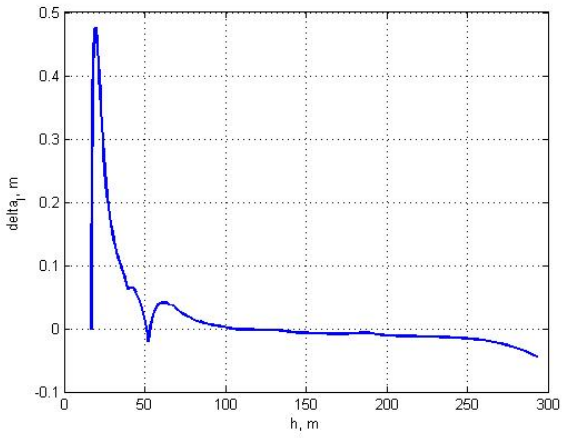


Fig. 10. The difference between preset and executed positions of LV jet flame trace on the starting plane

Рис. 10. Величина рассогласования между заданным и текущим положениями следов струи РН на стартовой плоскости

Conclusion. Having solved problem ACOR for the system (9), (10) with quadratic terminal integral criteria (11), the optimal control of linear nonstationary dynamic system was developed. Dependency of system output vector on input variable was taken into account in optimal control algorithm (22). The solution is valid for the task of displacement of LV jet flame from the starting complex facilities during the preset displacement program execution. It is demonstrated that the optimal regulator (26) and the calculated coefficients (25) satisfy the specified LV CS requirements. It means that the deviations of executed positions of LV jet flame from preset ones does not exceed 0.5 meter. The CS at the end of the displacement maneuver is holding the LV trajectory close to vertical. The value of sustainer engine chamber deviations do not exceed permissible limits and stays in ±2.5 degree interval.

The problem solved is worth to continue by analysis of three-dimensional path of LV and by the LV jet flame trace preset program tacking accuracy analysis taking into account horizontal wind in atmosphere as a random function of altitude using methods of statistical dynamics [15; 16].

References

1. Al'tshuler A. Sh., Volodin V. D. [Space rocket movement control in the initial flight path, taking into consideration the requirements to reduce the gas-dynamic impact of engine jets on the launching facilities]. *Aviakosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2007, No. 2, P. 3–8 (In Russ.).

2. But A. B., Gonchar A. G., Sokolova T. T. et al. [Development of effective systems of water giving in starting constructions for decrease in gasdynamic loadings]. *Kosmonavtika i raketostroenie*. 2009, No. 4, P. 11–18 (In Russ.).

3. Stromskiy I. V. *Kosmicheskie porty mira* [Space ports of the world]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1996, 113 p.

4. Degtyarev A. V., Degtyareva E. A., Novikov A. V. et al. [The results of the analysis of the dynamics of start space rocket "Zenit-3SL" with the afloat sea launch platform]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2013, No. 9, P. 25–31 (In Russ.).

5. Dyad'kin A. A. [Aerogas dynamics of the space-rocket complex "SEA LAUNCH"]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*. 2014, No. 2, P. 14–31 (In Russ.).

6. Legostaev V. P. [Start from the surface of the ocean]. *Polet*. 1999, No. 2, P. 3–14 (In Russ.).

7. Letov A. M. [Analytical design of controllers I]. *Avtomatika i telemekhanika*. 1960, No. 4, P. 436–441 (In Russ.).

8. Dmitrievskiy A. A., Lysenko L. N. *Prikladnye zadachi teorii optimal'nogo upravleniya dvizheniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov* [Application-oriented tasks of the theory of optimal control of unmanned aerial vehicles motion]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, 328 p.

9. Athans M., Falb P. Optimal Control: An Introduction to the Theory and Its Applications. New York : Dover Publications, 2006. 894 p.

10. Letov A. M. *Dinamika poleta i upravlenie* [Flight dynamics and control]. Moscow, Nauka Publ., 1969, 360 p.

11. Du W. Dynamic modeling and ascent flight control of Ares-I Crew Launch Vehicle: Dissertation of the Doctor of Philosophy. Ames : Iowa State University. 2010, 167 p. Available at: http://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2578&context=etd (accessed 16.04.2017).

12. Lebedev A. A., Chernobrovkin L. S. *Dinamika poleta bespilotnykh LA* [Flight dynamics unmanned aerial vehicles]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973, 616 p.

13. Afanas'ev V. N. *Teoriya optimal'nogo upravleniya nepreryvnymi dinamicheskimi sistemami* [Theory of optimal control of continuous dynamic systems]. Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2011, 168 p.

14. Ivanov V. A., Faldin N. V. *Teoriya optimal'nykh sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of optimal systems of automatic control]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 336 p.

15. Bobronnikov V. T., Kozorez D. A., Krasil'shchikov M. N. et al. *Statisticheskaya dinamika i optimizatsiya upravleniya letatel'nykh apparatov* [Statistical dynamics and optimization control aerial vehicle]. Moscow, Al'yans Publ., 2013, 468 p.

16. Bobronnikov V. T., Trifonov M. V. [Technique of the statistical analysis motion of 1st stage LV taking into account random wind loads]. *Vestnik MAI*. 2014, No. 1, P. 33–42 (In Russ.).

Библиографические ссылки

1. Альтшулер А. Ш., Володин В. Д. Управление движением ракеты космического назначения на начальном участке полета с учетом требований по снижению газодинамического воздействия струй двигателей на сооружения стартового комплекса // Авиакосмическая техника и технология. 2007. № 2. С. 3–8.

2. Создание эффективных систем водоподачи в стартовых сооружениях для снижения газодинамических нагрузок / А. Б. Бут [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. 2009. № 4. С. 11–18.

3. Стромский И. В. Космические порты мира. М. : Машиностроение, 1996. 113 с.

4. Результаты анализа динамики старта РКН «Зенит-3SL» с находящейся на плаву морской стартовой платформы / А. В. Дегтярев [и др.] // Авиационно-космическая техника и технология. 2013. № 9. С. 25–31.

5. Дядькин А. А. Аэрогазодинамика ракетно-космического комплекса «Морской старт» // Космическая техника и технологии. 2014. № 2. С. 14–31.

6. Легостаев В. П. Старт с поверхности океана // Полет. 1999. № 2. С. 3–14.

7. Летов А. М. Аналитическое конструирование регуляторов *I* // Автоматика и телемеханика. 1960. № 4. С. 436–441.

8. Дмитриевский А. А., Лысенко Л. Н. Прикладные задачи теории оптимального управления движением беспилотных летательных аппаратов. М. : Машиностроение, 1978. 328 с.

9. Athans M., Falb P. Optimal Control: An Introduction to the Theory and Its Applications. New York : Dover Publications, 2006. 894 p.

10. Летов А. М. Динамика полета и управление. М. : Наука, 1969. 360 с.

11. Du W. Dynamic modeling and ascent flight control of Ares-I Crew Launch Vehicle : Dissertation of the Doctor of Philosophy. Ames : Iowa State University, 2010. 167 p.

12. Лебедев А. А., Чернобровкин Л. С. Динамика полета беспилотных ЛА. М. : Машиностроение, 1973. 616 с.

13. Афанасьев В. Н. Теория оптимального управления непрерывными динамическими системами. М. : Физический факультет МГУ, 2011. 168 с.

14. Иванов В. А., Фалдин Н. В. Теория оптимальных систем автоматического управления. М. : Наука, 1981. 336 с.

15. Статистическая динамика и оптимизация управления летательных аппаратов / В. Т. Бобронников [и др.] ; под ред. М. Н. Красильщикова, В. В. Малышева. М. : Альянс, 2013. 468 с.

16. Бобронников В. Т., Трифонов М. В. Методика статистического анализа движения первой ступени ракеты-носителя с учетом случайных ветровых нагрузок // Вестник МАИ. 2014. № 1. С. 33–42.

© Altshuler A. Sh., Bobronnikov V. T., Trifonov M. V.., 2017

УДК 629.78

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 323–327

ИМИТАТОРЫ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ТЕРМОВАКУУМНЫХ ИСПЫТАНИЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Р. О. Асланян[1,2], Д. И. Анисимов[1,2], И. А. Марченко[1], В. И. Пантелеев[2]

[1]АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
[2]Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26а
E-mail: roksana_a@list.ru

Надежность космического аппарата подтверждается на этапе проведения наземной экспериментальной отработки. Следовательно, вероятность безотказной работы космического аппарата зависит от качества экспериментальной отработки. Термовакуумные испытания являются одним из главных этапов наземной отработки системы терморегулирования и космического аппарата в целом.

Целью термовакуумных испытаний является подтверждение теплового состояния аппарата и расчетных теплофизических характеристик системы терморегулирования в условиях, близких к эксплуатационным, а также подтверждение соответствия разработанной тепловой математической модели космического изделия.

Основным требованием к термовакуумным испытаниям является имитация условий штатного функционирования аппарата. При анализе результатов испытаний регистрируемые температурные параметры проверяются на соответствие с допустимыми значениями. Термовакуумные испытания проводятся на специально оборудованных испытательных комплексах, обеспечивающих имитацию внешних тепловых факторов, воздействующих на космический аппарат при орбитальном функционировании.

Одним из базовых и наиболее сложных элементов таких комплексов является имитатор солнечного излучения, имитирующий солнечное воздействие на космический аппарат при орбитальном функционировании.

Солнечные имитаторы создают поток непрерывного оптического излучения, спектральные характеристики которого должны быть близки к спектральным характеристикам солнечного излучения.

Представлен анализ некоторых существующих имитаторов солнечного излучения для выбора оптимальной базовой конструкции с целью дальнейшего совершенствования, направленного на снижение энергозатратности эксплуатации имитатора солнечного излучения для испытаний космических аппаратов и улучшения качества термовакуумных испытаний.

Описаны основные требования, предъявляемые к имитаторам солнечного излучения, наиболее соответствующие характеристикам солнечного спектра и интенсивности в космическом пространстве.

Было проведено сравнительное описание пяти образцов имитаторов солнечного излучения отечественного и зарубежного производства по четырем ключевым параметрам.

Рассмотрен вопрос о возможности создания и применения компактных трансформируемых источников теплового излучения солнечного спектра с целью повышения качества термовакуумных испытаний для космических аппаратов различных классов.

Ключевые слова: имитатор солнечного излучения, космический аппарат, тепловакуумные испытания, наземные испытания, световое пятно.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 323–327

SOLAR SIMULATORS FOR THERMAL VACUUM TESTS OF SPACECRAFT

R. O. Aslanyan[1,2], D. I. Anisimov[1,2], I. A. Marchenko[1], V. I. Panteleev[2]

[1]JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
[2]Siberian Federal University
26a, Kirenskogo Str., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation
E-mail: roksana_a@list.ru

The reliability of spacecraft is supported on the stage of the ground experimental testing. Therefore, the probability of no-failure operation of spacecraft depends on the test quality. Thermal vacuum tests are one of the main stages of the thermal control system and the spacecraft as a whole.

The purpose of thermal vacuum tests is to confirm the thermal state of the spacecraft and thermal characteristics of thermal control system in the conditions near to operational.

The main requirement for thermal vacuum tests is imitation of normal operation conditions of spacecraft. Thermal vacuum tests are carried out on special test complexes providing simulation of the external thermal factors, which influences spacecraft at orbital operation. The solar simulator is one of the basic and important elements of these complexes. The solar simulator imitates solar impact on spacecraft at orbital operation.

One of the basic and most complex elements of these complexes is a solar simulator that simulates a solar impact on the spacecraft at the orbital operation. Solar simulators provide a continuous stream of optical radiation. The spectral characteristics simulator must be close to the spectral characteristics of the solar radiation.

The purpose of this article is to analyze some solar simulators to select the best construction for further improvements aimed at reducing energy consumption exploitation of solar simulator for testing spacecraft and improve the quality of thermal vacuum testing.

We describe the basic requirements for solar simulators, the most relevant characteristics of the solar spectrum and intensity in outer space.

We made comparative description of the five solar simulators home and foreign production by four key parameters.

In this work the possibility of creation and application of the compact solar simulator is being considered. The research objective is to develop a compact solar spectrum simulator for increasing the quality of spacecraft thermal vacuum tests.

Keywords: solar simulators, spacecrafts, thermal vacuum tests, ground tests, light spot.

Введение. Одной из актуальных проблем в области освоения космического пространства является адекватное моделирование условий космического полета для испытаний космических аппаратов (КА) на Земле [1]. Важным фактором термовакуумных испытаний (ТВИ) является имитация солнечного излучения (ИСИ) [2]. Целью данной статьи является анализ некоторых существующих ИСИ для выбора оптимальной базовой конструкции с целью дальнейшего совершенствования, направленного на снижение энергозатратности эксплуатации имитатора солнечного излучения для испытаний КА и улучшения качества ТВИ. В статье рассмотрено несколько имитаторов промышленного производства с целью выявления наиболее оптимальных конструкций и схем, а также рассмотрена возможность создания и последующего применения компактных трансформируемых источников теплового излучения солнечного спектра.

Задачей исследования является сравнительный анализ вышеперечисленных параметров различных имитаторов с целью определения наиболее оптимальных их значений. В данной статье представлено сравнительное описание пяти ИСИ по четырем ключевым параметрам.

Испытания. При комплексных термовакуумных испытаниях испытываются теплофизические модели или штатные изделия с имитацией внешних тепловых условий окружающего пространства и внутренних тепловыделений приборов и оборудования КА [3]. В этом случае отрабатываются тепловые режимы как внешнего, так и внутреннего оборудования, конструкции КА, СТР [4]. Термовакуумная отработка КА и его систем терморегулирования (СТР) проводится в термобарокамерах, имитирующих условия реальной эксплуатации КА с применением специального испытательного оборудования, стендов и систем.

Проведение ТВИ возможно только в термобарокамере, имеющей в своем составе:

– систему вакуумирования;

– имитатор «черного», «холодного» космоса;

– имитатор солнечного излучения;

– источники инфракрасного излучения;

– систему обеспечения ориентации отрабатываемого КА (специальные стенды, поворотные устройства и т. п.);

– систему регистрации температурных параметров;

– систему управления тепловыми имитаторами, электрообогревателями и оборудованием КА.

Имитатор солнечного излучения предназначен для имитации прямого солнечного излучения, действующего при орбитальном функционировании на КА [5]. Имитируются следующие характеристики излучения: удельная мощность падающего теплового потока, равномерность облучения, параллельность лучей, спектральный состав по длинам волн.

Требования к ИСИ для околоземной орбиты:

– удельная тепловая мощность падающего теплового потока 1340–1440 Вт/м^2;

– равномерность облучения до ±15 %;

– непараллельность лучей до 4 угловых градусов;

– спектральный диапазон имитируемого солнечного потока, близкий к диапазону солнечного излучения (200 нм $\leq \lambda \leq$ 2000 нм) [6; 7].

ИСИ состоят из оптических систем (зеркал, линз), источников излучения (дуговых или высокочастотных ксеноновых ламп), систем управления и замера параметров. Эти элементы могут применяться в различных сочетаниях между собой, а также сочетаться с различными источниками излучения.

Общая схема имитатора солнечного излучения показана на рис. 1.

Для анализа выбраны ИСИ, применяемые в термобарокамерах АО «ИСС имени академика М. Ф. Решетнева» (г. Железногорск) и ИС-500, применяемые в испытательном центре Роскосмоса НИЦ РКП (пос. Пересвет, Московская область), LSS (Large Space Simulator), расположенный в ESTEC – центре Европейского космического агентства на побережье Северного моря в Шипхоле близ Амстердама (рис. 2.), SPF (Space Power Facility), расположенный в Исследовательском центре имени Гленна (НАСА) в Кливленде (штат Огайо, США) [8].

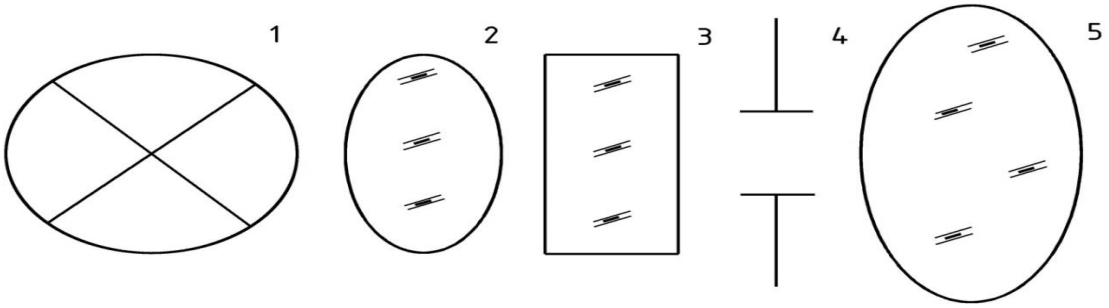


Рис. 1. Общая схема ИСИ: 1 – источник излучения; 2 – конденсатор; 3 – корректирующий светофильтр; 4 – регулируемая апертура; 5 – линза

Fig. 1. General pattern of sunlight simulation: 1 – emission source; 2 – condenser; 3 – correcting filter; 4 – adjustable aperture; 5 – lens element

ТБК-120, ГВУ-600 и ВК 600/300 – полноразмерные испытательные криокамеры, оснащенные ИСИ и предназначенные для проведения ТВИ крупногабаритных изделий.

На основе сравнения проведем анализ и выявим достоинства и недостатки каждого имитатора. В таблице приведены значения этих параметров для характеристик ИСИ.

Рассмотрим некоторые ИСИ по следующим параметрам:

1. Источник излучения – определяет спектральный диапазон ИСИ и его близость к спектру излучения Солнца. Основная часть энергии электромагнитного излучения Солнца, непосредственно влияющая на освещенность и тепловой режим КА, заключена в интервале 0,3–2,5 мкм [9; 10].

2. Площадь облучаемой поверхности – определяет возможность применения имитатора излучения для испытаний КА различного размера.

3. Неоднородность уровней плотностей падающего потока излучения – не должна превышать ±15 %, так как в условиях космоса излучение, испускаемое Солнцем, имеет высокую степень однородности потока.

4. Максимальная интенсивность солнечного излучения – удельная тепловая мощность на уровне 1340–1440 Вт/м^2.

Сравнительный анализ ИСИ. Для сравнительного анализа были выбраны следующие модели ИСИ и присвоены соответствующие номера:

ИСИ ТБК-120 – № 1;

ИСИ ГВУ-600 – № 2;

ИС-500 ВК 600/300 – № 3;

ИСИ LSS (Large Space Simulator) – № 4;

ИСИ SPF (Space Power Facility) – № 5.

В рассматриваемых имитаторах в качестве источника света используются ксеноновые лампы. В ИСИ № 1, 2, 3, 4 применяются газоразрядные ксеноновые лампы, а в ИСИ № 5 – дуговые ксеноновые лампы.

Для имитаторов солнечного излучения важны такие характеристики ксеноновых ламп, как мощность и идентичность спектрального состава излучения солнечному [11; 12]. Спектр ксеноновой лампы – приблизительно равномерный по всей области видимого света, близкий к дневному свету. Излучение чистого ксенона в процессе электрического газового разряда при сверхвысоком давлении имеет спектральное распределение с цветовой температурой около 6000 К, наиболее совпадающее с распределением солнечного излучения. При этом размеры излучающей поверхности при очень высокой яркости небольшие, что позволяет рассматривать их как точечные источники излучения и, соответственно, с большей точностью проектировать оптические системы. Но негативным моментом, если посмотреть на спектр, является отличие излучения по спектральному составу от солнечного в области длин волн 800, 1050 нм, где наблюдаются значительные выбросы энергии, более чем в два раза превышающей величину энергии излучения Солнца в этой полосе спектра [13]. В этом интервале содержится приблизительно 15 % от интегральной энергии излучения Солнца, а у ксеноновой лампы – более 30 % от общей энергии излучения.

Одним из важных параметров ИСИ является площадь облучаемой поверхности с равномерной плотностью излучения [14; 15]. Имитаторы № 3, 4 и 5 имеют наибольший размер светового пятна, что позволяет проводить испытания более крупногабаритных КА и их узлов, чем имитаторы № 1 и 2.

Критерий равномерности плотности падающего потока энергии имитатора солнечного излучения является ключевым при определении эффективной площади облучаемой поверхности, которая может быть использована для испытаний солнечных элементов и их модулей [16; 17]. Максимальную интенсивность солнечного излучения имеет ИСИ № 5.

Анализируя все вышерассмотренные параметры имитаторов в комплексе, можно сделать вывод, что все рассматриваемые ИСИ удовлетворяют предъявляемым требованиям. Имитатор № 5 имеет наибольший размер светового пятна и максимальную интенсивность солнечного излучения. Имитатор № 4 может предложить наибольшее соответствие по неоднородности уровней плотностей падающего потока излучения. Имитаторы № 1 и 2 имеют небольшую площадь светового пятна.

Наиболее оптимальной базовой конструкцией для ИСИ являются конструкции № 4 и 5, имеющие наибольшие размеры светового пятна, которые позволяют проводить ТВИ крупногабаритных КА. В качестве источника излучения рекомендуется использовать газоразрядные и дуговые ксеноновые лампы как наиболее соответствующие по спектральному составу солнечному излучению.

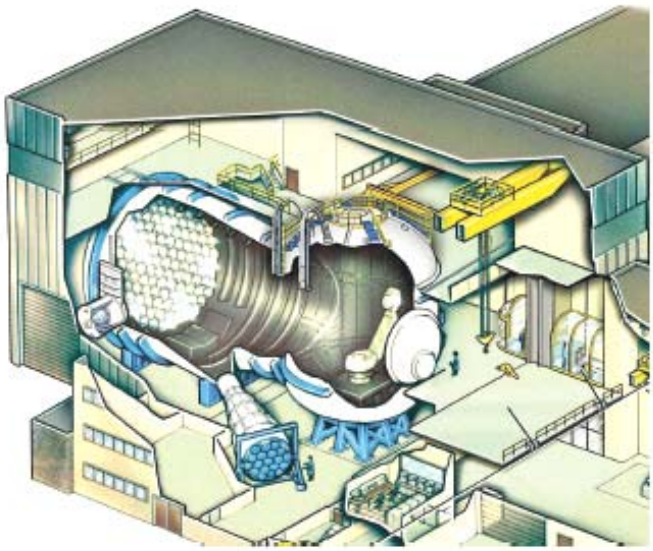


Рис. 2. Большой имитатор космического пространства Европейского космического агентства

Fig. 2. Big space simulator of European space agency

Сравнительная характеристика ИСИ

Имитатор	Источник излучения	Площадь облучаемой поверхности, м Максимальный диаметр пятна ИСИ	Неоднородность уровней плотностей падающего потока излучения, %	Максимальная интенсивность солнечного излучения
№ 1. ИСИ ТБК-120	Газоразрядные ксеноновые лампы	2×2	< 10	1600
№ 2. ИСИ ГВУ-600	Газоразрядные ксеноновые лампы	4×4	< 10	1600
№ 3. ИС-500	Газоразрядные ксеноновые лампы	3×8	< 10	1500
№ 4. ИСИ LSS	Газоразрядные ксеноновые лампы	6×5	0,5	2600
№ 5. ИСИ SPF	Дуговые ксеноновые лампы	$D = 15$	1	4200

Заключение. В статье были рассмотрены 5 образцов современных ИСИ, среди них 2 – зарубежных. Проведен анализ этих установок по 4 ключевым параметрам, сделаны выводы о достоинствах и недостатках каждого имитатора, выбрана оптимальная базовая конструкции ИСИ.

Перспективным в области термовакуумных испытаний является возможность создания и последующего применения компактных трансформируемых источников теплового излучения солнечного спектра с целью повышения качества ТВИ для КА различных классов.

Конструктивно трансформируемый источник солнечного излучения (ТИСИ) будет представлять собой набор отдельных блоков, из которых будет собираться цельный имитатор солнечного излучения, исходя из требований к термовакуумной отработке каждого конкретного КА. В состав каждого отдельного блока будут входить источники света, собирательная оптика (для фокусирования и смешения света, генерируемого источниками), устройства для когеренции света и система термостабилизации. Конструкция устройства ТИСИ будет выполнена таким образом, чтобы обеспечивать возможность проведения ТВИ в термобарокамерах, спроектированных без специально отведенного места для имитатора солнечного излучения (возможность межцехового транспортирования).

Преимуществом таких компактных источников также является и их способность подстраиваться под любые размеры и формы испытуемого изделия, что приведет к рациональному использованию термобарокамеры и её ресурсов. С помощью ТИСИ станет возможна имитация витковой засветки КА от Солнца, как при орбитальном функционировании (невозможно осуществить при помощи стационарных ИСИ). Компактные трансформируемые источники солнечного излучения позволят увеличить размеры светового пятна и, как следствие, размеры рабочего поля.

Библиографические ссылки

1. Андрейчук О. Б., Малахов Н. Н. Тепловые испытания космических аппаратов. М. : Машиностроение, 1982. 107 с.

2. Крат С. А., Филатов А. А., Христич В. В. Тепловакуумные испытания космического аппарата: опыт создания имитатора солнечного излучения на основе современных газоразрядных ламп высокого давления // Вестник СибГАУ. 2010. № 2 (28). С. 73.

3. Тельный А. А. Имитация солнечного излучения в лабораторных условиях // ОМП. 1976. № 5. С. 43–46.

4. Харитонов А. В., Макарова Е. А. Распределение энергии в спектре Солнца и солнечная постоянная. М. : Наука, 1972. 83 с.

5. Бебчук Л. Г., Богачев Ю. В., Заказнов Н. П. Прикладная оптика. М. : Машиностроение, 1988. 312 с.

6. Петров В. П. Контроль качества и испытание оптических приборов. Л. : Машиностроение, 1985. 222 с.

7. Дубиновский А. М., Панков Э. Д. Стендовые испытания и регулировка оптико-электронных приборов. Л. : Машиностроение, 1986. 152 с.

8. Подходы к созданию комплексных систем для отработки и испытания космических аппаратов / С. В. Кравченко [и др.] // Наука и инновации : инженерный журнал. 2013. № 1 (13). С. 50.

9. Крат С. А., Филатов А. А., Христич В. В. Схема суммирования световых потоков от набора газоразрядных ламп для имитатора солнечного излучения // Оптический журнал. 2011. № 11. С. 66–72.

10. Крупногабаритные имитаторы солнечного излучения для тепловакуумных испытаний негерметичных космических аппаратов / С. А. Крат [и др.] // Фотоника. 2014. №. 2. С. 12–19.

11. Колесников А. В., Сербин В. И., Моделирование условий внешнего теплообмена космических аппаратов. М. : Информация – XXI век, 1997. 170 с.

12. Крат С. А., Христич В. В. Тепловакуумная отработка КА : развитие современных тенденций // Вестник СибГАУ. 2010. №. 4 (30). С. 123–129.

13. Ланис В. А., Левина Л. Е. Техника вакуумных испытаний. М. : Госэнергоиздат, 1963. 264 с.

14. Беляков И. Т. Технология сборки и испытаний космических аппаратов. М. : Машиностроение, 1990. 133 с.

15. Цаплин С. В., Болычев С. А., Романов А. Е. Теплообмен в космосе. Самара : Самарский гос. университет, 2013. 53 с.

16. Гуревич М. М. Введение в фотометрию. М. : Энергия, 1968. 244 с.

17. Колтун М. М. Солнечные элементы. М. : Наука, 1987. 192 с.

References

1. Andreychuk O. B., Malakhov N. N. *Teplovyye ispytaniya kosmicheskikh apparatov* [Thermal testing of space vehicles]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982, 107 p.

2. Krat S. A., Filatov A. A., Khristich V. V. [Spacecraft thermal vacuum testing: an experience of creation of sunlignt simulator based on the high – pressure gas – discharge lamps]. *Vestnik SibGAU*. 2010, No. 2 (28), P. 73 (In Russ.).

3. Tel'nyy A. A. [Sunlight simulation in laboratory conditions]. *OMP*. 1976, No. 5, P. 43–46 (In Russ.).

4. Kharitonov A. V., Makarova Ye. A. *Raspredeleniye energii v spektre Solntsa i solnechnaya postoyannaya* [The energy distribution in the solar spectrum and the solar constant]. Moscow, Nauka Publ., 1972, 83 p.

5. Bebchuk L. G., Bogachyov Yu. V., Zakaznov N. P. *Prikladnaya optika* [Applied optics]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1988, 312 p.

6. Petrov V. P. *Kontrol' kachestva i ispytaniye opticheskikh priborov* [Quality control and test of optical devices]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1985, 222 p.

7. Dubinovskiy A. M., Pankov E. D. *Stendovyye ispytaniya i regulirovka optiko-elektronnykh priborov* [Bench tests and control of optical-electronic devices]. Mashinostroyeniye Publ., 1986, 152 p.

8. Kravchyenko S. V., Nyestyerov S. B., Roman'ko V. A., Tyestoyedov N. A., Khalimanovich V. I., Khristich V. V. [Approach to creating a complete system for processing and testing of spacecraft]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii.* 2013, No. 1 (13), P. 50 (In Russ.).

9. Krat S. A., Khristich V. V., Filatov A. A. [Setup for summing the light fluxes from a set of gas-discharge lamps for a solar – radiation simulator]. *Opticheskiy zhurnal.* 2011, No. 11, P. 66–72 (In Russ.).

10. Krat S. A., Khristich V. V., Sharov A. K., Shlyakhtin M. A., Filatov A. A. [Large solar radiation simulators for thermal vacuum tests on non-container spacecraft]. *Fotonika*. 2014, No. 2, P. 12–19 (In Russ.).

11. Kolyesnikov A. V., Syerbin V. I. *Modelirovaniye usloviy vneshnego teploobmena kosmicheskikh apparatov* [Modeling of external heat exchange conditions of spacecrafts]. Moscow, Informatsiya – XXI vek Publ., 1997, 170 p.

12. Krat S. A., Khristich V. V. [Thermal vacuum testing of spacecraft: the development of modern tendencies]. *Vestnik SibGAU,* 2010, No. 4(30), P. 123–129 (In Russ.).

13. Lanis V. A., Lyevina L. Ye. *Tekhnika vakuumnykh ispytaniy* [Technology of vacuum tests]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1963, 264 p.

14. Belyakov I. T. *Tekhnologiya sborki i ispytaniy kosmicheskikh apparatov* [Technology of assembly and tests of spacecrafts]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1990, 133 p.

15. Tsaplin S. V., Bolychev S. A., Romanov A. Ye. *Teploobmen v kosmose* [Heat transfer in space]. Samara, Samarskiy universitet Publ., 2013, 53 p.

16. Gurevich M. M. *Vvedeniye v fotometriyu* [Introduction to photometry]. Moscow, Energiya Publ., 1968, 244 p.

17. Koltun M. M. *Solnechnyye elementy* [Solar elements]. Moscow, Nauka Publ., 1987, 192 p.

© Асланян Р. О., Анисимов Д. И.,
Марченко И. А., Пантелеев В. И., 2017

UDC 621.454.2

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 328–337

INFLUENCE OF LAUNCH PARAMETERS OF LIQUID ROCKET ENGINE ON THE BALANCE OF AXIAL FORCES IN THE TURBOPUMP

E. N. Belayev, A. G. Vorobyev

Moscow Aviation Institute (National Research University)
4, Volokolamskoe Sh., Moscow, A-80, 125993, Russian Federation
E-mail: formula1_av@mail.ru

In the process of launching a liquid rocket engine (LRE) and on the modes of its deep throttling of thrust, the problem of balance of axial forces in the turbo-pump assembly (TPA) is the most important. The reason is the pumps and turbine work of the engine in non-nominal modes, and, consequently, the appearance of unbalanced excess of axial forces acting on the bearings of TPA. To reduce the axial loads in the TPA, an automatic discharge device (ADD) is used, the task of which is to reduce the axial impact on the bearings due to the action of hydrodynamic forces. In the process of working in the ADD, friction of the surfaces, which forms a hydraulic gap, is not allowed, otherwise it can lead to the local combustion.

The object of influence is LRE RD-120 developed by "NPO Energomash named after academician V. P. Glushko" [1], working on liquid oxygen-kerosene components, with afterburning of the oxidizing gas-generating gas scheme. The pneumatic-hydraulic scheme of the engine, the TPA design, the working principle of automatic discharge device are presented. Using the example of the LRE RD-120, the effect of axial forces acting on the angular contact ball bearing located on the side of the turbine TPA is considered.

When the engine was developed, it was established that under some launch conditions it is possible to contact surfaces in the discharge device. In the article authors identify the conditions of contact in ADD and try to study the effect of the launch parameters of the LRE on the gap size of the working surfaces in the discharge device. For the theoretical analysis of the problem, a dynamic mathematical model of a liquid rocket engine is used.

Mathematical modeling of engine start-up with nominal and early entry into operation of the combustion chamber was studied. The results show that with early starts of combustion chamber, there is a significant temperature rise in the gas generator, which can lead to the ignition of the nozzle or blades of the TPA turbine. Modeling the launch of the LRE with a change in the closing pressure of the oxidant supply valve to the pre-pump turbine booster, shows that this provides a longer operation of the oxidizer pump with a reduced hydraulic head, and allows changing the balance of axial forces during the engine launch and, as a result, prevent the full closure of the working gap in the ADD.

Keywords: liquid rocket engine, balance of axial forces, engine launch, turbo-pump assembly, automatic unloading device.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 328–337

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАПУСКА ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА БАЛАНС ОСЕВЫХ СИЛ В ТУРБОНАСОСНОМ АГРЕГАТЕ

Е. Н. Беляев, А. Г. Воробьев

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
Российская Федерация, 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4
E-mail: formula1_av@mail.ru

В процессе запуска жидкостного ракетного двигателя и на режимах его глубокого дросселирования тяги наиболее остро встает вопрос баланса осевых сил в турбонасосном агрегате (ТНА). Это связано с работой насосов и турбины двигателя на нерасчетных режимах и, как следствие, ведет к возникновению несбалансированных избыточных осевых сил, действующих на радиально-упорные подшипники ТНА. Для уменьшения осевых нагрузок в конструкции ТНА применяют автоматическое разгрузочное устройство (АРУ), задача которого уменьшить осевое воздействие на подшипники за счет действия гидродинамических сил. В процессе работы в АРУ не допускается трение поверхностей, образующих гидравлический зазор, в противном случае это может привести к местному возгоранию.

Рассмотрен ЖРД РД-120 разработки АО «НПО Энергомаш имени академика В. П. Глушко», работающий на компонентах «жидкий кислород – керосин», выполненный по схеме с дожиганием окислительного газогенераторного газа. Представлена пневмогидравлическая схема двигателя, конструкция ТНА двигателя, принцип

работы и устройство автомата разгрузки. На примере запуска ЖРД РД-120 рассмотрено действие осевых сил, действующих на радиально-упорный подшипник, расположенный со стороны турбины ТНА.

При отработке двигателя было установлено, что при определенных условиях возможен контакт поверхностей в автомате разгрузки. Целью статьи является выявление условий контакта в АРУ и исследование влияния параметров запуска ЖРД на величину зазора рабочих поверхностей в автомате разгрузки. Для теоретического анализа поставленной задачи используется динамическая математическая модель ЖРД.

Проведено математическое моделирование запуска двигателя со штатным и ранним вступлением в работу камеры сгорания (КС) путем подачи команды на открытие клапана горючего. Показано, что при раннем вступлении КС в работу наблюдается существенный температурный всплеск в газогенераторе, что может привести к возгоранию соплового аппарата или лопаток турбины ТНА. Моделирование запуска ЖРД с изменением величины давления закрытия клапана подачи окислителя на турбину БНА О показывает, что это обеспечивает более длительную работу насоса окислителя с пониженным напором и позволяет изменить баланс осевых сил в процессе запуска двигателя и, как следствие, не допустить полного закрытия рабочего зазора в АРУ.

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, баланс осевых сил, запуск двигателя, турбонасосный агрегат, автоматическое разгрузочное устройство, автомат разгрузки.

Introduction. In the process of developing new liquid rocket engines by construction departments and research organizations many problems of constructional, technological, industrial and experimental character are ought to be solved. One of them is to provide the high efficiency and safety of turbo-pump assembly operation during the working and guarantied engine's functional period. It was proved in practice that final adjustment of powerful engines is the most difficult problem of safe turbo-pump assembly operation and it is necessary to unload the angular contact bearings from axial forces acting on them.

In the process of launching a liquid rocket engine (LRE) and on the modes of its deep throttling of thrust, the problem of balance of axial forces in the turbo-pump assembly (TPA) is the most important. It is connected with the fact that on the design stage of TPA the calculations of balance of axial forces are usually done for the nominal engine operation condition. The value of axial forces in the process of launching a liquid rocket engine depends on TPA rotor angle speed; regime parameters of engine's operation that are much higher in modern LRE; values of fuel components leakage especially on the shaft from the pump cavity in the direction of turbines; principle of engine start and others. These points prove the importance and complexity of the problem of axial forces minimizing that influence angular contact bearings at the launching phase in order to enlarge their operational period.

Setting up the problem. One of the first test flight of LV Zenit failed due to improper operation of LRE second stage of RD120 (fig. 1.) During the engine launch stage in the cavity between oxidizer pump and the turbine of TPA the burning appeared. Several versions of the fire cause were suggested. One of the main causes was a possible shut of the working gap in automatic unloading device of axial forces that resulted in steel surfaces friction. The version was proved both by the fire point and data of fault detection of finishing engines. After firing test of engines and their disassembly in some of them on mating surfaces of ADD that compose the working gap of the automat were found some tarnishing that proves a short contact of working surfaces in ADD.

How to avoid the possibility of contact of mating surfaces in ADD was the main question. It was obvious that at the launching stage of RD-120 engine there was a need to change the balance of axial forces in TPA between the oxidizer-pump and the turbine. As a consequence the production time of LV Zenit could significantly change. The modifying of force diagram would require to change the construction scheme of mating oxidizer-pump and the turbine, reconstruction of TPA, conduction of hydraulic testing and on-land working out with fire testing of the engine etc. The aim was to find the solution that would exclude the contact in ADD at the launching stage of engine without reconstruction of TPA and replay mode of the engine on firing stand.

ADD construction. The construction of TPA LRE RD-120 (fig. 2) presents the oxidizer pump location, the turbine and automatic unloading device of axial forces that helps to minimize axial loads on angular contact bearing. Shaft bearings (angular contact bearing 2 and angular bearing 4) of TPA are installed in a special hub 7 and work in the oxygen flow that specially fed by the gap between the hub and the turbine starter. Oxygen fed to cool the bearings is taken at the outlet of pump pressure line O (fig. 3, 4). After cooling of angular contact bearing oxygen passes to automatic discharge device, then passing through the angular bearing comes to the disk area of impeller. From this area on specially drilled guides in the pump cover the oxygen accumulates in the collector and then by means of pipeline goes to output area of BPA O.

To reduce the axial force on angular contact bearing the automatic discharge device is used (fig. 5). Its parts are hub 1, sealed in the hub copper graphite ring 3 (inserted later) and disk 2.

Surfaces on the ring and the disk make a variable frontal working gap δ_{ADD}. The gap divides the cavities of high p_1 and low pressure p_2. With the appearing of axial force R (directed to the turbine) the rotor moves and the gap size δ_{ADD} in ADD will decrease. In this case the pressure p_1 rises as the pressure lost at transfer of fluid through the gap into ADD will rise. This increase the axial force $F_{АРУ}$ inversely directed (towards the opening of a working gap) on the discharge device and the rotor will tend to return to the base state.

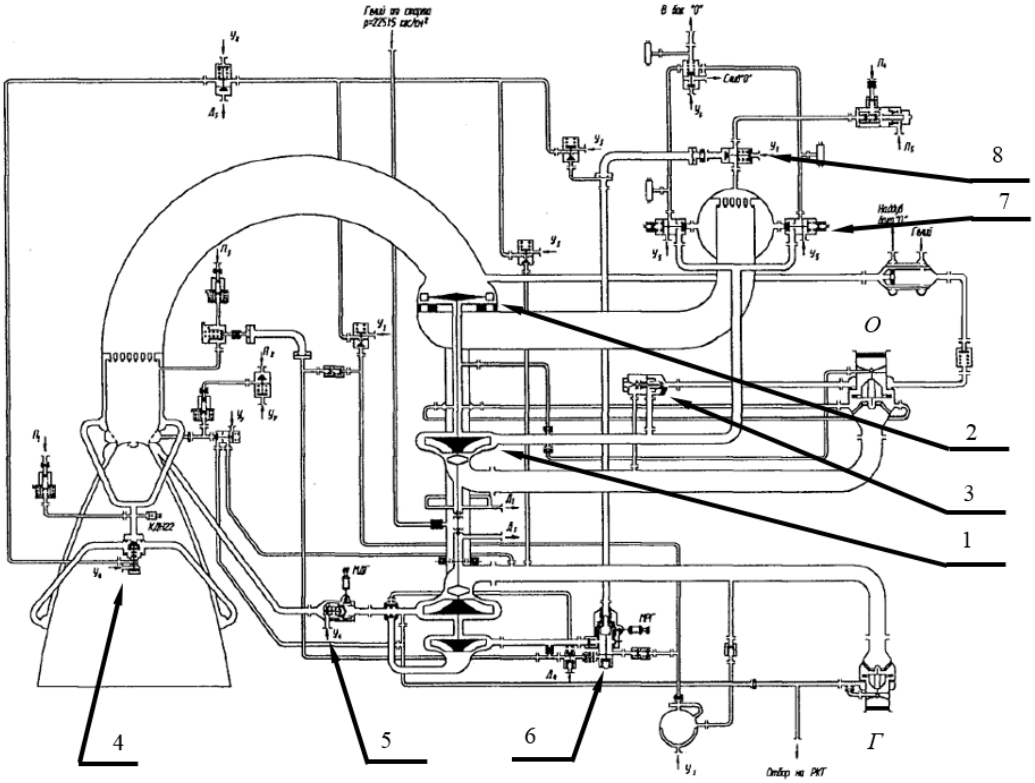


Fig. 1. Pneumatic hydraulic scheme LRE RD-120 [1–8]:
1 – oxidizer pump; 2 – TPA turbine; 3 – cut-off valve of oxidizer feed to BPA; 4 – fuel valve of CC; 5 – fuel throttle; 6 – volume regulator; 7 – supply valve oxidizer to GG; 8 – valve of fuel feed to GG

Рис. 1. Пневмогидравлическая схема ЖРД РД-120 [1–8]:
1 – насос окислителя; 2 – турбина ТНА; 3 – клапан перекрытия подачи окислителя к турбине БНА; 4 – клапан горючего КС; 5 – дроссель горючего; 6 – регулятор расхода; 7 – клапана подачи окислителя в ГГ; 8 – клапан подачи горючего в ГГ

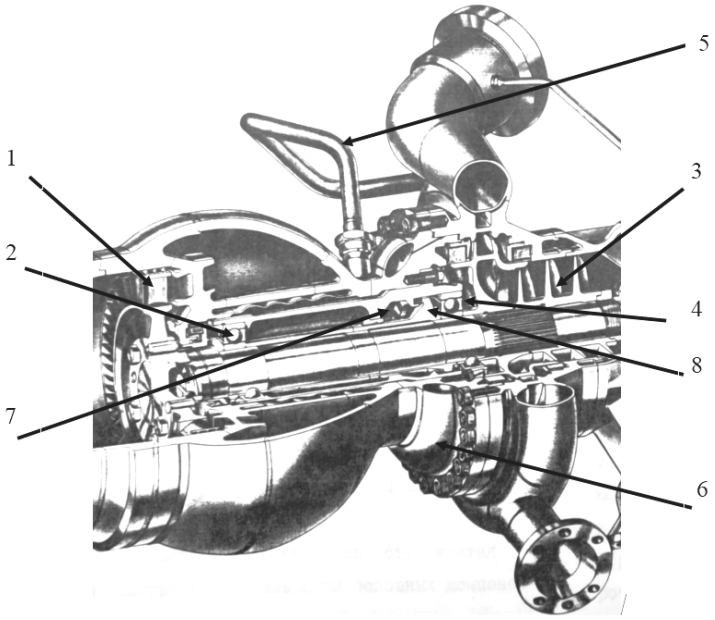


Fig. 2. The construction of TPA LRE RD-120: 1 – turbine; 2 – angular contact bearing; 3 – oxidizer pump; 4 – angular bearing; 5 – inlet of oxidizer for cooling of bearings; 6 – inlet of oxidizer after cooling of bearings; 7 – ADD hub; 8 – ADD disk

Рис. 2. Конструкция ТНА ЖРД РД-120: 1 – турбина; 2 – радиально-упорный подшипник; 3 – насос окислителя; 4 – радиальный подшипник; 5 – вход окислителя для охлаждения подшипников; 6 – выход окислителя после охлаждения подшипников; 7 – втулка АРУ; 8 – диск АРУ

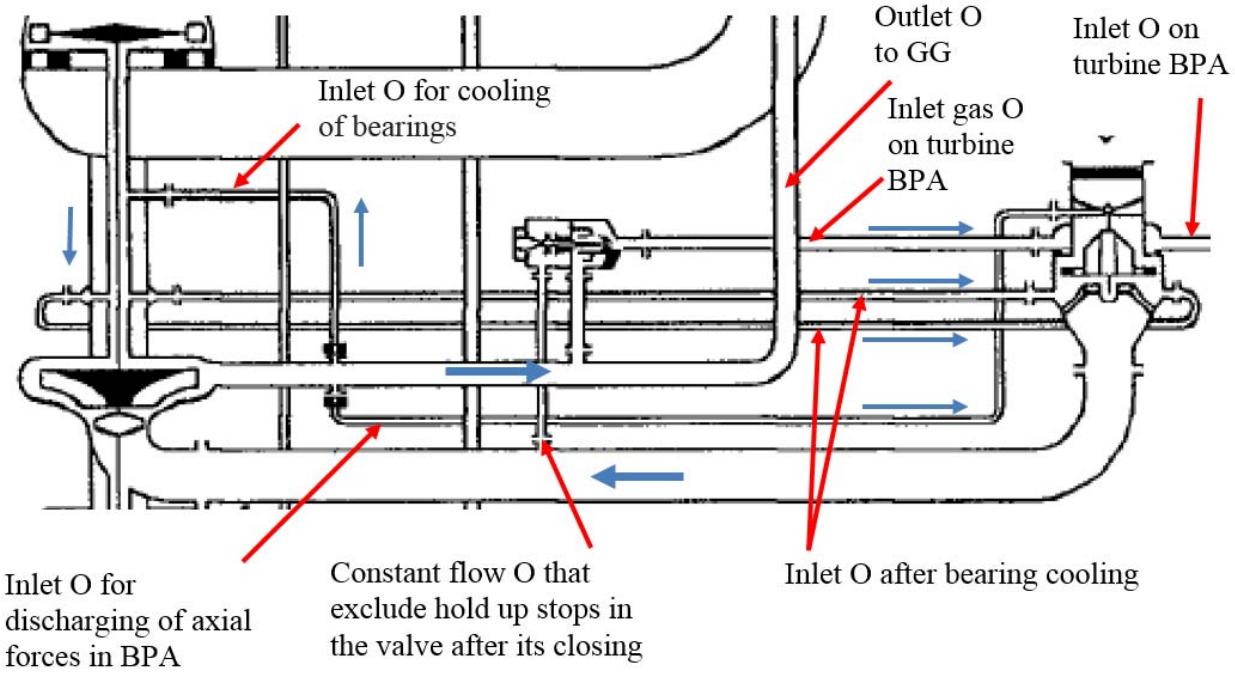


Fig. 3. The scheme of oxidizer motion on the way “pump O – BPA O”

Рис. 3. Схема движения окислителя по тракту «насос О – БНА О»

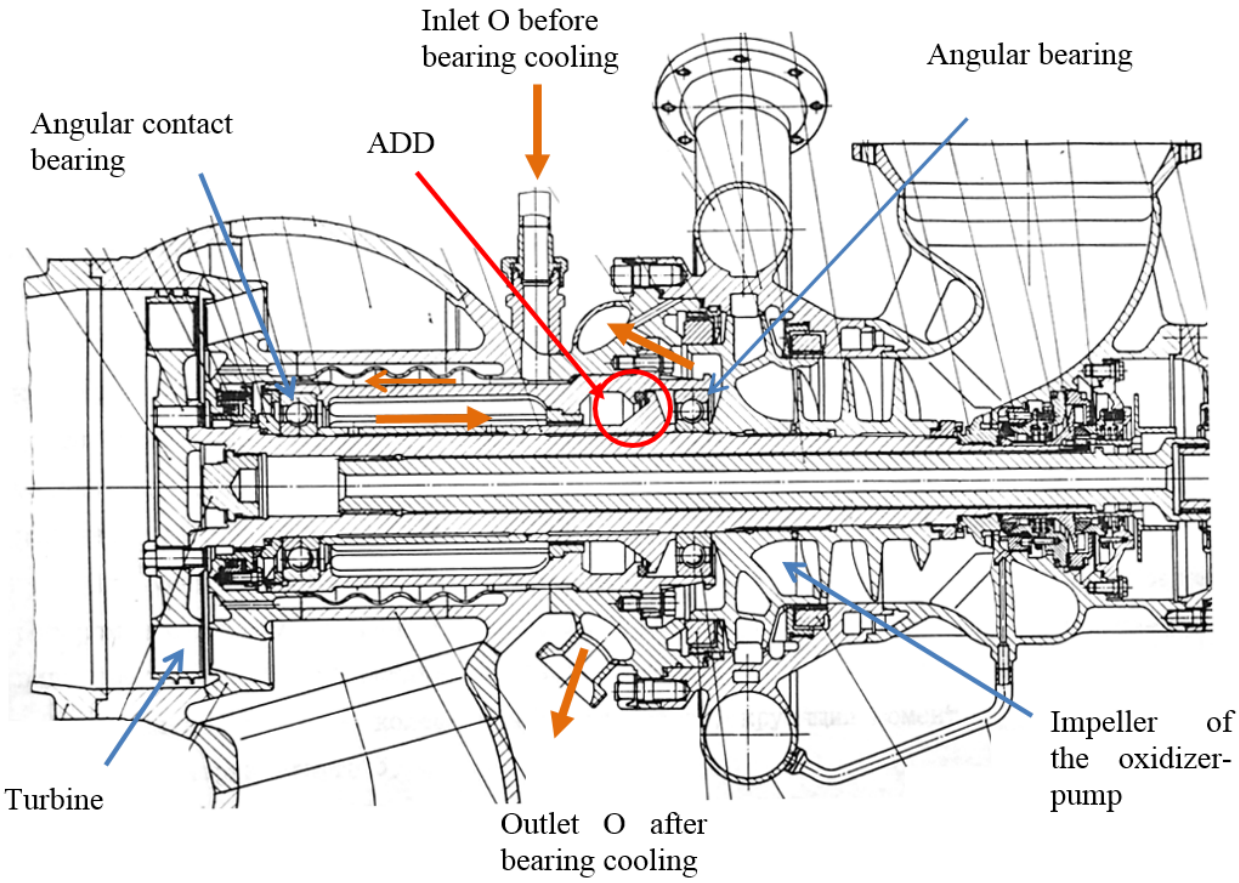


Fig. 4. The part of construction of TPA LRE RD-120 with a scheme of oxidizer motion

Рис. 4. Конструкция части ТНА ЖРД РД-120 со схемой движения окислителя

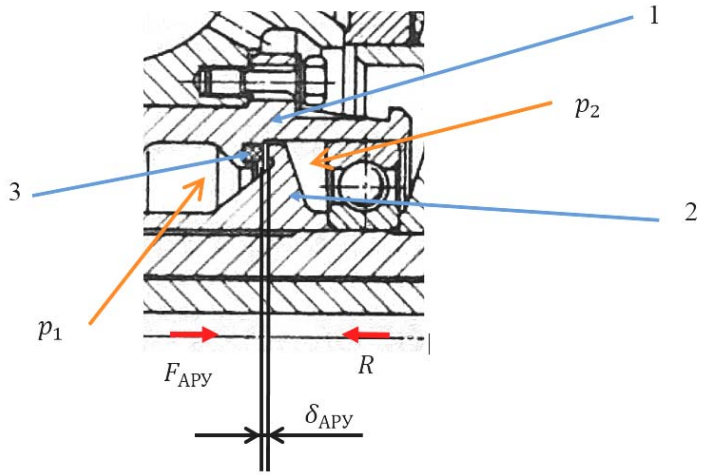


Fig. 5. The construction of ADD TPA LRE:
1 – hub; 2 – ADD disk; 3 – copper graphite ring

Рис. 5. Устройство АРУ ТНА ЖРД: 1 – втулка;
2 – диск автомата разгрузки; 3 – меднографитовое кольцо

The conditions of LRE launch. At the launching phase of LRE RD-120 (fig. 1) the axial motion of the rotor to one or another way mostly detected by the temp and the value of pressure change on the outlet of oxidizer pump impeller and the pressure change on the outlet of the turbine (fig. 4). The rise of both pressures in the launching stage of engines is detected by principle of starterless ignition of the engine conducted according to the scheme “gas – fluid” [9].

First of all the starterless ignition of LRE conducted according to the scheme with post-combustion of oxidizer in the combustion chamber is made by the initial start of gas generator and the next (some time later) start of CC (combustion chamber) work that is characterized by the intense rise of pressure in it connected with the feed of most part fuel to CC. During this phase on TPA turbine grate excess power is realized. It lets the TPA rotor to gain high level rpm and transform the work of pumps from negative to positive heads. At the initial start of engine the pumps work as a source of hydraulic loss as they do not rotate at first. At this time period axial force goes from the pump to the turbine and TPA rotor motion directed to closing of the gap in ADD.

At second, during all the process of engine launching, it is important to avoid the appearance of temperature perturbation in GG that in oxidizing medium can lead to the firing in turbine tract. One of the reasons of such perturbations in GG is CC (combustion chamber) starting to work and as a result the pressure rise at output of the turbine, falling of excess power, braking of the TPA rotor acceleration and braking of oxidizer consumption. In LRE RD-120 at launching phase of GG the fuel fed with the rise of consumption through the regulator (fig. 1, p. 6) on strict program, so braking of oxidizer consumption leads to decreasing of coefficient components relation in GG and consequently to the rise of oxidizing gas temperature. If the CC starts working early, there will be a great gas temperature perturbation in GG.

The time of CC starting to work is detected by: the moment of main fuel valve opening (fig. 1, p. 4) (relative to oxidizer valve and GG fuel (fig. 1, p. 7, 8)) in feeding line to CC; the value of hydraulic losses of the pressure on throttle of fuel (fig. 1, p. 5); the time of starting and the speed of its switching from the starting position to nominal (at launching phase of LRE RD-120 throttle of fuel put in the position that makes the pressure losses about 10 times more than at nominal regime of engine work with the following its opening in the position that provides nominal coefficient of relation between fuel components in CC); the depth of vacuumizing of engine’s fuel cavities before the filling that influence on the final value of gas bubbles in the engine’s fuel cavities; the value of fuel pressure at inlet of engine etc.

This principle without running the starter is used in many liquid rocket engines, for example in RD-256, RD-301, RD-170, RD-180 and others.

The starting to work of CC in RD-120 engine, leads to the increase in pressure at the outlet of the turbine TPA, and consequently to the increase in axial force directed towards the disclosure of the working gap in ADD.

Modeling of running LRE RD-120 with early entry into work of CC. In the process of development of rocket engines RD-120, JSC “NPO Energomash named after academician V. P. Glushko”, together with the Moscow Aviation Institute and other research organizations are constantly carried out mathematical modeling of the various processes occurring in the engine, which allowed to solve many problems arising in the process of development of this engine [10].

Different mathematical models were developed for the theoretical study, in particular in the MAI, together with NPO Energomash they developed a nonlinear mathematical model to study the launch of the RD-120 engine, which later was modified, in the part connected with studying the behavior of the axial forces in the TPA of this engine. This model was based on theoretical background provided in [11–13], generalized data of pumps oxidizer flow test and purging the turbines, supplemented by a differential equation of the displacement of the rotor. The model takes into consideration the effect of not only

static forces in the respective area, but also dynamic components, in particular the action of dynamic pressure of the gas over the turbine blades, after gas outflow from its nozzle, the mass of the floating rotor etc [14]. In the case when the rotor occupies a position in which a portion of the axial force begins to perceive angular contact ball bearing, bearing load characteristics start working [15].

With the help of mathematical model developed to study the RD-120 engine start, even before the accident mentioned above, it was stated that in the course of its run, with an early start to the work of the CC, in its GG there is a perturbation in the temperature of the oxidizing gas of great value. Such changes in temperature can lead to fire of structural elements of the engine, and at first flow path of the turbine TPA.

Fig. 6 and 7 show the results of the start model engine (similar to the RD-120 engine and the main parameters close to the parameters of this engine), with the different time of command to open the fuel valve installed on the inlet of the cooling path of the CC. The figures demonstrate the change in the process of starting the engine in a relative way of temperature oxidizing gas in GG, the pressure in the CC and the speed of the rotor TPA (scale on left axis 0–1) and the change in the value of the working gap in ADD (scale right axis 0–0.12 cm).

It should be noted that while mathematical modeling the resulting temperature of the gas in GG is mass average, i. e. averaged for the entire volume. The results of measurements of the temperature showed that in the process of starting the engine there is quite a large "delamination" on a diametrical section of GG. One of the temperature sensors in the process of starting the engine can log high temperature "straps" while others may show low temperatures. Therefore, the analysis of modeling results and decision-making, this fact must be taken into account.

The results of modeling show that at the early start of the CC to work (associated with the coming of the primary fuel in it) there is a significant temperature spike in GG that can cause a fire in the nozzle or blades of the turbine TPA.

So, this way, which could change the balance of the axial forces, when the engine starts running is not acceptable.

Modeling of rocket engine startup with a change in the value of the closing pressure of the valve for feeding the oxidant to the turbine BPA O in order to accelerate the motion of its rotor. Conducted modeling of various actions (changing the initial setting of the throttle of fuel; the time of giving the command to the fuel valve of the CC; change the initial settings of the flow controller, its speed and the beginning of resetting etc.) that do not lead to the resumption of testing of the engine, did not give a positive result. Specialists on mathematical modeling proposed to change (increase) pressure of closing the valve of the oxidant in the pipeline of its supply to the turbine BPA O providing fast acceleration of its rotor. It would seem like this action could change the balance of the axial forces in the TPA, in the process of starting the engine to prevent complete closing of the working gap in the ADD, or at least reduce the magnitude of the axial force directed to move the rotor in the direction of closing this gap?

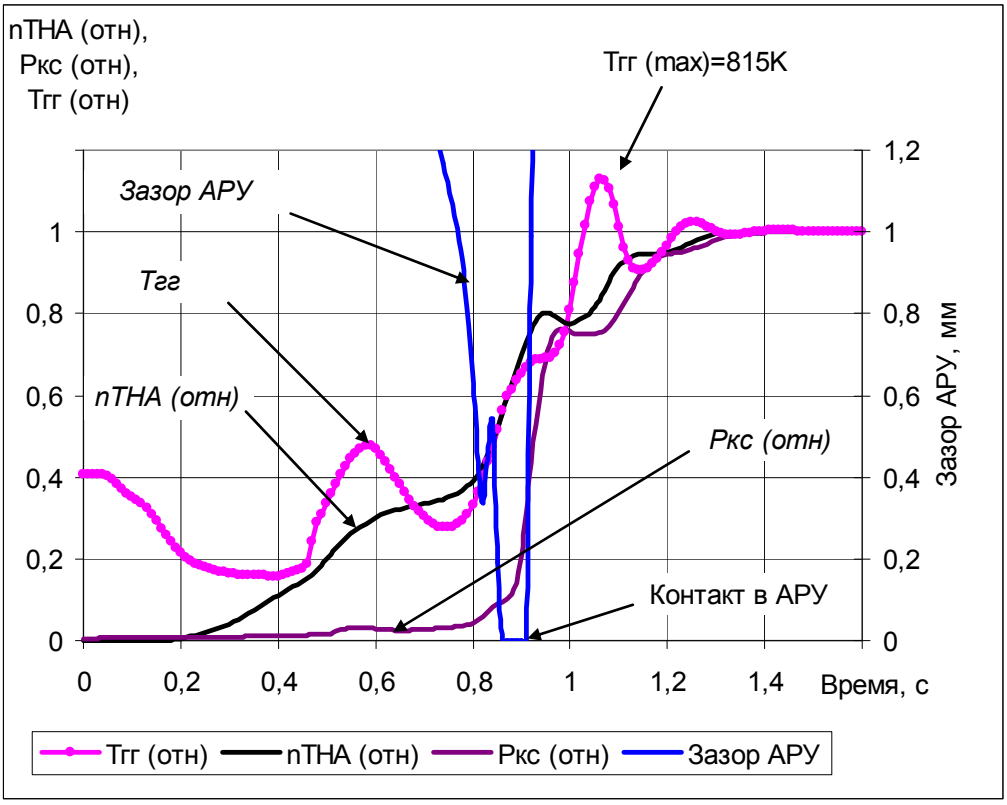


Fig. 6. The dependence of the changes of basic parameters during normal cyclogram launch

Рис. 6. Зависимость изменения основных параметров при штатной циклограмме запуска

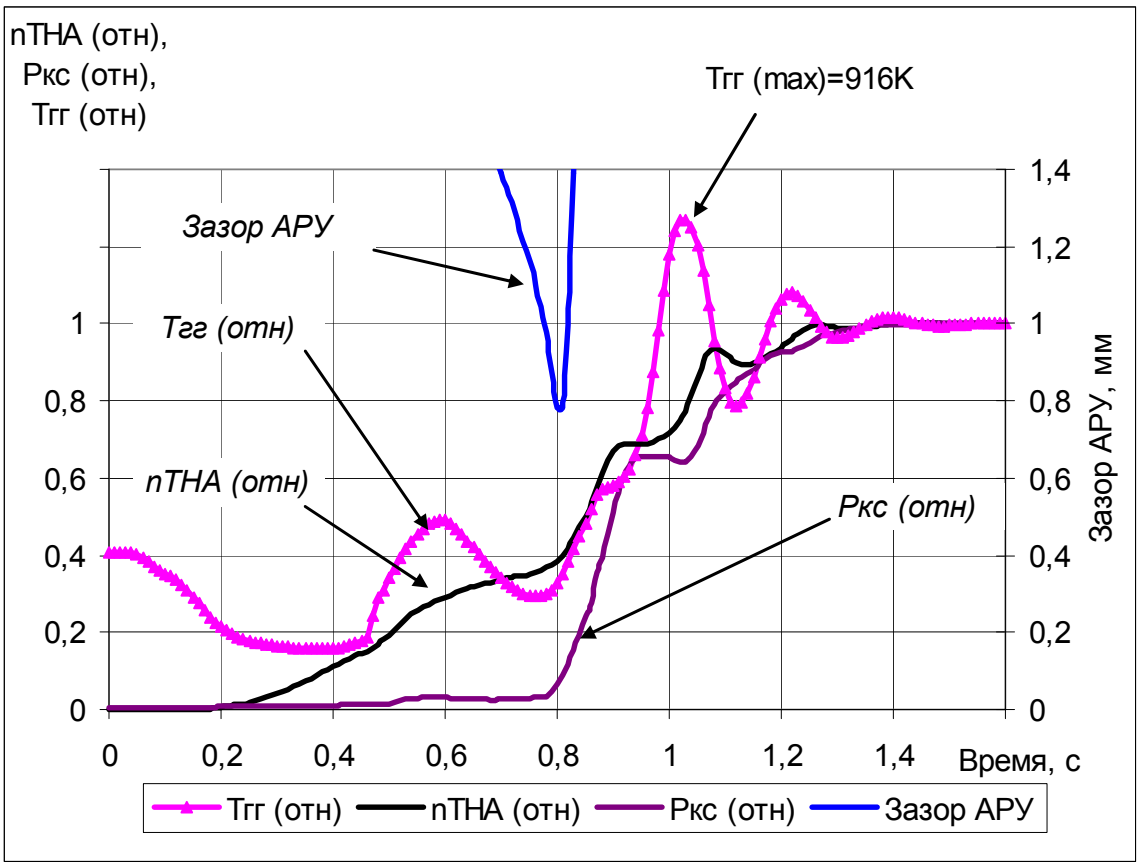


Fig. 7. The dependence of the main parameters in the standard sequence diagram of starting the engine (except for the time a command for opening the valve to supply fuel to the CC – it is done 0.2 sec earlier)

Рис. 7. Зависимость изменения основных параметров при штатной циклограмме запуска двигателя (за исключением времени подачи команд на открытие клапана подачи горючего в КС – команда подана ранее на 0,2 с)

The results of mathematical modeling showed (fig. 8) that this action can significantly reduce the axial force, directed to closing the gap in ADD in the process of starting the engine.

First of all, this action provides a longer operation of the oxidizer pump with low pressure due to the greater pumped consumption, because the consumption of the oxidizer supplied to the drive turbine of TPA returns to the main pump (i. e. loop) and a smaller speed of the rotor TPA, due to longer loading of the pump. In regular version of closing the valve, the speed of the rotor TPA rise immediately after the closing of this valve (by reducing the power consumption of the oxidizer pump, through a reduction in the quantities pumped by the pump flow), and at higher pressures of its closure, the increase of the speed of the rotor for the same reason, happens later (fig. 9). Thus, there is a period of time (between the times of closing the valve at normal and higher closing pressure) during which the speed of the rotor TPA, the greater the closing pressure of the valve, will be less than in the same period of time during normal closing pressure. And the axial force aimed at closing the working gap in ADD, directly connected with the value of the pressure of the oxidizer pump, which is proportional to the speed of the rotor TPA.

Secondly, the valve oxidizer in the line of the fast acceleration of the rotor BPA O at higher pressures while closing is shut later, thus it is bringing the lifetime of low pressure on the pump oxidizer to the time of the entry of the CC to work.

Thus, the increase of pressure of the valve of the oxidant closing in the line of fast acceleration of BPA O, allows to change the balance of the axial forces in the process of starting the engine and prevent full closure of the working gap in ADD or at least to reduce the magnitude of the axial force aimed at closing this gap.

The outcome of the work on the problem of changes in the balance of the axial forces and preventing the closing of the working gap in ADD, in the startup process of the RD-120 engine was the two main actions – the change (increase) of the pressure of closing the valve of the oxidant in the line of an accelerated dispersal of BPA, and the change of hub material (which is associated with radial-thrust and radial bearings) from steel to bronze. The first action provides at least a reduction of the axial force aimed at closing the working gap in ADD, in the process of starting the engine RD-120, and the second is the exclusion of fire in possible short-term contact of friction pairs in ADD.

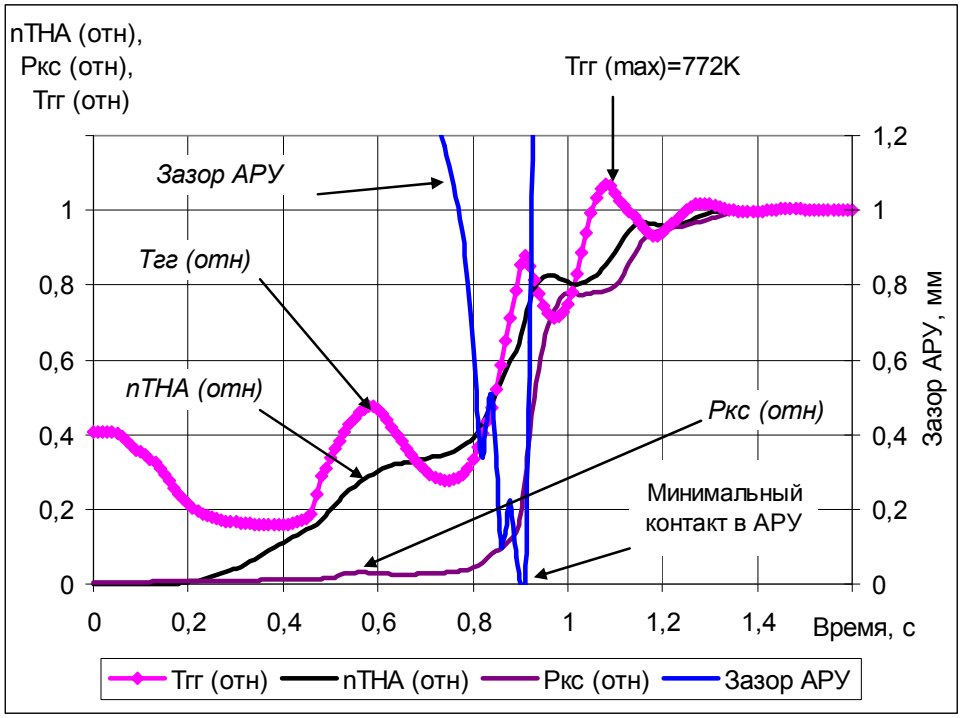


Fig. 8. The dependence of the main parameters in the standard sequence diagram of starting the engine and up to 40 ATM pressure closing valve in the pipeline of fast acceleration of BPA

Рис. 8. Зависимость изменения основных параметров при штатной циклограмме запуска двигателя с увеличенным на 40 атм давлением закрытия клапана в магистрали ускоренного разгона БНА

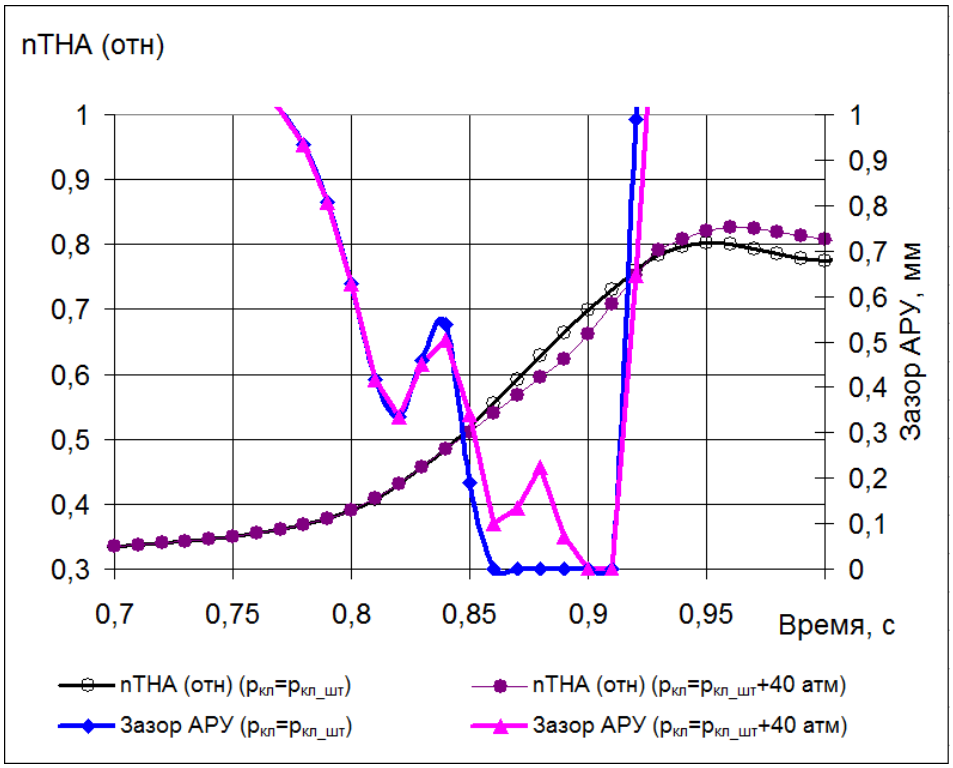


Fig. 9. Comparison of the change in the value of the gap in ADD and the dimensionless frequency of rotation of the rotor TPA between regular (reg) version and a launch with a big closing pressure (reg+40 ATM) of the flow valve O to the turbine BPA O

Рис. 9. Сравнение изменения величины зазора в АРУ и безразмерной частоты вращения ротора ТНА между штатным (шт) вариантом запуска и случая с большим давлением закрытия (шт+40 атм) клапана подачи О на турбину БНА О

Conclusion. This work discovers the influence of various factors on the balance of the axial forces in TPA LRE RD-120. It is shown that under certain conditions in the run mode contact of the mating parts in the design of the ADD is possible. Considered activities would exclude this contact without changing the design of the TPA and the restart of testing of the engine.

One of such activities could be an earlier entry into the work of the CC, but in this case significantly increases the temperature of gas splash in GG, which may result in an oxidizing atmosphere to fire of elements of the flow path of the turbine.

The variant of launching the rocket engine with increased closing pressure of the flow valve O to the turbine BPA for the accelerated dispersal of its rotor is presented. It is shown that this allows to change the balance of the axial forces and to prevent complete closing of the working gap in the ADD, or at least to reduce the axial force aimed at closing this gap.

The works on mathematical modeling of the launch of the RD-120 engine reaffirmed the need for the development of modern mathematical models of liquid rocket engines, which allow as looking into the future of the developed engine, and in critical situations to find the best solution to arising problems.

References

1. RD-120. Available at: http://www.npoenergomash.ru/dejatelnost/engines/rd120/rd120_4.html (accessed: 24.04.2016).

2. Katherine Van Hooser, John Bailey, Alok Majumdar. Numerical prediction of transient axial thrust and internal flow in a rocket engine turbopump. AIAA-99-2189. Available at: https://gfssp.msfc.nasa.gov/zip/paper4_aiaa99_2189.doc (accessed 01.05.2017).

3. Y. Demyanenko, A. Dmitrenko, V. Rachuk, A. Shostak A. Minick, R. Bracken, M. Buser. Single-Shaft Turbopumps in Liquid Rocket Engines. AIAA 2006-4377. Available at: www.rocket-propulsion.info/resources/.../AIAA-2005-3946 (accessed 01.05.2017).

4. Takashi Shimura, Satoshi Kawasaki, Masaharu Uchiumi, Jun Matsui. *Internal flow and axial balancing of a Rocket pump*. AJK2011-06027. Proceedings of the ASME-JSME-KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference. AJK-Fluids. 2011.10 p.

5. Sherstjannikov V. *Issledovanie dinamiki rotorov TNA ZhRD.* [Investgation of dynamic of rotor turbopump liquid rocket engine). Available at: http://engine.aviaport.ru/issues/24/page18.html (accessed 01.05.2017).

6. Chvanov V. K., Fatuev I. Ju., Beljaev E. N. *Dvigatel' 11D123. Raschet dinamicheskiy. Chast' pervaya. Raschet parametrov dvigatelya pri zapuske.* [Engine 11D123. Calculation of dynamic. Part one. Calculation of parameters of engine during start on.] 00.1723.0000.0000.06.0P05, 2001г.

7. *K unical'nyim razrabotkam* [To unique design]. Available at: http://epizodsspace.airbase.ru/bibl/kb-ujn/05.html (accessed 19.01.2016).

8. Fatuev I. Yu. *Issledovaniya problem, svyazannyih s modifikatsiey dvigatelya RD-120 dlya pervyih stupeney raket-nositeley kommercheskogo naznacheniya. Dis kand. tekhn. nauk* [Research of problem of modification RD-120 rocket engine for using 1-st stage of commercial applied rocket. Cand. Diss.]. Moscow, MAI, 2003, 182 p.

9. Vasilev A. P., Kudryavtsev V. M., Kurpatenkov V. D. *Osnovyi teorii i raschyota zhidkostnyih raketnyih dvigateley* [Basic theory and calculation of liquid rocket engines]. Moscow, Vyisshaya shkola Publ., 1975, 656 p.

10. Katorgin B. I., Chvanov V. K., Belyaev E. N. [The numerical modeling of modern LRE]. *Dvigatel*. 2002, Vol. 4, P. 13–15 (In Russ.).

11. Dobrovolskiy M. V. *Zhidkostnyie raketnyie dvigateli* [Liquid rocket engines]. Moscow, MGTU im. N. E. Baumana Publ., 2006, 488 p.

12. Gahun G. G., Baulin V. I. et al. *Konstrukciya i proektirovanie zhidkostnyx raketnyx dvigateley* [Design and development liquid rocket engine: handbook for student of high school of aviation engine and power stand specialization]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 424 p.

13. Lebedinskiy E. N., Mosolov S. V., Kalmyikov G. P. *Konstruktsiya i proektirovanie zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [The computational momels of liquid rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009, 375 p.

14. Ovsjannikov B. V., Borovskij B. I. *Teoriya i raschet agregatov pitaniya zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Theory and calculation of turbopump of liquid rocket engine]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986, 376 p.

15. Belyaev E. N., Chvanov V. K., Chervakov V. V. *Matematicheskoe modelirovanie ZhRD* [The computational modelng of LRE]. Moscow, MAI Publ., 2009, 280 p.

Библиографические ссылки

1. РД-120 [Электронный ресурс]. URL: http://www.npoenergomash.ru//dejatelnost/engines/rd120/rd120_4.html (дата обращения: 24.04.2016).

2. Katherine Van Hooser, John Bailey, Alok Majumdar. Numerical prediction of transient axial thrust and internal flow in a rocket engine turbopump. AIAA-99-2189. [Электронный ресурс]. URL: https://gfssp.msfc.nasa.gov/zip/paper4_aiaa99_2189.doc (дата обращения: 01.05.2017).

3. Single-Shaft Turbopumps in Liquid Rocket Engines. AIAA 2006-4377 / Y. Demyanenko [et al.] [Электронный ресурс]. URL: www.rocket-propulsion.info/resources/.../AIAA-2005-3946 (дата обращения: 01.05.2017).

4. Internal flow and axial balancing of a Rocket pump. AJK2011-06027 /Takashi Shimura [et al.] // Proceedings of the ASME-JSME-KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference. AJK-Fluids, 2011. 10 с.

5. Шерстянников В. Исследование динамики роторов ТНА ЖРД [Электронный ресурс]. URL: http://engine.aviaport.ru/issues/24/page18.html (дата обращения: 01.05.2017).

6. Чванов В. К., Фатуев И. Ю., Беляев Е. Н. Двигатель 11Д123. Расчет динамический. Ч. 1. Расчет параметров двигателя при запуске. 00.1723.0000.0000.06.0P05. 2001.

7. К уникальным разработкам [Электронный ресурс]. URL: http://epizodsspace.airbase.ru/bibl/kb-ujn/05.html (дата обращения: 19.01.2016).

8. Фатуев И. Ю. Исследования проблем, связанных с модификацией двигателя РД-120 для первых ступеней ракет-носителей коммерческого назначения: дис. … канд. техн. наук : 05.07.05. М. 2003. 182 с.

9. Основы теории и расчёта жидкостных ракетных двигателей/ А. П. Васильев [и др.] / под ред. В. М. Кудрявцева. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Высш. шк., 1975. 656 с.

10. Математическое моделирование современных ЖРД / Б. И. Каторгин [и др.] // Двигатель : науч.-техн. журнал. 2002. № 4. С. 13–15.

11. Добровольский М. В. Жидкостные ракетные двигатели. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 488 с.

12. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей : учебник для студентов вузов / Г. Г. Гахун [и др.]. М. : Машиностроение, 1989. 424 с.

13. Компьютерные модели жидкостных ракетных двигателей / Е. Н. Лебединский [и др.]. М. : Машиностроение, 2009. 375 с.

14. Овсянников Б. В., Боровский Б. И. Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1986. 376 с.

15. Беляев Е. Н., Чванов В. К., Черваков В. В. Математическое моделирование рабочего процесса ЖРД. М. : МАИ, 1999. 226 с.

© Belayev E. N., Vorobyev A. G., 2017

UDC 621.396

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 338–342

ISSUES OF RELIABILITY INSMART ANTENNAS

I. N. Kartsan[1*], E. A. Kiseleva[2], L. M. Skopintseva[2], E. A. Shangina[3], S. V. Efremova[1]

[1]Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[2]22 NIO 2 NIU NIC VA Peter the Great
8, Karbysheva Str., Balashikha, Moscow region, 143900, Russian Federation
[3]JSC "Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems"
52, Lenin Street, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
[*]E-mail: kartsan2003@mail.ru

Adaptive digital antenna arrays, also known as smart antennas, are a perspective direction in the development of ground-based command and measurement antenna stations. Smart antennas can significantly improve the efficiency of controlling data exchange between the satellite and ground-based earth station. This benefits the productivity of the technological operations and reduces the time intervals forperforming the technological control cycle. Depending on the requirements, smart antennas containfrom a hundred to several thousand active modules. In this case, the probability of failure of the active module increases. This article discusses the issues of ensuring reliability ofsmart antennas: their ability to maintainin timethe values of their technical parameters within the established limits, which are determined by failures of the equipment included in the antenna, mainly by module failures.

Keywords: adaptive digital antenna array (smart antenna), command-measuring complex, radiation pattern.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 338–342

ПРОБЛЕМЫ НАДЕЖНОСТИ АДАПТИВНОЙ ЦИФРОВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

И. Н. Карцан[1*], Е. А. Киселева[2], Л. М. Скопинцева[2], Е. А. Шангина[3], С. В. Ефремова[1]

[1]Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[2]22 НИО 2 НИУ НИЦ ВА РВСН им. Петра Великого
Российская Федерация, 143900, Московская область, г. Балашиха, ул. Карбышева, 8
[3]АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
[*]E-mail: kartsan2003@mail.ru

Разработка антенных комплексов командно-измерительных систем (КИС) наземного комплекса управления, непрерывно следящих за космическими аппаратами (КА), является одним из наиболее актуальных направлений в области спутниковой связи. Наиболее перспективным путем развития КИС является применение адаптивных цифровых антенных решеток (АЦАР). Это позволяет улучшить оперативность управления обменом информацией с КА, а также положительно сказывается на производительности технологических операций, сокращая временной интервал проведения технологического цикла управления. В зависимости от предъявляемых требований, такие антенные системы содержат от сотен до нескольких тысяч активных модулей (АМ). В связи с этим вероятность выхода из строя (отказов) АМ повышается. Рассмотрены вопросы обеспечения надежности функционирования адаптивных цифровых антенных решеток, т. е. их способность сохранять во времени значения своих технических параметров в установленных пределах, которые определяются отказами аппаратуры, входящей в АЦАР, главным образом, отказами модулей.

Ключевые слова: адаптивная цифровая антенная решетка, командно-измерительная система, диаграмма направленности.

Introduction. Adaptive digital antenna arrays, also known as smart antennas, are a perspective direction in the development of ground-based command and measurement antenna stations.

The basic principles of building of antennas, which are an assembly of analog digital channels with the same center of radiation with a radiation patterns, formed in a digital way, and without phase shift modules, were given a grounding in 1960s [1].

With the progress of electronics, antennas have made a great way from quite simple facilities to complex controlled systems with active devices. Interference environment

is constantly changing, so that the need in adaptive antennas has arisen. Nowadays radio systems are to be able to function under the influence of several heavy broadband interferences in conditions of independent moving of interference sources. In such cases, an adaptive antenna fulfils spatial processing of signal, i. e. it becomes a dynamic spatial filter. The parallel spatiotemporal signal processing in antenna allows increasing the volume of information received from several satellites simultaneously.

The progress of space technology emphasizes development of methods of forming stacked beam patterns able to monitor several spacecrafts and to form nulls in direction of interference sources for a ground-based command-measuring complex. The analysis of modern research, methodical and regulatory literature reveals the concernment of both state institutions and major space engineering corporation in a substantial upgrade of existing command-measuring complexes characteristics [2]. One of the most prospective ways of development of ground control is using of command-measuring complex equipped with adaptive digital antenna arrays.

Such command-measuring complexes would be able, unlike existing stations, to monitor several spacecrafts simultaneously, that will allow increasing the efficiency of data exchange control and performance of technological operations, reducing control time slot.

The development and introduction of smart antennas to ground control systems allow receiving command and telemetric information from all visible satellites. It improves the operational characteristics by elimination of mechanical engineering assemblies of antenna control, and interference immunity of command-measuring complex due to spatial-temporal processing of signals.

The advantages of digital antenna arrays are [3–5]:

– presenting digital synthesis of a radiation pattern in a receiving mode and forming of specified distribution of electromagnetic field in an antenna array face in transmitting mode;

– the ability of digital antenna arrays to perform multisignal transmit and receive signals in a spatial angle;

– the ability to perceive all the information contained in the structure of spatial-temporal electromagnetic fields in an antenna array face and transform it into data almost without any losses;

– the digital formation of the requested radiation pattern in receivers input provides deep spatial cancellation. When combined with the volume expansion it provides interference immunity unreachable before.

Smart antennas allow implementing of special types of gain-phase distribution in an antenna array face and applying for different methods of processing of signals received by every single antenna radiating element. Therefore, it is possible to gain low side lobes of the radiation pattern, to extract more data out of the received from different satellites radio waves, to use adaptive algorithms of optimal spatial-temporal filtration of signals against a background of interference, that all in all improves characteristics of navigational facilities of a consumer [6].

Modern hardware components allow producing smart antennas with unique specifications along with the trend towards components miniaturization and reducing of their aggregated cost. The nearest future of antenna arrays and especially smart antennas seems to be prospective, while their further development of hardware components will help to solve those problems that suppress mass use of such systems.

Reliability of smart antennas is its ability to keep values of technical parameters in set limits in time. It is defined by failures of facilities of smart antennas, mainly, by failures of modules.

The requirements to reliability of smart antennas are strict. MTBF is to be at least fifty thousand hours, while assured life should be not less than 10 years.

Faultiness of electronic components in the modules determine the appearance of both sudden failures and gradual failures. The first lead to the fact that the emitters of smart antennas connected to the failed modules have a zero amplitude of excitation, the second causes a change in the complex amplitudes of the excitation emitters. Since smart antenna is a statistical system, which includes a large number of parallel channels, it potentially has high reliability. Indeed, both types of failures of the modules lead not to failure of the whole system, but only to a deterioration of energy and the directivity characteristics of the antenna: reducing the effective area, increasing the error of the beam, increasing the level of side lobes, reducing the transmission power of the transmitting smart antenna [7–9].

The failure rate of the modules $\lambda(t)$ is a function of time. With good accuracy we can assume that after screening tests the failure rate of the modules is constant, i. e. $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$. The percentage of modules failed for the time t, is given by the following ratio:

$$n(t)/N = 1 - \exp(-\lambda\, t), \qquad (1)$$

where $n(t)$ is the quantity of failed modules; N is the total quantity of modules, $T_0 = \lambda^{-1}$ is MTBF. $n(t)/N \approx \lambda\, t = t/T_0$ is true for $t << T_0$.

The value T_0 of the electronic components of the electronic equipment specified in the specifications.

The failure rate of the modules essentially depends on the operating temperature of the crystals of semiconductor devices included in the modules. Description of temperature dependence of MTBF is based on the Arrhenius equation:

$$\lambda(T) = A \exp(-\varepsilon / kT), \qquad (2)$$

where T is the absolute temperature; k is the Boltzmann's constant; ε is activation energy; A is the constant of proportionality. Test results show that at temperatures of the crystal of 100–200 °C, the failure rate increases about 2 times by increasing the working temperature to 10 °C. That is, when the temperature increases, for example, from 100 to 150 °C operating time to failure is reduced by more than 30 times. In this regard, when considering reliability issues, the first thing to pay attention are transmitting adaptive digital antenna arrays having elevated operating temperature due to large heat generation and therefore lower reliability [10].

From the above it follows that a major problem in the design of transmitting adaptive digital antenna arrays is to ensure the normal thermal regimes of high-power transistors with the purpose of increasing their reliability.

If dissipation is large, a liquid cooling system is used, at relatively low heat an air cooling system is applied. Cooling systems working on different physical principles may be used as well. Here is the example of reliability calculations for smart antennas.

Adaptive digital antenna arrays with large heat generation use liquid cooling systems. Some smart antennas are made of tile-typed modules with metal thermal busses, in which heat from the power transistors is transmitted to the piping with the coolant fluid, located on the rear side of smart antenna. In order to remove high heat generation module structures with embedded channels for flushing of cooling liquid are used.

For smart antenna of K-range communication system (18.8–19.3 GHz) RaytheonSystemsCompany designed a cooling system, based on using phase transitions of the refrigerant. The heat exchanger in the form of a metal cylinder filled with porous aluminum "foam", impregnated with paraffin wax. The volume of the heat exchanger and modules are connected by heat pipes. When you enable the modules the heat supplied to the heat exchanger volume goes into melting the paraffin. The process occurs at almost constant temperature. After turning off the modules, the process is reversed – the paraffin sets solid. The heat exchange device provides the junction temperature of the transistors about 100 °C when temperature gradients on the surface of the array is less than 10 °C.

Changes in the characteristics of smart antennas due to failures of modules can be described by statistical methods. An average radiation pattern of power of a system consisting of N emitters has the form:

$$\overline{\left|F(\vec{k},\vec{k}_0)\right|^2} = \\ = \overline{\left|f(\vec{k})\right|^2}\overline{\left|\sum_{n=1}^{N} I_n(1+A_n)\,e^{i(\vec{k}-\vec{k}_0,\vec{r}_n)}\,e^{i\Phi_n}\right|^2}, \quad (3)$$

where $\vec{k}$ is the wave vector directed towards the observation point; $\vec{k}_0$ is the wave vector directed towards the system phasing point; $\overline{\left|f(\vec{k})\right|^2}$ is an average radiation pattern of power; $\vec{r}_n$ is the vector assigning location of emitter *nth*; I_n is the deterministic part of the amplitude excitation of the *nth* radiator; A_n, Φ_n – random amplitude and phase errors of the excitation of the *nth* emitter. The relation (3) allows by averaging the ensemble of realizations of the random radiation patterns of smart antennas to find the dependence of its parameters from the parameters of a random amplitude-phase errors [11; 12].

If the amplitude and phase errors in the channels are independent and small, i. e. they have a zero average and small variance $\alpha = (\overline{A_n^2} + \overline{\Phi_n^2}) << 1$, and average values of the amplitudes are the same ($I_n = 1$), then degradation of smart antennas parameters is described by the following approximate relations.

The gain is determined by the ratio:

$$G = G_0 - \Delta G \approx G_0\, e^{-\alpha} \approx G_0(1-\alpha). \quad (4)$$

The average error of the maximum of a radiation pattern $\delta\theta$ related to the width of the half power radiation pattern $\Delta\theta_{05}$ (for the case of square pattern) is given by:

$$\delta\theta / \Delta\theta_{05} \approx 0.3\sqrt{\alpha / N}. \quad (5)$$

The distribution of the side lobes of the radiation pattern obeys the generalized Rayleigh law. Average level of side lobes is described by the ratio:

$$\overline{f_б^2} = f_{б0}^2 + \alpha\pi / N, \quad (6)$$

where $f_{б0}^2$ is the relative significance of any side lobe of power in the absence of amplitude-phase errors; $\overline{f_б^2}$ is the average value of the same side lobe if there are errors. In a separate implementation level of the side lobe can be more. With a probability almost equal to one, the maximum level of lateral radiation does not exceed values:

$$f_1 = f_{б0} + 3\sqrt{\alpha\pi / 2N}. \quad (6a)$$

In 80 % of implementations, the level of the side lobe does not exceed the value

$$f_2 = f_{б0} + \sqrt{\alpha\pi / 2N}. \quad (6b)$$

To assess the level of first side lobe of a smart antenna with a square aperture under equiamplitude excitation of the emitters in the formulas (6) should be considered $f_{б0} = 0.217$.

The degradation of the gain depends only on α, and the side radiation caused by random errors, decreases with increasing N. Thus, the maximum level of the first side lobe (6a) of the array with a rectangular aperture that is 13.2 dB with no errors ($\alpha = 0$) is increased in the presence of the error $\alpha = 0.3$ to –8.8 dB in the array with $N = 200$, and only up to 12.7 dB in the array with $N = 20000$. For the same parameters relative error of the maximum radiation pattern (5) is approximately 1 % of the beam width at $N = 200$ and only 0.1 % when $N = 20000$.

The ratio (4)–(6) can be used to assess the impact of the modules breakdown on the performance of smart antennas.

In the statistical theory of antenna arrays it is shown that the failure of n randomly located in the array of N elements can be considered equivalent to the impact of uniformly distributed over all elements of the array of random amplitude and phase errors with variance $\alpha = n/N$. Expressing the fraction of the failed elements as a function of the failure rate (1), we get:

$$\alpha = \alpha(t) = n(t)/N = \\ = 1 - e^{-\lambda t} \approx \lambda t = t / T_0. \quad (7)$$

It should be borne in mind that the failure of modules of the transmitting adaptive digital antenna arrays not only leads to deterioration of the gain and radiation pattern, but will also reduce the radiated power, so the potential of smart antennas when $n << N$ is described by the following ratio:

$$П = PG = П_0(1-\alpha)e^{-\alpha} \approx \\ \approx П_0(1-\alpha)^2 = П_0(1 - t/T_0)^2. \quad (8)$$

Time to failure T_0 of modern transistor transceiving modules of smart antennas of X-range is up to 100 000 hours (over 11 years). Receiver modules, made by hybrid technology have a life 2–3 times longer, and receiver modules based on integrated circuit can take $T_0 > 1\ 000\ 000$ hours, that is orders of magnitude larger.

From ratios (7)–(8) it follows that the smart antenna with N = 20 000 modules and T_0 = 100 000 hours, will undergo the following changes of parameters after one year operation without repair (about 8600 hours): decrease of the gain and effective area of the aperture (about 0.4 dB), the reduction of potential (about 0.8 dB), maximum growth of the first side lobe (not more than 0.3 dB), the maximum error of the beam (about 0.2 %, without taking into account the error, associated with the discreteness of the phase shifters and errors in the calibration of the channels of the array).

Given parameters are achievable, if the correct thermal operation mode of power transistors is chosen. This is achieved through the optimal mode of operation at a reduced power level, rational choice of materials for bodywork and its design maximizing heat dissipation from the crystals, a sufficient flow of cooling air or fluid in the cooling system [13–15].

Practically, the modules located at the edges of the aperture have a lower temperature than the modules located in the central part due to heat transfer to the environment. For example, in the literature there are the results of tests of a 17-element active array with air cooling. Power consumption of DC power in each channel is 9 watts. In conditions of the absence of forced cooling central elements of the array have a temperature of about 100 °C while the extreme ones – 60 °C. When enabled forced airflow, those temperatures are 40 °C and 20 °C, respectively [16].

Increased temperature in the central part of the aperture leads to a higher failure rate of the modules located here in accordance with the aforementioned ratio (2). This, in turn, leads to higher growth of side radiation than it follows from (6). Simulation of smart antennas parameters with variable temperature distribution can be performed using the ratio (3), while the failure rate of the modules in the aperture is described by the ratio (2).

Conclusion. Thus, for a more accurate description of the smart antennas characteristics it is necessary to create a model of its reliability. Such a model should take into account energy parameters of the modules and their elements, the dependence of the efficiency (and hence operating temperature) from the output power level, the temperature dependence on structural parameters of the cooling system, the above mentioned dependence of MTBF on the temperature, a more accurate description of the failure rate of the modules based on the analysis of the failure rate of their elements.

Acknowledgments.This work was supported by a project of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (agreement No. 14.577.21.0220, unique project identifier RFMEFI57716X0220).

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.577.21.0220, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57716X0220).

References

1. Sliusar V. I. [Smart antennas are becoming mass-produced], *Elektronika: nauka, tekhnologiia i biznes,* No. 2, P. 62–65.

2. Huang P., Xu, W. Analog beamforming and digital beamforming on receive for range ambiguity suppression in spaceborne SAR. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2015, Vol. 2015, Article number 182080.

3. Lin C., Li G. Y. Adaptive beamforming with resource allocation for distance-aware multi-user indoor terahertz communications. *IEEE Transactionson Communications*, 2015, Vol. 63, Issue 8, Articlenumber 7116524, P. 2985–2995.

4. Dmitriev D. D., Kartsan I. N. [Adaptive antenna arrays with digital beamforming]. *Reshetnevskiye tchteniya* [Proceedings of XVII International. Scientific. Conf. “Reshetnev reading”], Krasnoyarsk, 2016, Vol. 1, No. 20, P. 263–265 (In Russ.).

5. Tyapkin V. N., Kartsan I. N., Dmitriev D. D., Goncharov A. E. Spatial Filtering Algorithms in Adaptive Multi-Beam Hybrid Reflector Antennas. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2015*. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147244.

6. Dodychina E. M., Kol’tsov, Yu. V. *Tsifrovye antennye reshetki v bortovykh radiolokatsionnykh sistemakh* [Digital Antenna Array in Onboard Radar Systems]. Moscow, MAI Publ., 2013, 160 p.

7. Dmitriev D. D., Tyapkin V. N., Kremez N. S. [Methods of adaptation of the phased antenna array to noise in satellite radio navigational systems], *Radiotekhnika*. 2013, № 9. P. 39–43 (In Russ.).

8. Tyapkin V. N., Kartsan I. N., Dmitriev D. D., Goncharov A. E. Interference Cancelling Responses for Various Configurations of Antenna Arrays for Angular Measuring Navigation Equipment. *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON),* DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147245.

9. Kartsan I. N., Zelenkov P. V., Tyapkin V. N., Dmitriev D. D., Goncharov A. E. Spatial suppression of interference in hybrid reflector antennas. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering,* 2016, Vol. 122, P. 012010. DOI: 10.1088/1757-899X/122/1/012010.

10. Sliusar V. [Digital antenna arrays in mobile satellite communications], *Pervaya milya*. 2008, No. 5, P. 16–21 (In Russ.).

11. Tyapkin V. N., Fateev Y. L., Dmitriev D. D., Kartsan I. N., Zelenkov P. V., Goncharov A. E., Nasyrov I. R. Using GLONASS for precise determination of navigation parameters under interference from various sources. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* 2016, Vol. 22 (1). DOI: 10.1088/1757-899X/122/1/012035.

12. Tyapkin V. N., Kartsan I. N., Dmitriev D. D., Goncharov A. E. Correcting non-indentity in receiving channels in interference-immune systems for Glonass and GPS. *International Siberian Conference on Control and Communications*, *SIBCON 2015*. 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147246.

13. FateevYu. L., Dmitriev D. D., Tyapkin V. N., Kartsan I. N., Goncharov A. E. Phase methods for measuring

the spatial orientation of objects using satellite navigation equipment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, Vol. 94 (1). DOI: 10.1088/1757-899X/94/1/012022.

14. Kartsan I. N., Zelenkov P. V., Tyapkin V. N., Dmitriev D. D., Goncharov A. E. Adaptation algorithms for satellite communication systems equipped with hybrid reflector antennas. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* 2015, Vol. 94 (1). DOI: 10.1088/1757-899X/94/1/012010.

15. Serenkov V. I., Kartsan I. N., Dmitriev D. D. [Method for the synthesis of amplitude-phase distribution of hybrid-mirror download]. *Vestnik SibGAU*. 2015, Vol. 16, № 3, P. 664–669 (In Russ.).

16. Tyapkin V. N., Garin E. N., Ratushniak V. N., Gladyshev A. D. [The spatial noise suppression in various configurations goniometric of navigation equipment]. *Naukoenkie tekhnologii*. 2016, Vol. 17, № 8, P. 52–56 (In Russ.).

Библиографические ссылки

1. Слюсар В. И. Smart-антенны пошли в серию // Электроника: наука, технология, бизнес. 2004. № 2. С. 62–65.

2. Huang P., Xu W. Analog beamforming and digital beamforming on receive for range ambiguity suppression in spaceborne SAR // International Journal of Antennas and Propagation. 2015. Vol. 2015. Article number 182080.

3. Lin C., Li G. Y. Adaptive beamforming with resource allocation for distance-aware multi-user indoor terahertz communications // IEEE Transactions on Communications. 2015. Vol. 63, iss. 8. Articlenumber 7116524, P. 2985–2995.

4. Дмитриев Д. Д., Карцан И. Н. Адаптивные антенные решетки с цифровым формированием луча // Решетневские чтения : материалы XX Юбилейной междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева. В 2 ч. Ч. 1 / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. С. 263–265.

5. Spatial filtering algorithms in adaptive multi-beam hybrid reflector antennas / V. N. Tyapkin [et al.] // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 (21–23 May 2015, Omsk). 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147244.

6. Добычина Е. М., Кольцов Ю. В. Цифровые антенные решетки в бортовых радиолокационных системах. М. : МАИ, 2013. 160 с.

7. Дмитриев Д. Д., Тяпкин В. Н., Кремез Н. С. Методы адаптации фазированных антенных решеток к помехам в спутниковых радионавигационных системах // Радиотехника. 2013. № 9. С. 39–43.

8. Interference cancelling responses for various configurations of antenna arrays for angular measuring navigation equipment / V. N. Tyapkin [et al.] // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 (21–23 May 2015, Omsk). 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147245.

9. Spatial suppression of interference in hybrid reflector antennas / I. N. Kartsan [et al.] // IOP Conf. Series: MaterialsScienceandEngineering. 2016. № 122. DOI: 10.1088/1757-899X/122/1/012010.

10. Слюсар В. И. Цифровые антенные решетки в мобильной спутниковой связи // Первая миля. 2008. № 5. С. 16–21.

11. Using GLONASS for precise determination of navigation parameters under interference from various sources / V. N. Tyapkin [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. № 22 (1). DOI: 10.1088/1757-899X/122/1/012035.

12. Correcting non-identity in receiving channels in interference-immune systems for GLONASS and GPS / V. N. Tyapkin [et al.] // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 (21–23 May 2015, Omsk). 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147246.

13. Phase methods for measuring the spatial orientation of objects using satellite navigation equipment / Yu. L. Fateev [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015. № 94 (1). DOI: 10.1088/1757-899X/94/1/012022.

14. Adaptation algorithms for satellite communication systems equipped with hybrid reflector antennas / I. N. Kartsan [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015. № 94 (1). DOI: 10.1088/1757-899X/94/1/012010.

15. Серенков В. И., Карцан И. Н., Дмитриев Д. Д. Метод синтеза амплитудно-фазового распределения гибридно-зеркальной антенны // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 3. С. 664–669.

16. Пространственное подавление помех при различных конфигурациях антенной решетки угломерной навигационной аппаратуры / В. Н. Тяпкин [и др.] // Наукоемкие технологии. 2016. Т. 17, № 8. С. 52–56.

© Kartsan I. N., Kiseleva E. A., Skopintseva L. M., Shangina E. A., Efremova S. V., 2017

УДК 629.78

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 343–351

АНАЛИЗ КОНЦЕПЦИЙ ОЧИСТКИ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

В. А. Кириллов, И. Р. Багатеев, И. С. Тарлецкий, Т. Н. Баландина*, Е. А. Баландин

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
*E-mail: tan.balandina2015@yandex.ru

Безопасность полетов космических аппаратов различного назначения определяется множеством факторов, одним из которых является возможность их разрушения или повреждения при случайном соударении с космическим мусором техногенного характера. Космический мусор техногенного характера – это все находящиеся на околоземной орбите космические объекты искусственного происхождения, включая фрагменты или части таких объектов, которые закончили свое активное функционирование.

Исходя из официальных данных, с каждым годом количество объектов космического мусора техногенного характера растет. Объекты космического мусора техногенного характера в случае столкновения с ними могут привести к прекращению всякой деятельности в космосе, поскольку скорость движения этих объектов на разных орбитах может достигать сверхзвуковой. Ввиду особенностей геостационарной орбиты, связанных с неподвижностью космического аппарата относительно подспутниковой точки на Земле, по окончании срока эксплуатации космический аппарат должен быть уведен на орбиту захоронения. Это необходимо для обеспечения возможности установки в данную орбитальную позицию нового космического аппарата. Выход из строя геостационарного космического аппарата делает невозможным использование этой орбитальной позиции в будущем.

Таким образом, актуальность работы обусловлена, с одной стороны, необходимостью освобождения орбитальной позиции, занятой выработавшим свой ресурс космическим аппаратом, с другой стороны, исключением угрозы столкновения неисправного космического аппарата с действующими.

Представлена информация о запусках космических объектов в околоземное космическое пространство и количестве объектов космического мусора в нем за последние семь лет. Также рассмотрены существующие концепции очистки околоземного космического пространства. Приведены данные по концепции сервисного космического аппарата, разрабатываемой инженерами АО «ИСС» на базе существующих негерметичных платформ для геостационарных космических аппаратов.

Цель данного исследования заключается в проведении анализа существующего техногенного засорения околоземного космического пространства и анализе существующих концепций очистки околоземного космического пространства.

В заключение отмечено, что результаты анализа рассмотренных концепций учтены инженерами АО «ИСС» при разработке концепции сервисного космического аппарата для увода космического мусора из области геостационарной орбиты.

Ключевые слова: космический аппарат, космический мусор техногенного характера, околоземное космическое пространство, геостационарная орбита, орбитальная позиция.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 343–351

ANALYSIS OF CLEANING CONCEPTS OF NEAR-EARTH SPACE

V. A. Kirillov, I. R. Bagateev, I. S. Tarleckiy, T. N. Balandina*, E. A. Balandin

JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
*E-mail: tan.balandina2015@yandex.ru

The flight safety of the spacecrafts used for different purposes is determined by a great number of factors, one of which is the possibility of their destruction or damage due to a random collision with technogenic space debris. The technogenic space debris is all space objects of artificial origin being in the near-earth orbit, including fragments or parts of such objects, which terminated their active operation.

According to the official data, every year the number of technogenic space debris objects is increasing. The technogenic space debris objects could result in termination of any activity in space as the velocity of these objects in different orbits can reach the supersonic. Taking into account the geostationary orbit peculiarities related to the spacecraft immobility with respect to the subsatellite point on the Earth, the end-of-life spacecraft must be deorbited.

It is necessary in order to provide the possibility to perform positioning of the new spacecraft into this orbital slot. The geostationary spacecraft failure makes the use of this orbital slot impossible in the future.

Thus, the relevance of the work is determined, on the one hand, by the necessity to vacate the orbital position occupied by failed spacecraft, and by the avoidance of risk of failed spacecraft collision with operational spacecrafts, on the other hand.

This paper contains the information concerning the space objects launches into the near-Earth space and the number of space debris objects in it for the last seven years. The current concepts of the near-Earth space clearance are also considered. The paper presents the data on the service spacecraft concept, being developed by engineers of the JSC "ISS" based on existing unpressurized platforms for geostationary spacecrafts.

The objective of this research consists of the analysis of current technogenic clogging of the near-Earth space and the analysis of existing concepts of the near-Earth space cleaning.

In conclusion it is noted that the results of analysis of these concepts are taken into account by engineers of the JSC "ISS" during the development of the service spacecraft intended to remove the space debris from the geostationary orbit area.

Keywords: spacecraft, the technogenic space debris, near-Earth space, the geostationary orbit, orbital slot.

Введение. С начала космической эры всеми космическими державами было осуществлено около 5000 запусков, в результате чего в околоземное космическое пространство (ОКП) было выведено порядка 30000 крупных (более 10 см) космических объектов. На 1 октября 2009 года было зарегистрировано около 33500 объектов [1]. Из них более двух третей все еще остаются на орбитах и контролируются наземными и космическими средствами наблюдения.

К 2012 году на орбитах вокруг Земли реально функционировало 994 космических аппарата (КА). Большинство из них действовало в низкоорбитальной области и на геостационарной орбите (ГСО) (47 % – на низких орбитах, 42 % – на ГСО, остальные – на средних и высокоэллиптических орбитах). Для сравнения, в 2008 году действующих искусственных спутников Земли (ИСЗ) было около 850 КА, и соотношение было большее в пользу ГСО. Из действующих КА (активных, находящихся в резерве, проходящих летные испытания и частично действующих) наибольшие группировки имеют США (446 КА), Россия (135 КА) и Китай (132 КА).

Относительные орбитальные скорости околоземных объектов техногенного происхождения могут достигать 10 км/с, поэтому даже небольшие объекты способны привести к серьезным повреждениям действующих КА. При столкновении образуется огромное количество мелкого космического мусора (КМ). Большинство околоземных объектов техногенного происхождения возникло в результате 175 разрушений КА на орбите. Из них 48 – в результате преднамеренных разрушений КА или разрушений при столкновении различных КА (каталогизировано 2244 объекта КМ), 52 – в результате взрывов двигательных установок (каталогизировано 3558 фрагментов КМ), 7 – в результате неисправностей в системах КА (каталогизировано 618 объектов КМ) [2].

В последнее время было зафиксировано несколько столкновений искусственных спутников в космосе: первое столкновение – это столкновение российского спутника «Космос-2251» с американским спутником Iridium 33 [3]. Столкновение произошло 10 февраля 2009 года. В результате столкновения образовалось около 600 обломков. Второе столкновение – российский микроспутник «Блиц», являющийся частью международной системы лазерного зондирования, столкнулся с обломком китайского метеоспутника «Фэнъюнь-1С».

Согласно разработанным комитетом ООН по космосу Руководящим принципам по предотвращению образования космического мусора и требованиям [4], отработавшие КА должны быть уведены из рабочей зоны орбиты в зону захоронения так, чтобы исключить возможность их столкновения с космическими объектами, которые продолжают работать на орбите, но в реальности это не всегда реализуется. Так, зоной захоронения КА на ГСО является сегмент сферической оболочки ОКП, определяемой из следующих условий: минимальная высота равна высоте геостационарной орбиты минус 200 км; максимальная высота равна высоте геостационарной орбиты плюс 200 км.

По состоянию на 31 августа 2015 г. общее количество находящихся в космическом пространстве и каталогизированных в базах данных автоматизированной системы предупреждения об опасных ситуациях в ОКП космических объектов техногенного происхождения составило 17250 космических объектов (КО). Из них 1362 КО – это действующие КА, а остальные 15888 КО – КМ.

В последние годы операторы все чаще и чаще получают сообщения об угрозе столкновения функционирующих КА с каталогизированными объектами КМ (размером, как правило, более 10 см). Столкновение КА с таким объектом в лучшем случае повлечет за собой полную или частичную потерю функциональности, а в худшем – сильный взрыв с образованием большого количества новых фрагментов КМ.

Весьма популярной спутниковой орбитой является ГСО. На ней располагаются сотни КА, каждый стоимостью в десятки, а то и в сотни миллионов долларов. В среднем осуществляется порядка 30 запусков КА на ГСО ежегодно. Тенденция заполнения ГСО и орбит с высотой, близкой к ГСО, приведена на рис 1.

Особенностью ГСО является то, что спутник, находящейся на ней, постоянно располагается в одной и той же точке стояния, называемой орбитальной позицией. Выход из строя геостационарного КА делает невозможным использование этой орбитальной позиции в будущем. Одним из таких примеров является потерянный в ноябре 2015 года израильский спутник Amos-5, который в настоящий момент дрейфует по геостационарной дуге и представляет проблемы для

других владельцев геостационарных спутников. Для предотвращения столкновения с такими спутниками необходимо производить их увод в зону захоронения.

Анализ существующих концепций очистки околоземного космического пространства. В настоящее время, с учетом все возрастающей интенсивности использования околоземного космического пространства, рассмотрение возможности его очистки от отработавших КА и фрагментов разрушившихся КА становится весьма актуальным. По данной теме предлагается широкий спектр различных технических устройств, которые могут обеспечить увод элементов КМ на безопасные орбиты или их спуск в атмосферу Земли. В качестве возможных методов очистки ОКП от отработавших КА могут рассматриваться концепции использования космических буксиров, захвата КА с помощью сети, развертывания солнечного паруса в конце срока активного существования (САС), ионного пучка и др.

1. Проект CleanSpace (Swiss Space Center). Швейцарский космический центр разрабатывает систему захвата КМ механическим путем [5]. CleanSpace выходит в окрестность своей цели, ему нужно захватить и стабилизировать ее, используя специальный механизм захвата. Как только это будет сделано, CleanSpace возвращается в атмосферу Земли, где эти два спутника сгорают. Захват CleanSpace с КМ представлен на рис. 2.

2. Harpoon (Astrium UK). На рис. 3 представлен пример концепции, предложенной Astrium UK [6]. В ней предполагается, что КА, оснащенный телескопической штангой с гарпуном на конце, сможет захватывать и переводить на орбиты захоронения нефункционирующие КА. Гарпун имеет длину около 30 см. При расстоянии 20 м гарпун фотографирует цель и отправляет снимки на Землю для геометрической оценки. После оценки цели гарпун захватывает и переводит цель на орбиту захоронения.

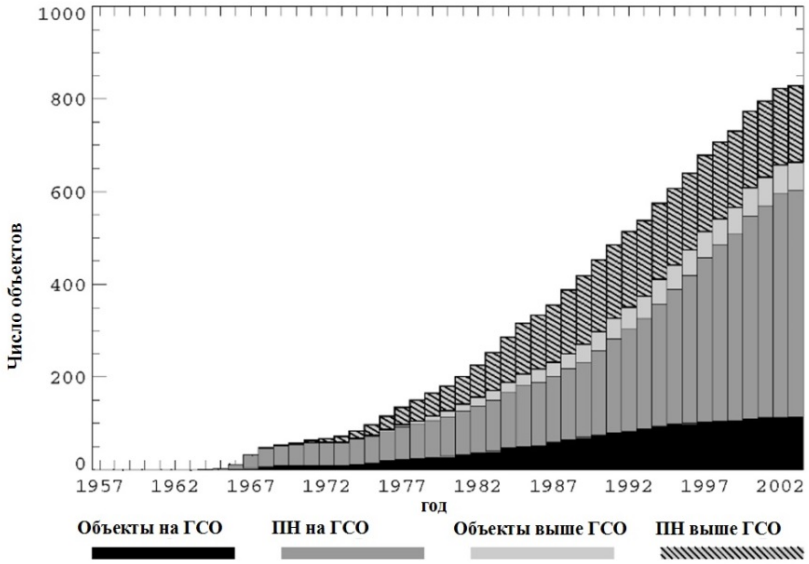


Рис. 1. Тенденция заполнения ГСО и орбит с высотой, близкой к ГСО

Fig. 1. Tendency of filling the geostationary earth orbit and orbits with the height close to GEO

Рис. 2. Проект CleanSpace (Swiss Space Center)

Fig. 2. Project “CleanSpace” (Swiss Space Center)

3. Robotic arm (Deutsch Orbital Servicing Mission). Основная цель состоит в том, чтобы использовать роботизированную руку для обслуживания на орбите (рис. 4) для дальнейшего перевода цели на орбиту захоронения [7].

4. Стальная сеть для сборки космического мусора (Japan Aerospace Exploration Agency). В японском проекте предполагается, что специальный спутник выведет на орбиту и развернет электродинамический трал [8]. Это металлическая сетка длиной 300 метров, шириной 30 сантиметров и толщиной нитей – около 1 миллиметра (рис. 5). Трал будет двигаться по орбите, генерируя магнитное поле и захватывая часть мелкого мусора. Через несколько месяцев «невод» с уловом под воздействием магнитного поля Земли изменит орбиту и войдет в плотные слои атмосферы, где и сгорит.

5. Солнечный парус (National Aeronautics and Space Administration). Установка на спутнике паруса, который при выходе спутника из строя будет раскрываться и, используя давление солнечного света, уводить его с орбиты в верхние слои атмосферы Земли, где спутник будет сгорать.

6. Проект ConeXpress (European Space Agency). ConeXpress использует электрический двигатель для перелета с переходной эллиптической орбиты на геостационарную. Перелёт длится приблизительно 6 месяцев и оптимизирован на минимальное время при помощи непрерывного импульса от двух электрических двигателей, работающих одновременно [9]. ConeXpess работает в три этапа: определение позиции, снимок цели и стыковка. Первый этап заключается в определении позиции ConeXpress и клиентского спутника с помощью наземной системы контроля космического пространства. Во время второго этапа ConeXpress фотографирует клиентский спутник для очень точного определения позиции. ConeXpress пристыковывается к одной из сторон спутника-цели (рис. 6) и переводит его на орбиту захоронения. Срок службы ConeXpress зависит от массы клиентского спутника и типа требуемых операций. Как только спутник транспортировали на орбиту захоронения, ConeXpress может расстыковаться со спутником и возвратиться на геостационарную орбиту для работы с другой целью.

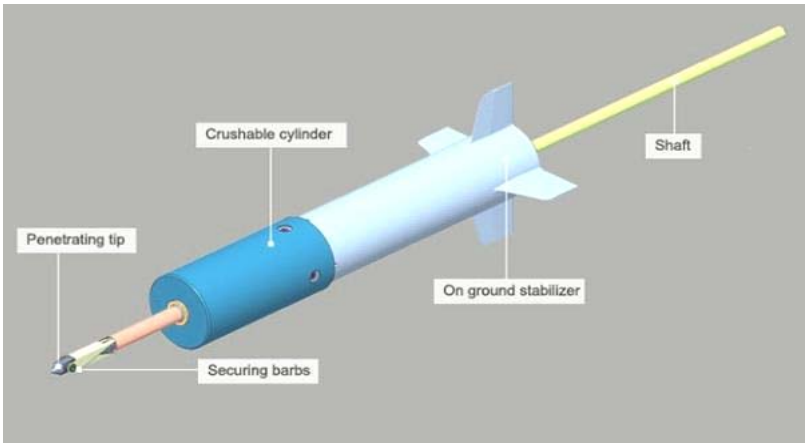


Рис. 3. Концепция Harpoon (Astrium UK)

Fig. 3. Conception “Harpoon” (Astrium UK)

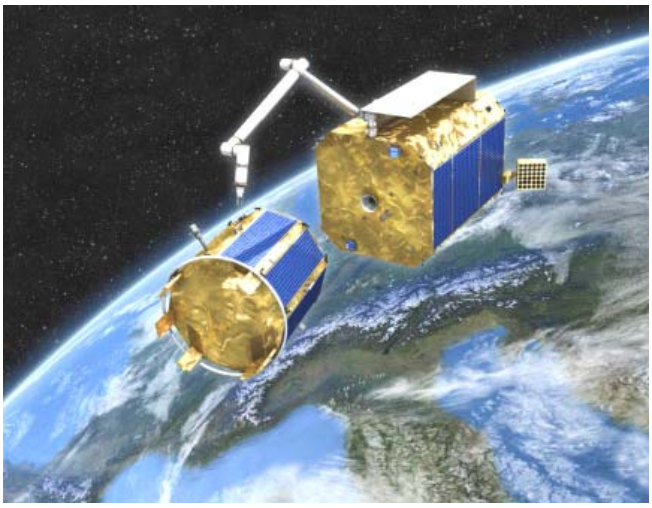


Рис. 4. Стыковка Robotic arm с целью

Fig. 4. Integration “Robotic arm” with the aim

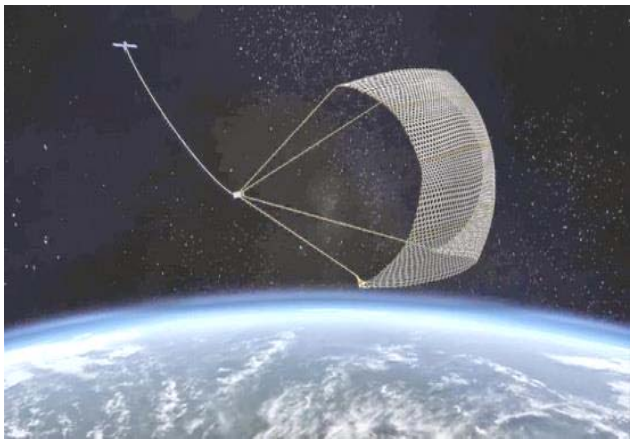


Рис. 5. Стальная сеть для сборки космического мусора

Fig. 5. Steel net for collecting space debris

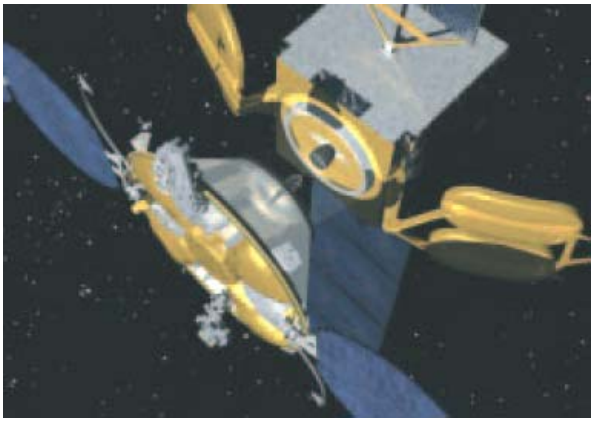


Рис. 6. Стыковка ConeXpress (слева) с клиентским спутником

Fig. 6. Integration “ConeXpress” (on the left) with the client satellite

7. Продление срока активного существования КА (Orbital ATK). В начале 2016 года компания Orbital ATK анонсировала подписание с компанией Intelsat контракта на оказание услуг по продлению САС КА [10]. Согласно контракту Orbital ATK осуществит производство, тестирование и запуск первого аппарата (Commercial Servicing Vehicle – CSV), который должен будет продемонстрировать возможность коммерческой эксплуатации логистических космических систем. В рамках общего проекта (текущее наименование Mission Extension Vehicle-1 (MEV-1) (рис. 7)) аппарат выполнит ряд орбитальных операций по отработке новой технологии, а затем в 2019 году попытается продлить срок активного существования космических аппаратов спутникового оператора. В части технико-экономических аспектов создаваемой системы компания Orbital обнародовала следующую информацию: платформой обслуживающего аппарата будет выступать GEOStar; САС аппарата составит около 15 лет; изделие будет ориентировано на выполнение операций по корректировке орбиты аппаратов; КА сможет подсоединяться к другим аппаратам несколько раз; первой операцией аппарата будет перемещение спутника связи компании Intelsat; Intelsat получит право на приоритетный дозаказ дополнительных обслуживающих аппаратов.

8. Использование ионного пучка для увода элементов космического мусора с околоземных орбит. Ионный пучок может быть использован для воздействия на фрагменты КМ или КА в целом с целью увода на орбиты захоронения [11; 12]. Для этого на борту сервисного КА, находящегося в непосредственной близости от КА-цели, генерируется высокоскоростной ионный пучок (рис. 8). Ионы ускоряются до 30 км/с и более, заряд КА нейтрализуется испусканием электронов катодом-нейтрализатором. Пучок ускоренной квазинейтральной плазмы, попадая на поверхность КА-цели, воздействует на него с некоторой силой, величина которой примерно равна величине тяги источника ионов.

В табл. 1 представлен анализ недостатков предложенных различными мировыми организациями сценариев увода КМ из ОКП.

Концепция сервисного космического аппарата для увода объектов космического мусора с геостационарной орбиты, разрабатываемая инженерами АО «ИСС». В последнее десятилетие подавляющее количество отечественных спутников связи и ретрансляции, предназначенных для работы на ГСО, разработаны и изготовлены на базе негерметичных платформ среднего класса семейства «Экспресс-1000Н».

Модульный принцип построения, достигнутые функциональные и технические характеристики платформы позволяют не только создавать на ее базе целый ряд спутников связи и ретрансляции, но и использовать ее в качестве основы для создания сервисного КА для очистки области ГСО от КМ. Сервисный КА предназначен для многократного выполнения операций по уводу крупногабаритных объектов КМ, к которым относятся нефункционирующие КА и отработанные разгонные блоки. Увод КМ осуществляется посредством воздействия ионного пучка, генерируемого источником, размещаемым на сервисном КА. Реализация технологии бесконтактного воздействия позволяет избежать ряда сложностей, неизбежных при жестком или гибком механическом соединении сервисного КА и КМ, описанных в табл. 1.

Функционирование сервисного КА на ГСО включает в себя следующие этапы:

1) режим ожидания сервисного КА в заданной орбитальной позиции на ГСО;

2) перевод сервисного КА из позиции ожидания в область нахождения КМ и выполнение маневра сближения;

3) выполнение процедур инспекции КМ для оценки его основных динамических и геометрических параметров;

4) «прицеливание» ионного пучка в условный центр масс КМ;

5) увод КМ из области ГСО на орбиту захоронения;

6) возвращение с орбиты захоронения в область нахождения следующего КМ или переход в режим ожидания на орбите захоронения.

Выдача импульсов тяги для орбитального движения связки «сервисный КА – КМ» осуществляется двумя одновременно работающими электроракетными холловскими двигателями. Они же одновременно являются двигателями для компенсации противоимпульса со стороны ионного пучка. Регулирование результирующей тяги осуществляется посредством установки двигателей на двухстепенные поворотные платформы.

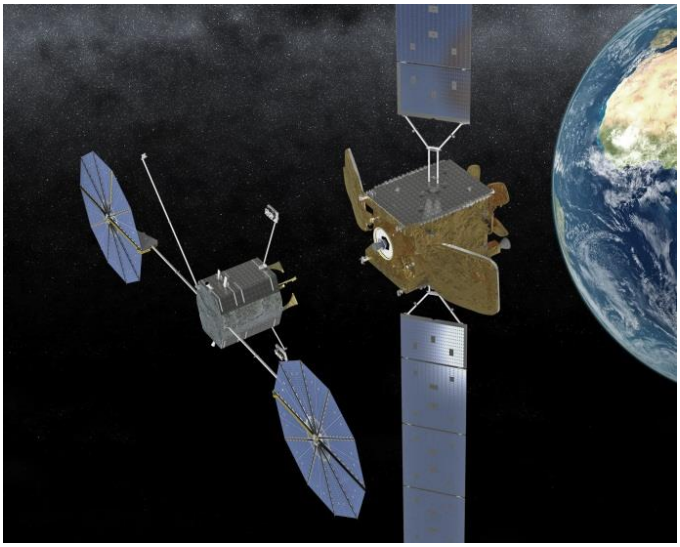


Рис. 7. Стыковка КА CSV (слева) компании Orbital ATK к спутнику связи компании Intelsat

Fig. 7. Integration KA “CSV” (on the left) with the communication satellite of the Intelsat company

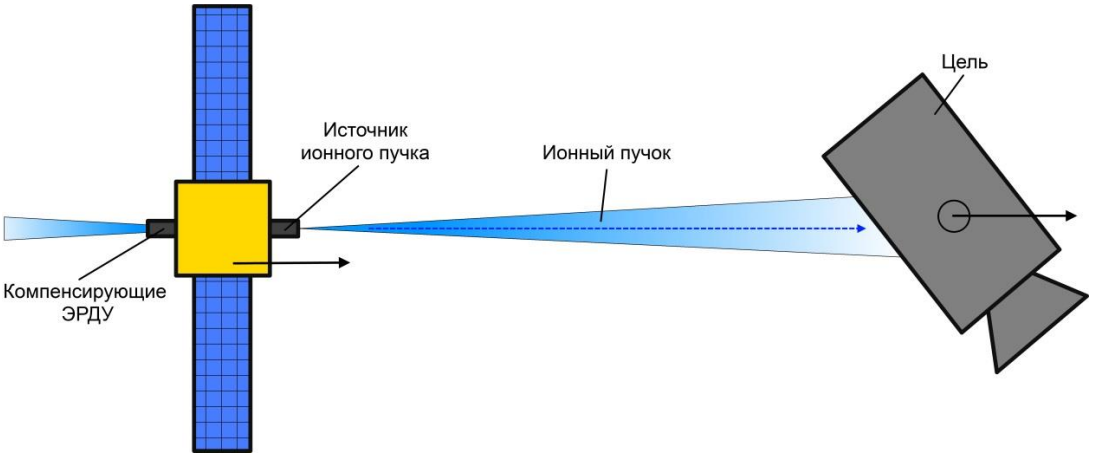


Рис. 8. Схема воздействия ионного пучка на фрагмент КМ

Fig. 8. Scheme of the impact of ion beam on the fragment KM

Концепция сервисного КА основывается на применении (в качестве сервисного модуля) модернизированной платформы «Экспресс-1000», сопряженной с целевым модулем, включающим источник ионного пучка. В настоящее время инженерами АО «ИСС» ведется проработка вопросов детализации данной концепции в части определения компоновочного облика сервисного КА, состава и характеристик служебных систем, а также алгоритмов их функционирования и взаимодействия при выполнении целевой миссии, интеграции средств бесконтактного воздействия с обеспечивающими и управляющими системами.

На рис. 9 представлен предварительный облик сервисного КА на базе негерметичной платформы «Экспресс-1000».

В табл. 2 представлены предварительные технические характеристики сервисного космического аппарата [13–15]. Схема взаимного расположения сервисного КА и объекта КМ в процессе выполнения целевой миссии представлена на рис. 10.

Таблица 1

Недостатки существующих концепций увода космического мусора

Сценарий увода КМ	Недостатки
Использование космического буксира: проект CleanSpace (Swiss Space Center), Harpoon (Astrium UK), проект ConeXpress (European Space Agency), Robotic arm (Deutsche Orbital Servicing Mission)	Данный сценарий подразумевает использование жесткого сцепления сервисного космического аппарата с объектом КМ. При таком виде сцепления, с учетом минимальности расстояний, возможно столкновение двух объектов, что приведет к увеличению засоренности ОКП. Так как КМ может иметь неконтролируемое вращение, это существенно осложняет необходимую конструкцию манипулятора и саму возможность применения метода буксировки
Захват КА с помощью сети: захват КА сетью (Robotic Geostationary Orbit Restorer), стальная сеть для сборки космического мусора (Japan Aerospace Exploration Agency)	Сеть также является жестким сцеплением, а использование сетки с магнитным полем подразумевает увод намагничиваемых металлических объектов с ОКП, но современные КА выполнены из сплавов алюминия и композитов. Неконтролируемое вращение объекта КМ делает невозможным применение сети
Солнечный парус: солнечный парус (National Aeronautics and Space Administration)	Большие временные затраты на перевод КА с ГСО на новую орбиту в конце САС. Солнечный парус является дополнительной конструкцией в составе КА, а следовательно, это ведет к уменьшению массы полезной нагрузки. Применение солнечного паруса требует функциональной исправности системы управления спутника
Продление САС: проект Mission Extension Vehicle-1 (MEV-1)	Необходимо, чтобы аппарат обладал возможностью стыковки с уже существующим изделием
Использование ионного пучка: проект Clean Space One от Федеральной политехнической школы Лозанны, США (EPFL); Ion Beam Shepherd for Contactless Space Debris Removal от Мадридского политехнического университета	Транспортировка в ионном пучке позволяет уводить крупные элементы КМ, в том числе вращающиеся, без необходимости стыковки с ними, однако при этом увеличиваются требуемые затраты рабочего тела для маневров. Также есть определенная проблема в удержании удаляемого объекта в струе ионной пушки

Рис. 9. Предварительный облик сервисного КА на базе негерметичной платформы «Экспресс-1000»

Fig. 9. Preparatory view of the service spacecraft on the basis of non-tight platform “Express-1000”

Таблица 2

Предварительные характеристики сервисного КА

Масса сервисного КА на ГСО, кг	1500
Максимальный запас ксенона, кг	300
Потребляемая электрическая мощность целевой аппаратуры, не менее, Вт	3000
САС, не менее, лет	15
Точность удержания в орбитальной позиции ожидания, градусы	±0,05
Точность ориентации СОС, градусы	±0,07
Количество циклов увода космического мусора	20
Основные параметры источника ионного пучка	
Тяга, мН	50
Потребляемая электрическая мощность, Вт	2200
Основные параметры компенсирующей ЭРДУ	
Количество двигателей ЭРДУ	2
Максимальная тяга одного двигателя, мН	40
Удельный импульс, не менее, с	1860

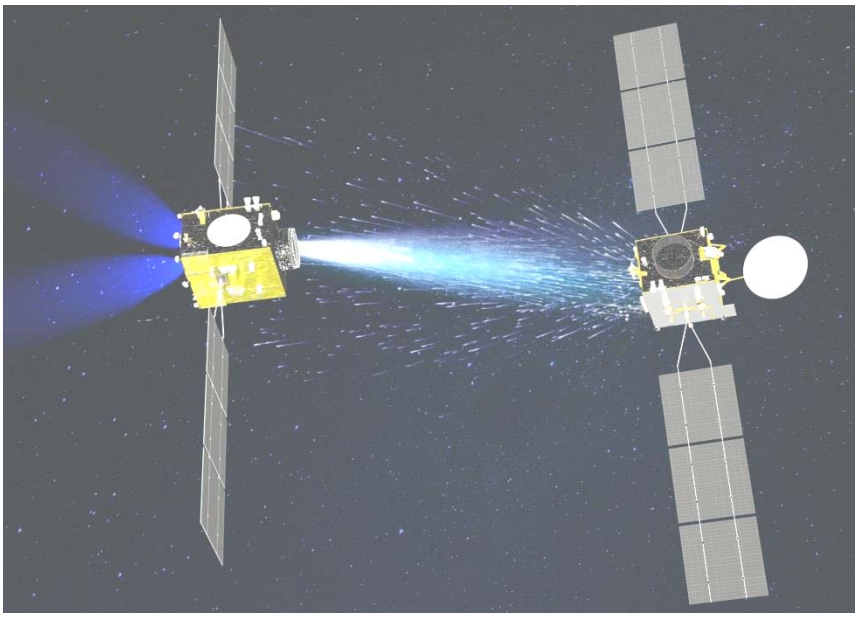


Рис. 10. Схема расположения сервисного КА и объекта КМ

Fig. 10. Scheme of the location of the service spacecraft KA and the item KM

Заключение. В результате проведенного исследования были проанализированы существующие мировые концепции по уводу КМ. Для различных типов орбит могут применяться различные методы очистки от объектов техногенного засорения. В частности, для очистки ГСО перспективным представляется метод бесконтактного воздействия на удаляемый объект. В настоящее время инженерами АО «ИСС» ведутся работы по исследованию проектного облика сервисного КА с бесконтактными средствами воздействия для увода КМ из области ГСО. С учетом возможных к реализации сценариев увода ОКМ из защищаемой области ГСО был сделан вывод о применимости для сервисного КА технического задела, полученного при создании КА связи и ретрансляции на ГСО, имеющих модульный принцип построения. Данный принцип построения КА используется в течение многих лет в АО «ИСС». Разработано и реализовано несколько поколений платформ и космических аппаратов различного назначения, созданных на их основе.

Библиографические ссылки

1. Анализ концепций очистки околоземного космического пространства / И. Р. Багатеев [и др.] // Решетневские чтения : материалы XX Междунар. науч. конф. (09–12 нояб. 2016, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. С. 14–15.

2. Новиков Л. С. Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты. М. : Университетская книга, 2009. 104 с.

3. Угрозы для спутников более чем реальны [Электронный ресурс]. URL: http://www.infox.ru/authority/defence/2009/02/12/iridium_strela.phtml. (дата обращения: 18.04.2016).

4. ГОСТ Р 52925–2008. Изделия космической техники. Общие требования к космическим средствам по ограничению техногенного засорения околоземного космического пространства. Введ. 2009-01.01. М. : Стандартинформ, 2008. 5 с.

5. Clean Space One [Электронный ресурс]. URL: http://espace.epfl.ch/. (дата обращения: 18.04.2016).

6. Astrium Explores Space Debris Harpoon [Электронный ресурс]. URL: http://www.spacesafetymagazine.com/media-entertainment/atrium-explores-space-debris-harpoon/. (дата обращения: 18.04.2016).

7. On Orbit Servicing [Электронный ресурс]. URL: http://www.unoosa.org/pdf/pres/stsc2013/2013iaf-05E.pdf. (дата обращения: 18.04.2016).

8. JAXA, Japan Aerospace Exploration Agency. [Электронный ресурс]. URL: http://global.jaxa.jp/. (дата обращения: 18.04.2016).

9. ConeXpress Orbital Life Extension Vehicle – ESA [Электронный ресурс]. URL: http://www.esa.int/esapub/bulletin/bulletin127/bul127h_caswell.pdf. (дата обращения: 18.04.2016).

10. Pioneers In Space: Orbital ATK Announces Intelsat As Anchor Customer For New Satellite Life Extension Service [Электронный ресурс]. URL: http://www.intelsat.com/intelsat-news/pioneers-in-space-orbital-atk-announces-intelsat-as-anchor-customer-for-new-satellite-life-extension-service/ (дата обращения: 16.04.2016).

11. Claudio Bombardelli, Jesus Peláez. Ion Beam Shepherd for Contactless Space Debris Removal // Journal of guidance, control, and dynamics. 2011. Vol. 31, No. 3. P. 916–920.

12. S. Kitamura. Large space debris reorbiter using ion beam irradiation // IAC-10-A6.4.8: 61st International Astronautical Congress. Prague, CZ, 2009.

13. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с.

14. Сихарулидзе Ю. Г. Баллистика и наведение летательных аппаратов. М. : Бином, 2013. 407 с.

15. Внуков А. А., Рвачёва Е. И. Предпосылки и перспективы создания полностью электрореактивных космических аппаратов для работы на геостационарной орбите // Вестник СибГАУ. 2014. № 4 (56). С. 140–146.

References

1. Bagateev I. R., Tarletskiy I. S., Balandina T. N., Balandin E. A. [Analysis of cleaning concepts of near-Earth space]. *Materialy XX Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Proceed. of XX Intern. Scientific. Conf "Reshetnev readings"]. Krasnoyarsk, 2016, P. 14–15 (In Russ.).

2. Novikov L. S. *Vozdeystvie tverdykh chastits estestvennogo i iskusstvennogo proiskhozhdeniya na kosmicheskie apparaty* [Impact of solid of natural and artificial origin on the spacecraft]. Moscow, University book Publ., 2009, 104 p.

3. *Ugrozy dlya sputnikov bolee chem real'ny* [Threats to the satellites are more than real] (In Russ.). Available at: http://www.infox.ru/authority/defence/2009/02/12/iridium_strela.phtml. (accessed 18.04.2016).

4. *GOST R 52925–2008. Izdeliya kosmicheskoy tekhniki. Obshchie trebovaniya k kosmicheskim sredstvam po ogranicheniyu tekhnogennogo zasoreniya okolozemnogo kosmicheskogo prostranstva* [State Standard R 52925-2008. Space technology items. General requirements for mitigation of near-Earth space debris population]. Moscow, Standartinform Publ., 2008, 5 p.

5. Clean Space One. Available at: http://espace.epfl.ch/ (accessed 18.04.2016).

6. Astrium Explores Space Debris Harpoon. Available at: http://www.spacesafetymagazine.com/media-entertainment/atrium-explores-space-debris-harpoon/. (accessed 18.04.2016).

7. On Orbit Servicing. Available at: http://www.unoosa. org/pdf/pres/stsc2013/2013iaf-05E.pdf. (accessed 18.04.2016).

8. JAXA, Japan Aerospace Exploration Agency. Available at: http://global.jaxa.jp/ (accessed 18.04.2016).

9. ConeXpress Orbital Life Extension Vehicle – ESA. Available at: http://www.esa.int/esapub/bulletin/bulletin127/bul127h_caswell.pdf (accessed 18.04.2016).

10. Pioneers In Space: Orbital ATK Announces Intelsat As Anchor Customer For New Satellite Life Extension Service. Available at: http://www.intelsat.com/intelsat-news/pioneers-in-space-orbital-atk-announces-intelsat-as-anchor-customer-for-new-satellite-life-extension-service/ (accessed 16.04.2016).

11. Claudio Bombardelli, Jesus Peláez. Ion Beam Shepherd for Contactless Space Debris Removal. *Journal of guidance, control, and dynamics*, 2011, Vol. 31, No. 3, P. 916–920.

12. S. Kitamura. Large space debris reorbiter using ion beam irradiation, IAC-10-A6.4.8. 61st International Astronautical Congress, Prague, CZ, 2009.

13. CHebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* [Fundamentals of spacecraft design information support]. Krasnoyarsk, SibSau Publ., 2011, 488 p.

14. Sikharulidze Yu. G. *Ballistika i navedenie letatel'nykh apparatov* [Ballistics and guidance of aircraft]. Moscow, Binomial Publ., 2013, 407 p.

15. Vnukov A. A., Rvachyova E. I. [Backgrounds and trends of all-electric propulsion geostationary satellites creation]. *Vestnik SibGAU*. 2014, No 4 (56), P. 140–146 (In Russ.).

© Кириллов В. А., Багатеев И. Р., Тарлецкий И. С., Баландина Т. Н. , Баландин Е. А., 2017

УДК 681.7.06

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 352–356

ВЫРАВНИВАНИЕ ПОЛЯ ОСВЕЩЕННОСТИ ИМИТАТОРА СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОНИЧЕСКОГО РЕФЛЕКТОРА

А. В. Колинчук

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»
Украина, 61070, г. Харьков, ул. Чкалова, 17
E-mail: lunya18111991@yandex.ru

Актуальной проблемой в области освоения космического пространства в наше время остается моделирование условий космического полета для испытаний космических аппаратов и отдельных их систем на Земле. Рассмотрена задача создания имитатора солнечного излучения для наземных испытаний солнечных батарей космического назначения на основе импульсной ксеноновой лампы удлиненной цилиндрической формы и конического рефлектора. Применение импульсных ксеноновых ламп в качестве источника излучения в имитаторах солнечного излучения позволяет воспроизводить излучение Солнца с достаточной степенью приближения по спектру и плотности потока. Малорасходящийся поток излучения можно получить с помощью осесимметричных зеркал (параболических, параболоцилиндрических, конических), в фокусах которых находятся источники излучения. Изложены аспекты создания трехмерной модели имитатора солнечного излучения для исследования его характеристик, а также для проведения экспериментальной проверки адекватности созданной трехмерной модели. Предложены два способа получения потока излучения имитатора солнечного излучения, соответствующего требуемым показателям по плотности, коллимированности потока, его спектру. Как искусственная расфокусировка источника излучения и конического отражателя, так и применение градиентного тонирования поверхности источника излучения либо конического отражателя позволяют уменьшить неравномерность распределения плотности потока излучения в 3 раза. Сделан вывод о принципиальной применимости и эффективности предложенных способов выравнивания неравномерности падающего светового потока для исследуемой оптической схемы. Предложенная конструкция имитатора солнечного излучения проста в техническом исполнении, не требует значительных капитальных и эксплуатационных затрат для своего функционирования. Предполагается дальнейшее исследование предложенной модели имитатора солнечного излучения и его апробации в лабораторных условиях.

Ключевые слова: имитатор солнечного излучения, оптическая схема, отражатель, источник излучения, неоднородность потока излучения, искусственная расфокусировка, градиентное тонирование.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 352–356

ALIGNMENT OF THE FIELD OF ILLUMINATION OF THE SOLAR SIMULATOR BASED ON A CONICAL REFLECTOR

A. V. Kolinchuk

National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”
17, Chkalova Str., Kharkov, 61070, Ukraine
E-mail: lunya18111991@yandex.ru

Simulation of space flight conditions for testing of spacecrafts and their individual systems on the Earth is an urgent problem in the field of space exploration today. Task of creating a solar simulator for ground testing of space-purpose solar cells based on pulsed xenon prolonged cylindrical lamp and a conical reflector is considered. Application of pulsed xenon lamp as a radiation source in solar simulators allows to reproduce the radiation of the sun closely by spectrum and flux density. Few divergent radiation flux can be obtained using axially symmetric mirrors (parabolic, parabolic-cylindrical, conical) with the sources of radiation in their focus. Important aspects of creating three-dimensional models of solar simulator for the study of its characteristics, as well as carrying out experimental verification of the adequacy of the created three-dimensional model are stated. Two methods are proposed to produce a solar simulator radiation flux corresponding to the required density, flux collimation, its spectrum. As artificial defocusing of the radiation source and the conical reflector as application of gradient shading the surface of the radiation source or conical reflector can reduce the nonuniformity of distribution of the radiant flux density by three times. Proposed ways of the incident radiation flux nonuniformity alignment for the testing of optical schemes are fundamentally applicable and effective. The proposed design of solar simulator is easy in technical execution, does not require significant

capital and operating costs for its functioning. Further study of the proposed solar simulator model and its testing in the laboratory are assumed.

Keywords: solar simulator, optical system, reflector, light source, the uniformity of the radiation flux, artificial defocus, gradient shading.

Введение. В области освоения космического пространства на сегодняшний день актуальным остается вопрос адекватного моделирования условий космического полета для испытаний космических аппаратов (КА) и отдельных их систем на Земле. Воздействие космического пространства на КА является комплексным и многофакторным, что обусловливает необходимость предварительных наземных испытаний материалов и отдельных компонентов КА в условиях, максимально приближенных к полетным. В настоящее время эта задача успешно решается и реализуется в специализированных камерах с имитаторами солнечного излучения (ИСИ) и рядом других устройств.

Однако остро стоит проблема снижения стоимости разработки и эксплуатации солнечных имитаторов для испытаний солнечных батарей (СБ) с сохранением достаточного уровня точности воспроизведения основных параметров излучения: плотности, спектра, степени параллельности потока излучения [1–3]. Создание таких приборов является чрезвычайно сложным, затратным и энергоемким процессом, требует квалифицированного обслуживания, поэтому на практике при создании ИСИ находят разумный компромисс между точностью воспроизведения основных параметров и стоимостью установки.

Важнейшим аспектом при создании ИСИ является получение одновременно коллимированного и однородного потока излучения. Эта сложная инженерная и техническая задача традиционно решается путем смешивания пучков лучей различными способами в сложных системах, содержащих спрямляющие линзы и зеркала [4–8]. Однако такой способ получения равномерного потока излучения затратен и, как правило, вызывает громоздкость конструкций ИСИ.

Целью данной статьи является представление результатов исследования в области создания ИСИ, сочетающего достаточный уровень точности воспроизведения необходимых параметров солнечного излучения, простоту конструкции и низкую стоимость создания и эксплуатации установки.

Создание и испытание модели. После изучения современного состояния развития области разработки ИСИ был сделан вывод о целесообразности применения импульсных ксеноновых ламп в качестве источника излучения в ИСИ [9]. Использование данного типа ламп позволяет воспроизводить солнечное излучение с достаточной степенью приближения по спектру и плотности излучения.

Малорасходящийся поток излучения можно получить с помощью осесимметричных зеркал различной конфигурации (параболических, параболоцилиндрических, конических), в фокусах которых находятся достаточно мощные источники излучения.

В лаборатории кафедры нетрадиционных источников энергии и космической техники Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ» был разработан опытный образец [10] импульсного имитатора солнечного излучения, предназначенный для измерения параметров ФЭП. Его оптическая система состоит из протяженного импульсного источника излучения (импульсная ксеноновая лампа типа XOP-15 фирмы Philips [11]: мощность в установившемся режиме работы – 1500 Вт; длина – 395 мм, диаметр – 12 мм), смонтированного в корпус с параболоцилиндрическим концентратором излучения (серийный стробоскоп Acme BF-1500NA [12]) вдоль фокусной линии концентратора (рис. 1). Рабочее поле прямоугольной формы размерами 0,8×0,8 м (площадью 0,64 м^2) отдалено от источника излучения на расстояние 0,3 м. Данный имитатор подробно описан в работе [13].

Экспериментальные исследования вышеописанной установки показали соответствие характеристик потока излучения, производимого имитатором, необходимым параметрам потока солнечного излучения по спектру и плотности излучения в достаточной степени (±2,5 %) [13].

Рис. 1. Внешний вид оптической системы SRS

Fig. 1. The look of SRS optical system

Однако исследование распределения потока излучения ИСИ по поверхности рабочего поля показало высокую степень неравномерности такого распределения. Данная неоднородность поля распределения принципиальна для потока, отраженного от параболоцилиндрического рефлектора в выбранной оптической схеме. В таком ИСИ необходимо решить проблему обеспечения равномерного распределения светового потока в области рабочего поля.

Для поиска и апробации эффективных способов устранения вышеуказанной неравномерности распределения плотности излучения в исследуемом ИСИ необходимо использовать адекватную цифровую модель установки, так как физическая экспериментальная отработка в данном случае является весьма дорогостоящей.

Для исследования солнечного имитатора была выбрана CAD-система TracePro 6.0, предназначенная для трехмерного моделирования и оптического анализа. В данной среде была создана трехмерная модель оптической схемы лабораторной установки ИСИ (рис. 2) и проведена экспериментальная проверка ее соответствия физическому прототипу. Было проведено сравнение характеристик потока излучения, полученных с лабораторной установки ИСИ и его трехмерной модели. Результаты эксперимента подтвердили возможность исследования характеристик ИСИ с помощью построенной модели [13]. Такой вывод позволил проведение дальнейшего использования 3D-модели для усовершенствования импульсного имитатора.

Способы выравнивания распределения светового потока в рабочей области ИСИ. После создания трехмерной модели установки как адекватного инструмента для исследования свойств ИСИ было проведено дальнейшее преобразование модели. Теоретически необходимый угол коллимации потока излучения ИСИ можно получить при использовании однозеркальной осевой оптической схемы на основе конического зеркала с углом раскрытия 90º и протяженным импульсным источником излучения, совмещенным по осям. Трехмерная модель исследуемого ИСИ была преобразована и приведена в соответствие с описанной схемой с коническим рефлектором (рис. 3), а далее протестирована в среде моделирования TracePro 6.0.

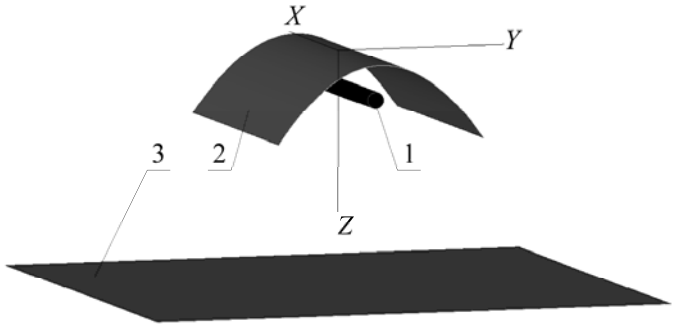


Рис. 2. Трехмерная модель лабораторной установки SRS:
1 – источник излучения; 2 – параболоцилиндрический рефлектор; 3 – рабочее поле

Fig. 2. The 3d model of the laboratory SRS installation:
1 – radiation source; 2 – paracylinder reflector; 3 – operating field

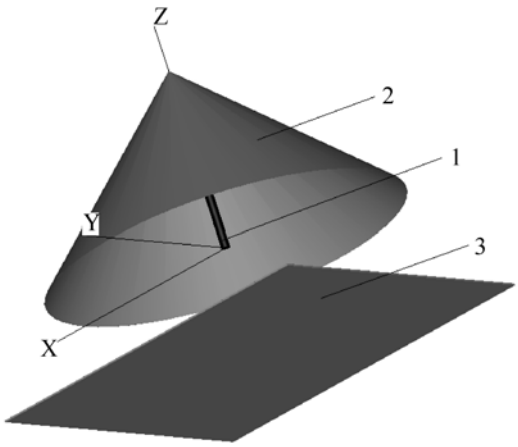


Рис. 3. Трехмерная модель имитатора солнечного излучения
с коническим рефлектором (угол раскрытия 90°):
1 – источник излучения; 2 – конический рефлектор; 3 – рабочее поле

Fig. 3. The 3d SRS model with a conical reflector (with opening angle 90º):
1 – radiation source; 2 – paracylinder reflector; 3 – operating field

Было подтверждено, что данная схема обеспечивает поворот основного пучка, нормального к излучающей поверхности лампы, в направлении, параллельном оси излучателя, после одного отражения и обеспечивает необходимую параллельность светового потока. Возникающая при этом принципиальная неравномерность распределения плотности отраженного потока в области рабочего поля [14] должна быть преодолена.

Преодоление данной неравномерности в комплексе с преимуществами выбранного источника излучения и оптической схемы позволит создать установку со сравнительно низкой себестоимостью и стоимостью эксплуатации и в относительно простой конструкцией, одновременно удовлетворяя требуемому уровню параметров светового потока, создаваемого имитатором.

Для выравнивания распределения плотности потока излучения в рабочем поле было предложено два принципиально новых способа:

– искусственная расфокусировка источника излучения и конического отражателя [14];

– градиентное тонирование поверхности источника излучения либо конического отражателя [15].

Способ искусственной расфокусировки заключается в отклонении конического отражателя от оси излучателя на определенный угол относительно оси ординат таким образом, что рабочее поле ИСИ остается перпендикулярным продольной оси источника излучения, а перераспределение отраженного потока излучения по рабочей области происходит из-за изменения угла наклона рефлектора.

Для трех вариантов рабочих областей разного размера, расположенных в области наибольшей интенсивности падающего излучения, были определены углы наклона, обеспечивающие наименьшую степень неравномерности распределения потока излучения. Исследование влияния угла искусственной расфокусировки на равномерность освещенности рабочих зон показало, что минимальная неравномерность среди рассмотренных вариантов может быть достигнута для площадки 100×100 мм при угле расфокусировки, равном 10°, и составит 8,5 %, что почти в 3 раза меньше, чем без использования искусственной расфокусировки [14].

Способ градиентного тонирования поверхности источника излучения либо конического отражателя для снижения неравномерности распределения падающего светового потока заключается в следующем. Для рассматриваемого ИСИ определяется базовый уровень плотности светового потока, который обеспечивается по всей площади рабочей области. Излучение, превышающее определенный базовый уровень, «отсекается» путем нанесения градиентно-тонированного покрытия в виде тонкой пленки на лампу – источник излучения либо на конический отражатель. От степени тонирования отражающей поверхности рефлектора зависит ее коэффициент отражения: чем больше степень тонировки области, тем ниже коэффициент отражения. Градиентное тонирование лампы-излучателя влияет на коэффициент пропускания (прозрачность) поверхности лампы-излучателя: с увеличением степени тонировки уменьшается пропускная способность данной области поверхности лампы.

Вычисление необходимых коэффициентов отражения для пленочного покрытия рефлектора и коэффициентов пропускания для покрытия излучателя позволило определить неравномерность распределения плотности потока падающего излучения для двух способов нанесения покрытия для трех вариантов рабочих зон различного размера, расположенных в области наибольшей интенсивности и равномерности падающего излучения. Минимальная неравномерность среди рассмотренных вариантов рабочих областей достигнута для площадки 400×200 мм при нанесении покрытия на конический отражатель и составляет 9,8 %, что почти в 3 раза меньше, чем без нанесения градиентного тонирования [15].

Таким образом, сделан вывод о принципиальной применимости и эффективности предложенных способов выравнивания неравномерности падающего светового потока для исследуемой оптической схемы.

Заключение. Рассмотрены этапы создания и исследования имитатора солнечного излучения для наземных испытаний солнечных батарей космического назначения на основе импульсной ксеноновой лампы удлиненной цилиндрической формы. Создана трехмерная модель ИСИ, отвечающая основным требованиям к потоку излучения по спектральному составу, плотности излучения, коллимированности и равномерности распределения плотности излучения, падающего на рабочую область. Предложенные способы позволяют создать соответствующий требованиям поток излучения ИСИ просто и эффективно. Конструкция ИСИ проста для технического исполнения, не требует значительных капитальных и эксплуатационных затрат для своего функционирования.

Предполагается проведение дальнейшего экспериментального исследования предложенной модели имитатора солнечного излучения и его апробация в условиях лаборатории.

Библиографические ссылки

1. Колесников А. В. Испытания космических аппаратов : конспект лекций. М. : МАИ, 2007. 105 с.

2. Ковальский В. Я. Имитаторы излучения Солнца и измерение характеристик солнечных батарей и их элементов (Обзор) // Гелиотехника. 1972. № 3. С. 45–51.

3. Колтун М. М. Оптика и метрология солнечных элементов. М. : Энергоатомиздат, 1983. 365 с.

4. Крат С. А. Повышение эффективности имитаторов солнечного излучения // Вестник СибГАУ. 2011. № 2. С. 124–128.

5. Крат С. А. Тепловакуумная отработка космических аппаратов: развитие новых тенденций // Вестник СибГАУ. 2010. № 4. С. 126–129.

6. Крат С. А. Теоретические основы способа суммирования световых потоков от отдельных источников излучения для наземной отработки космических аппаратов // Вестник СибГАУ. 2011. № 4. С. 131–134.

7. Domínguez C., Antón I., Sala G. Solar simulator for concentrator photovoltaic systems // Optics Express, 2008. Т. 16, № 19. P. 14894–14901.

8. Optical investigation of a sun simulator for concentrator PV applications / C. Rapp [et al.] // Optics Express. 2015. T. 23, № 19. P. A1270–A1279.

9. Колинчук А. В., Шепетов Ю. А. Имитаторы солнечного излучения для испытаний фотоэлектрических батарей космического назначения // Авиационно-космическая техника и технология. 2015. № 3 (120). С. 73–79.

10. Гудкова А. В., Губин С. В., Белоконь В. И. Термостабилизация фотоэлектрических преобразователей для измерения ВАХ с импульсным источником света // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. // М-во образования и науки Украины ; Нац. аэрокосмич. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». Харьков, 2012. Вып. 57. С. 187–196.

11. BG Series Data [Электронный ресурс]. URL: http://www.pro-design.com.au/product_info.php?product_id=433 (дата обращения: 10.3.2017).

12. Acme BF-1500NA [Электронный ресурс]. URL: http://hitonline.ua/products/stroboskopi/acme-bf-1500na.html. (дата обращения: 10.3.2017).

13. Колинчук А. В., Шепетов Ю. А. Экспериментальная проверка модели поля освещенности имитатора солнечного излучения с импульсным источником // Авиационно-космическая техника и технология. 2016. № 5(132). С. 35–40.

14. Колинчук А. В., Шепетов Ю. А. Использование искусственной расфокусировки для выравнивания светового потока в рабочей области имитатора солнечного излучения на основе конического рефлектора // Авиационно-космическая техника и технология. 2016. № 1(128). С. 58–63.

15. Колинчук А. В., Шепетов Ю. А. Использование градиентного тонирования для выравнивания светового потока в рабочей области имитатора солнечного излучения на основе конического рефлектора // Авиационно-космическая техника и технология. 2016. № 3 (130). С. 30–36.

References

1. Kolesnikov A. V. *Konspekt lektsiy po kursu "Ispytaniya kosmicheskikh apparatov"* [Lecture notes of the course "Spacecraft Testing"]. Moscow, MAI Publ., 2007, 105 p.

2. Koval'skij V. Ja. [Solar simulators and characteristics measurement of solar cells and their components Performance (Overview)]. *Geliotehnika*. 1972, No. 3, P. 45–51 (In Russ.).

3. Koltun M. M. *Optika i metrologija solnechnyh jelementov* [Optics and metrology of solar cells]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983, 365 p.

4. Krat S. A. [Improving the efficiency of solar simulators]. *Vestnik SibGAU*. 2011, No. 2, P. 124–128 (In Russ.).

5. Krat S. A. [Thermal vacuum testing of spacecraft: development of new trends]. *Vestnik SibGAU*. 2010, No. 4, P. 126–129 (In Russ.).

6. Krat S. A. [Theoretical foundations of the method of summation of the light fluxes from separate radiation sources for ground testing of spacecraft]. *Vestnik SibGAU*. 2011, No. 4, P. 131–134 (In Russ.).

7. Domínguez C., Antón I., Sala G. Solar simulator for concentrator photovoltaic systems. *Optics Express*. 2008, Vol. 16, No. 19. P. 14894–14901.

8. Rapp C., Straub V., van Rooyen D. W., Thor W. Y., Siefer G., Bett A. W. Optical investigation of a sun simulator for concentrator PV applications. *Optics Express*. 2015, Vol. 23, No. 19, P. A1270–A1279.

9. Kolinchuk A. V., Shepetov Ju. A. [Solar simulators for testing of photovoltaic cells for space application]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2015, No. 3(120), P. 73–79 (In Russ.).

10. Gudkova A. V., Gubin S. V., Belokon' V. I. [Thermal stabilization of photovoltaic cells for measuring current-voltage characteristics with a pulsed light source]. *Otkrytye informacionnye i komp'juternye integrirovannye tehnologii: sb. nauch. tr.* [Proc.Public information and computer integrated technologies, the Ministry of Educ. and Sc. of Ukraine, Zhukovsky Nat. Aerosp. Univ. "KhAI"]. Kharkov, 2012, Vol. 57, P. 187–196 (In Russ.).

11. BG Series Data. Available at: http://www.pro-design.com.au/product_info.php?product_id=433 (accessed: 10.3.2017).

12. Acme BF-1500NA. Available at: http://hitonline.ua/products/stroboskopi/acme-bf-1500na.html (accessed: 10.3.2017).

13. Kolinchuk A. V., Shepetov Ju. A. [The model of the field of lightening of the solar simulator with pulsed source experimental verification]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2016, No. 5(132), P. 35–40 (In Russ.).

14. Kolinchuk A. V., Shepetov Ju. A. [The artificial defocusing application for the light flux alignment in the working area of the solar simulator based on a conical reflector]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i technologiya*. 2016, No. 1(128), P. 58–63 (In Russ.).

15. Kolinchuk A. V., Shepetov Ju. A. [The gradient toning application for the light flux alignment in the working area of the solar simulator based on a conical reflector]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i technologiya*. 2016, No. 3(130), P. 30–36 (In Russ.).

© Колинчук А. В., 2017

Раздел
Part
3

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIALS SCIENCE

УДК 681.2-2

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 358–366

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕСОИЗМЕРИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ КОЛЬЦЕВОГО УПРУГОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА И ВТОРИЧНОГО СТРУННОГО ДАТЧИКА

И. В. Антонец[1], В. А. Борсоев[1], А. В. Кацура[2*], С. М. Степанов[1]

[1]Ульяновский государственный технический университет
Российская Федерация, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32
[2]Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[*]E-mail: pnk-sibsau@mail.ru

В качестве наиболее распространенных датчиков величины деформации упругого элемента весоизмерительных устройств используют индуктивные, емкостные и тензорезисторные преобразователи деформации. В известных датчиках преобразование входной неэлектрической величины в электрический сигнал осуществляется в два этапа: сначала происходит ее преобразование в изменение одного из параметров (индуктивности, емкости, сопротивления и т. п.), а затем это изменение преобразуется в электрическую величину. Основными проблемами подобных датчиков является высокая зависимость от стабильности их параметров, температурная зависимость и относительно низкая чувствительность вследствие измерения только части величины деформации. К недостаткам следует отнести аналоговый принцип действия, в то время как основные электрические преобразователи фиксируют частотные изменения. Для устранения этого недостатка в конструкцию устройств встраивают преобразователи – блоки, переводящие аналоговый сигнал в частотный. Эти устройства имеют очень слабый выходной сигнал, и для вывода его на необходимый уровень применяются усилители. Наличие в цепи преобразования сигналов большого количества дополнительных звеньев существенно снижает точность измерения. Для силоизмерительных устройств целесообразно применение струнного датчика (СД). Этот датчик обладает высокой точностью и малой инерционностью. Погрешность СД от гистерезиса не превышает 5 г на 15 кг приложенного веса. Приведены результаты исследования статических и динамических характеристик оригинальных конструкций весоизмерительных устройств на основе кольцевого упругого элемента переменного сечения и встроенного в него струнного датчика. Проведенные исследования подтвердили работоспособность устройств в широком диапазоне нагрузок, отмечены высокая чувствительность и точность измерений. Однако существенным недостатком СД является повышенная чувствительность к внешним возмущениям. СД преобразует внешнее силовое воздействие в колебания струны, и его высокая точность будет обеспечиваться только в том случае, если будут отсутствовать любые внешние источники колебания, которые могут привести к существенным погрешностям измерения.

Ключевые слова: упругий чувствительный элемент, струнный датчик, статические характеристики, динамические характеристики, величина деформации.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 358–366

THE STUDY OF WEIGHT MEASURING DEVICES BASED ON RING OF ELASTIC SENSITIVE ELEMENT AND SECONDARY SENSOR STRING

I. V. Antonets[1], V. A. Borsoev[1], A. V. Katsura[2*], S. M. Stepanov[1]

[1]Ulyanovsk State Technical University
32, Severnyy Venets, Ulyanovsk, 432027, Russian Federation
[2]Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[*]E-mail: pnk-sibsau@mail.ru

Inductive, capacitive and strain gauge transducers of strain are used as the most common sensors of the amount of deformation of the elastic element measuring devices. In known sensors of converting nonelectrical quantities into electric signal is performed in two stages: the first stage is the conversion to change one of the parameters (inductance, capacitance, resistance, etc.), then this change is converted into an electrical value. The main problems of such sensors is their high dependence on the stability of their parameters, temperature dependence and relatively low sensitivity due to the measurement only of the magnitude of deformation. The disadvantages of analogue should include the principle of operation, while the main electric transducers are fixed frequency changes. To address this shortcoming in the design of the device is inserted into the input blocks, sending the analog signal in frequency. These devices have a very

weak output signal and to output it to the required level applied to the amplifiers. The presence of the circuit signal conversion of a large number of additional links significantly reduces the measurement accuracy. For force measuring devices, it is advisable to use a string sensor (SD). This sensor has high accuracy and low inertia. Error DM hysteresis does not exceed 5 g to 15 kg applied weight. The article presents the results of a study of the static and dynamic characteristics of the original structures, measuring devices based on the annular elastic element of variable cross section and built-in string gauge. The studies have confirmed the efficiency of the devices in a wide range of loads shows high sensitivity and measurement accuracy. However, a significant drawback of SD is the increased sensitivity to external disturbances. SD converts the external force in the vibration of the string, and its high accuracy will be provided only in the event if don't have any external sources of vibrations that can lead to significant errors of measurement.

Keywords: elastic sensing element, string sensor, static characteristics, dynamic characteristics, size of deformation.

Введение. Вторичные датчики, применяемые в весоизмерительных устройствах с первичными упругими элементами (УЭ), характеризуются большим разнообразием принципов преобразования перемещений УЭ. При выборе датчика необходимо решить взаимопротиворечащие задачи: минимизировать возможные погрешности и инерционность измерения, а также максимально упростить устройство, сделать его более надежным и чувствительным к изменению нагрузки. Недостатком большинства вторичных датчиков (индуктивных, емкостных), применяемых в современных весоизмерительных устройствах [1], является аналоговый принцип действия. Для устранения этого недостатка в конструкцию устройств встраивают преобразователи – блоки, переводящие сигнал из аналогового в частотный. Эти устройства имеют очень слабый выходной сигнал (порядка мВ), и для вывода его на необходимый уровень применяются усилители. Наличие в цепи преобразования сигналов большого количества дополнительных звеньев существенно снижает [2; 3] точность измерения.

Предлагаемое весоизмерительное устройство с использованием вторичного струнного датчика. Для весоизмерительных устройств (ВУ) целесообразно [4; 5] применение струнного датчика (СД), который обладает высокой точностью и малой инерционностью. Погрешность СД от гистерезиса не превышает 5 г на 15 кг приложенного веса. Нами были спроектированы конструкции весоизмерительных устройств на основе упругого кольца и встроенного в него струнного датчика. Эскиз первой конструкции ВУ изображен на рис. 1. Упругое кольцо *1* воспринимает приложенную нагрузку через рым-болт *6* и гайку *7*, крепящиеся башмаками *3*. Под нагрузкой кольцо деформируется: по вертикальной оси растягивается, а по горизонтальной – сжимается. Особенность устройства в том, что струнный датчик *2*, работающий на сжатие, воспринимает деформации кольца по вертикальной оси. Это возможно из-за применения специальных уголков *4*, *5*, преобразующих растягивающее напряжение на кольце в сжимающее на струнном датчике. Подобная конструкция позволяет получить минимальные габаритные размеры устройства, не усложняя его конструкцию.

Крепление всех элементов между собой производится болтами *8*, при этом рычаг, воспринимающий нагрузку, регулируется гайкой 9. При необходимости, для устранения зазоров в местах контакта уголков с башмаками в струнном датчике могут быть использованы металлические прокладки. Это значительно упрощает сборку и предварительную настройку весоизмерителя и позволяет снизить себестоимость сборочных элементов, назначив экономически приемлемые допуски.

Конструкция ВУ, эскиз которого изображен на рис. 2, имеет две отличительные особенности: струнный датчик *2* воспринимает сжимающие деформации кольца *1* через стоящие враспор башмаки *3*; башмаки не имеют жесткого крепления и лишь фиксируются винтами *4*. Данная схема позволяет переставлять датчик в кольце по различным осям, изменяя чувствительность устройства при постоянной нагрузке, делая его более универсальным в отличие от первой конструкции, и дает возможность измерять приложенную силу в более широких диапазонах с одинаковой точностью. Универсальность второй конструкции несколько снижает точность устройства за счет меньшей жесткости контакта между кольцом и башмаками и его быстродействие за счет меньшей жесткости упругого кольца. Струнный датчик, применяемый в ВУ, изготовлен из прецизионного сплава 44НХТЮ. Метрологические характеристики датчика представлены в табл. 1. Струнный датчик обладает минимальными значениями упругих несовершенств [6; 7]. Упругие несовершенства материала УЭ выглядят следующим образом: прямое упругое последействие 0,08 %, обратное упругое последействие 0,02 %, гистерезис 0,07 %.

Исследование параметров весоизмерительного устройства на базе вторичного струнного датчика. Конструкция ВУ имеет множество элементов, снижающих его точность [8] и увеличивающих величины данных погрешностей. Рассмотрим восприимчивость весоизмерительного устройства к приложенной силе и определим погрешности измерения. Для этого ВУ будем нагружать согласно его служебному назначению. ВУ нагружали до 500 кг и с помощью частотомера регистрировали частоту колебаний струны датчика. На рис. 3 показана функция преобразования весоизмерителя конструкции № 1, изображена зависимость периода колебания струны датчика от растягивающей силы.

Измерения показали, что разработанное устройство действительно имеет значения упругих несовершенств значительно большие, чем у составляющих его элементов. Появление данных погрешностей вызывается множеством факторов. Это и различного рода упругие несовершенства материала деталей, из которых состоит ВУ, и недостаточная жесткость их конструкций. Однако наибольшее влияние [9] на точностные характеристики весоизмерителя оказывают стыки, присутствующие в его конструкции.

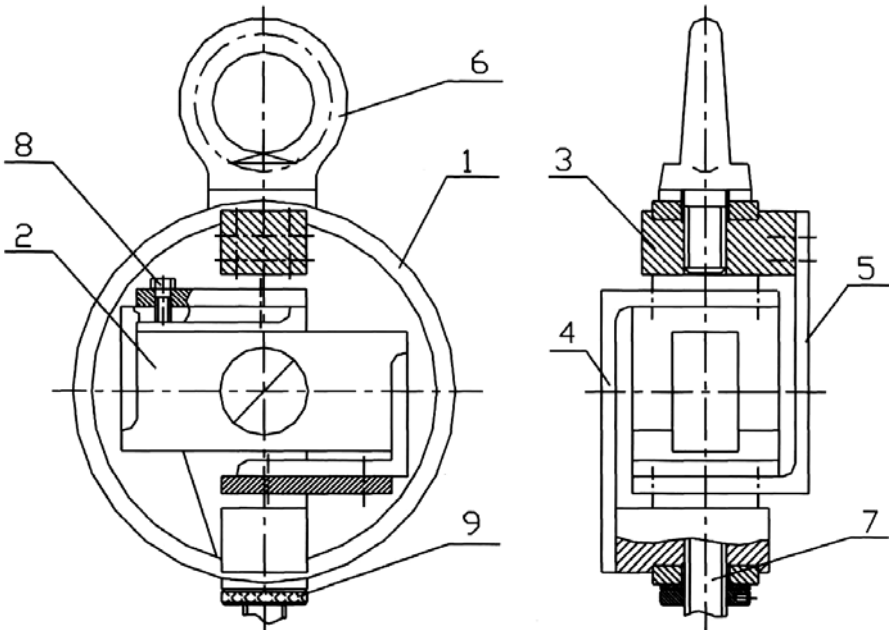


Рис. 1. Эскиз весоизмерительного устройства. Конструкция № 1

Fig. 1. The sketch of weight measuring devices. Scheme #1

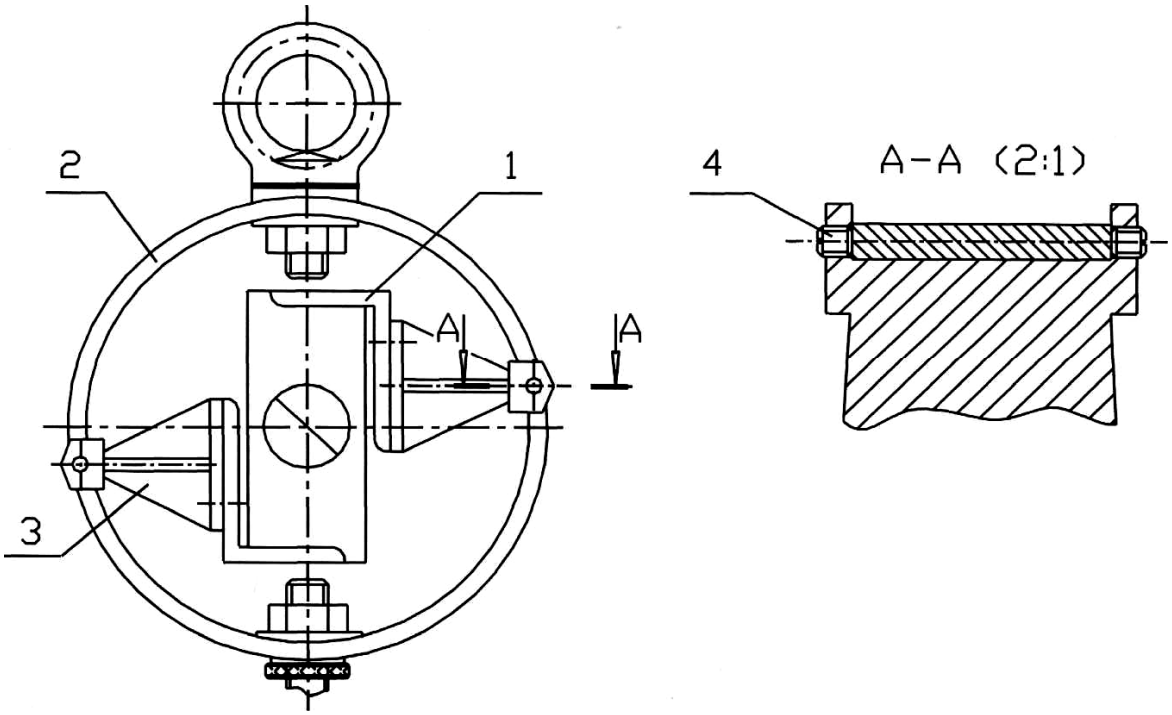


Рис. 2. Эскиз весоизмерительного устройства. Конструкция № 2

Fig. 2. The sketch of weight measuring devices. Scheme #2

Таблица 1

Метрологические характеристики струнного датчика

Максимальная нагрузка Рн, кг	15
Максимальный гистерезис в диапазоне 0–Рн, гр	не более 5
Выходной сигнал импульсной формы положительного полезного напряжения, не менее, В	3,5
Время готовности после включения, мин	3
Напряжение питания, В	+(5 + 0,2)
Масса, не более, кг	1,3

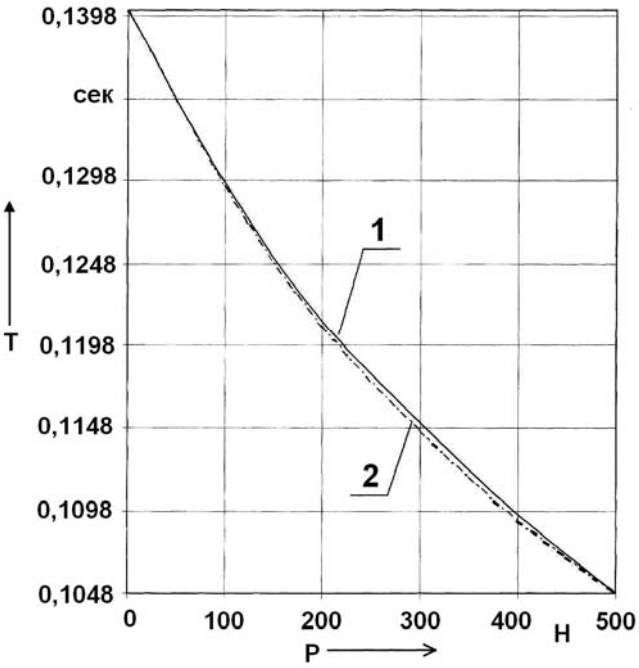


Рис. 3. Зависимость периода колебания струны датчика от величины приложенной силы:
1 – при нагружении; 2 – при разгружении

Fig. 3. Dependence of vibration period of measuring device hanger on the amount of applied force:
1 – when subjected to loadings; 2 – after unloading

При проведении исследований [10] весоизмерительного устройства мы уделяли особое внимание зоне минимальных нагрузок (от 0 до 50 кг), чтобы определить нижний предел чувствительности нашего прибора. Как уже отмечалось, струнный датчик обладает огромной чувствительностью (возможность регистрации приращения веса около 0,05 г), поэтому чувствительность весоизмерителя будет целиком определяться жесткостью упругого кольца. Результаты измерений приведены в табл. 2.

Полученные погрешности являются допустимыми, однако при хранении, транспортировании, использовании весоизмерителя правила его эксплуатации могут быть серьезно нарушены, что повлечет за собой появление уже недопустимых отклонений. Для определения наиболее слабых мест конструкции проведем проверочные расчеты упругого кольца.

Основную опасность могут представлять случаи нагружения устройства сверх положенного веса. Допускаемое напряжение [σ] находим с учетом коэффициента запаса в зависимости от режимов нагрузки (табл. 3):

$$[\sigma] = \frac{\sigma}{n_\sigma}.$$

Исходя из служебного назначения, выбираем второй режим нагружения, откуда получаем [σ] = 880/4 = = 220 МПа.

Рассчитаем максимальное напряжение в сечении выбранного кольца при приложении троекратной нагрузки:

$$\sigma = \frac{P}{F} = \frac{15000}{0,007 \cdot 0,04} = 53,57 \text{ МПа}.$$

Из расчета видно, что кольцо с принятыми параметрами выдерживает перегрузки, значительно превосходящие номинальное значение.

Однако необходим не только прочностной расчет элементов ВУ, но и проверка работоспособности струнного датчика при таком воздействии [11; 12]. Устройство, даже после возможной перегрузки, должно полностью сохранять все настройки, четко выполнять свое служебное назначение. Следовательно, требуется специальная проверка точностных характеристик устройства при подобном нарушении правил эксплуатации, потому что весоизмеритель может вообще выйти из строя как контрольно-измерительный прибор. Для определения работоспособности ВУ мы произвели нагружение разработанной конструкции сверх допустимого веса. Результаты нагружения представлены на рис. 4 в виде двух зависимостей: *1* – изменение периода колебаний струны от приложенной силы; *2* – изменение деформации УК от приложенной силы. Зона I – предел измерения весоизмерителя. Очевидно, что обе зависимости имеют практически линейный закон распределения. Некоторую нелинейность можно объяснить упругими несовершенствами материала упругого кольца.

Увеличение нагрузки (зона II) приводит к возрастанию погрешности измерения, снижает точность устройства. Превышение нагрузки на 70–80 % от верхнего предела измерения вызывает неустойчивую работу весоизмерителя, появляется вероятность сбоя, а при перегрузке более чем в ≈ 2,2 раза струнный датчик перестает работать, так как собственная частота струны начинает хаотично изменяться, и процессор просто не в состоянии ее обработать. Тем не менее, такие перегрузки не ведут к поломке устройства.

После снятия нагрузки и некоторого времени релаксации напряжений (порядка 15–25 с) весоизмеритель возвращается в свое первоначальное состояние без каких-либо отклонений.

Дальнейшее увеличение приложенной силы ведет к значительному росту величины гистерезиса и упругого последействия, а превышение в 2,8 раза может вывести струнный датчик из строя. Определим критическую величину деформации упругого кольца при растягивающей силе P = 15 000 Н:

$$\delta = \frac{B_\xi \cdot d_0^3}{b \cdot h^3 \cdot E} \cdot P = \frac{0,224 \cdot 0,137^3}{0,04 \cdot 0,007^3 \cdot 2,1 \cdot 10^{11}} \cdot 15000 = 2,79 \text{ мм},$$

где B_ξ – конструктивный коэффициент чувствительности; d_0 – внутренний диаметр кольца, мм; b – ширина кольца, мм; h – толщина кольца, мм.

Таблица 2

Характеристики силоизмерительного устройства на основе упругого кольца и струнного датчика. Конструкция № 1

Параметры	Значение
Предел измерения, кг	1,3–500
Минимальное регистрируемое приращение, кг	1–1,5
Максимально допустимая перегрузка, %	200
Максимальный гистерезис во всем диапазоне нагружения, не более, кг	5
Время затухания переходного процесса, с	1,2–1,6
Геометрические параметры упругого элемента, мм: средний диаметр, ширина, толщина	 137 40 7
Питание	Автономное
Напряжение питания, В	+(5 ± 0,2)
Выходной сигнал импульса полезного напряжения, не менее, В	3,5
Время готовности после включения, мин	3
Масса, не более, кг	5
Рабочий диапазон температур, °С	–30…+50

Таблица 3

Значения коэффициента запаса прочности при различных режимах нагрузки

Режим нагрузки	σ_η
Постоянная нагрузка	2–2,5
Пульсирующая	3–4
Знакопеременная	8–10

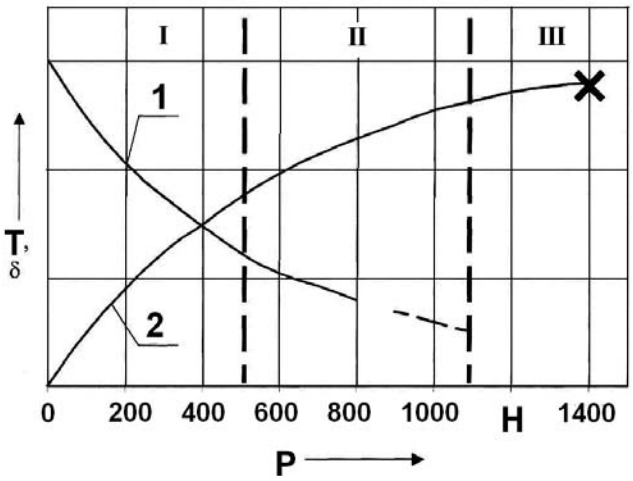


Рис. 4. Определение максимально допустимых напряжений

Fig. 4. Identifying of voltage capability

При перегрузке ВУ в сильной мере проявляются погрешности, определяющие точность устройства [13]. Значение гистерезиса достигает 9,4 %; смещение ноля функции достигает 0,05 мм. Эти погрешности имеют такую же природу, как и рассмотренные ранее, только в данном случае из-за критического увеличения приложенной силы величина их резко возрастает. Нами была также исследована разработанная конструкция № 2 универсального весоизмерителя. Отсутствие в этой конструкции стыков, работающих на растяжение и на сдвиг, несколько снижает данную составляющую погрешности измерения. Особенность исследования этой конструкции состояла в необходимости определения осей деформации, по которым должен устанавливаться струнный датчик, чтобы изменить пределы измерения ВУ, а также зоны нулевой деформации. Схематичное расположение этих элементов представлено на рис. 5.

Исследования проводились с учетом величины нормальной (0,5–0,6 мм) деформации упругого кольца, необходимой для устойчивой работы струнного датчика и максимального использования его возможностей.

Были выделены основные оси, установка по которым струнного датчика изменяет характеристики устройства в целом:

I – горизонтальная ось весоизмерителя (φ = 0 град);. необходимая деформация упругого кольца достигается при воздействии растягивающей силы 3000 Н;

II – значение φ равно 5–7 град, воздействующая сила P = 5000 Н;

III – значение φ равно 19–22 град, воздействующая сила P = 10 000 Н;

IV – значение (φ равно 43–47 град, воздействующая сила P = 15 000 Н;

V – ось нулевой деформации (φ = 52–53 град).

Более точные значения углов расположения осей будут рассчитаны при разработке процессора для универсального весоизмерителя.

Основные характеристики универсального весоизмерительного устройства приведены в табл. 4.

Возможность переустановки струнного датчика, несомненно, увеличивает область применения устройства, однако необходимо учесть, что его универсальность негативно скажется на чувствительности и точностных характеристиках.

Динамические характеристики весоизмерительного устройства на базе вторичного струнного датчика. Время затухания переходного процесса – величина, позволяющая охарактеризовать быстродействие [14; 15] весоизмерительного устройства. Безынерционность весоизмерителя является одним из основных показателей качества, поэтому при проектировании конструкций устройств были проведены исследования зависимости времени затухания переходного процесса от величины входного воздействия. Исследования проводились для двух режимов нагружения: 1 – плавное (на интервале 3–5 с) увеличение приложенной силы; 2 – ударное воздействие с последействием. На рис. 6 представлено графическое изображение колебательного периода первого устройства при различных значениях силовых воздействий.

Методика исследования [14] заключалась в том, что собранное силоизмерительное устройство нагружали растягивающей силой величиной 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 Н. Выходным параметром при этом измерении служит величина деформации УК.

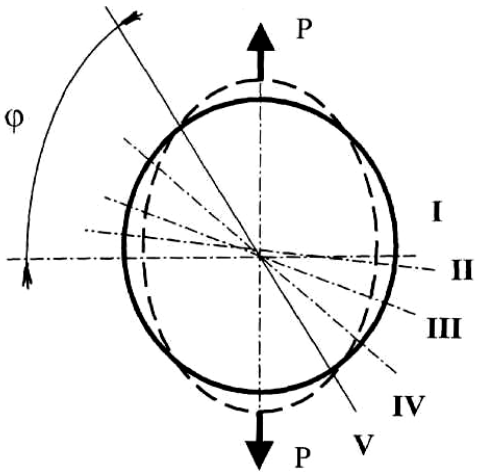


Рис. 5. Установочные оси в универсальном весоизмерителе

Fig. 5. Guiding stubs of flexible weight measuring device

Таблица 4

Характеристики универсального весоизмерителя

Параметры	Значения по осям установки			
	I	II	III	IV
Предел измерения, кг	1–300	1–500	5–1000	25–1500
Минимальное регистрируемое приращение, кг	0,9–1	1–1,2	5–6	23–27
Максимальный гистерезис, кг	3,5	5,2	7,4	14,7
Время затухания переходного процесса, с	5–6	4–5	1–2	1

При ударном силовом воздействии время успокоения и амплитуда колебания переходного процесса резко возрастают. На рис. 7 произведено сравнение времени затухания переходного процесса при статических и ударных (заштриховано) нагрузках.

Вторая конструкция весоизмерителя представляет собой более инерционную систему за счет меньшей жесткости упругого кольца. Этот универсальный весоизмеритель способен работать в различных диапазонах сил, причем, чем ниже верхний порог силы и у́же диапазон измерения, тем больше времени требуется системе, чтобы амплитуда затухающих колебаний стала меньше допустимой погрешности. На рис. 8 показано изменение времени затухания универсального ВУ в зависимости от угла расположения струнного датчика.

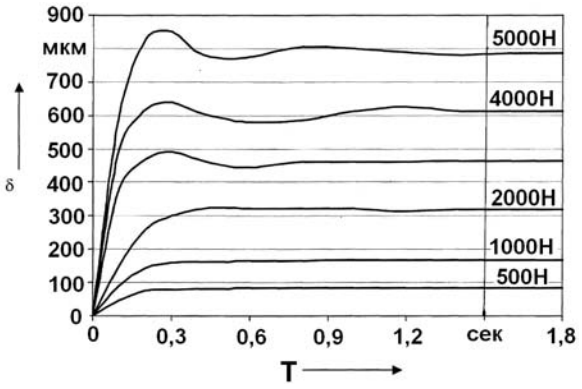


Рис. 6. Время затухания переходного процесса системы весоизмерительного устройства при различном силовом воздействии

Fig. 6. Decay time of transition process of weight measuring device under force impact

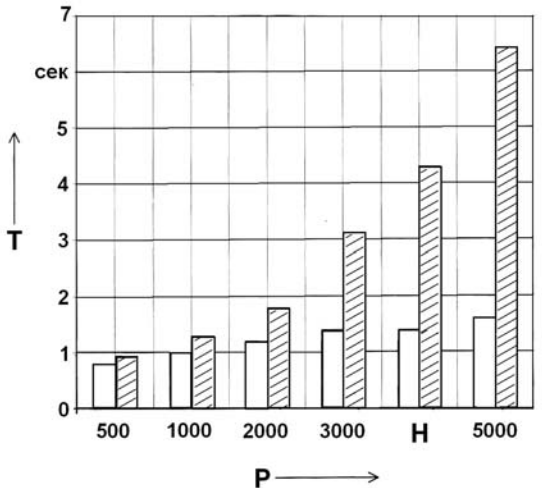


Рис. 7. Увеличение времени затухания переходного процесса при ударных нагрузках

Fig. 7. Increase of the decay time of transition process under impulse load

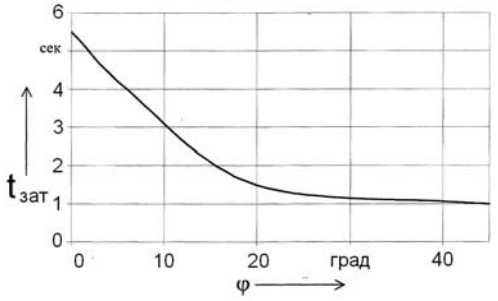


Рис. 8. Зависимость времени затухания переходного процесса универсального ВУ от угла установки φ

Fig. 8. Dependence of decay time of transition process of flexible weight measuring device on the angle of setting φ

Заключение. Проведенные исследования разработанных конструкций весоизмерительных устройств на основе кольцевого упругого элемента и вторичного струнного датчика подтвердили их работоспособность в широком диапазоне нагрузок. Отмечены высокая чувствительность и точность измерений. Вместе с тем показана негативная зависимость устройств от внешних возмущающих колебаний и относительно высокая инерционность, например, в сравнении с вторичным фотодатчиком.

Библиографические ссылки

1. Антонец И. В., Белов М. А. Динамометрические упругие элементы весоизмерительных устройств // Сборка в приборостроении и машиностроении. 2010. № 9. С. 35–41.
2. Сорокин Е. С. Метод учета неупругого сопротивления при расчете конструкций и колебаний. Исследования по динамике сооружений. М. : Стройиздат, 1951. 210 с.
3. Фионова А. В. Разработка конструкций, математических моделей и методов расчета силоизмерительных устройств кольцевого типа для автоматизации дозаторов : дис. канд. техн. наук. Ульяновск : УлГТУ, 2001. 198 с.
4. Справочник конструктора точного приборостроения / Г. А. Веркович [и др.] ; под общ. ред. К. Н. Явленского, Б. Л. Тимофеева. Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. 792 с.
5. Сотсков Б. С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники. М. : Высш. шк., 1970. 271 с.
6. Технология машиностроения (специальная часть) / А. А. Гусев [и др.] // М. : Машиностроение, 1986. 480 с.
7. Тихонов А. И., Кулагин Л. И. Функция преобразования кольцевых упругих элементов // Обработка информации в автоматических системах. Рязань : Рязанский радиотехнический институт, 1977. 286 с.
8. Фионова А. В., Антонец И. В., Рябов Г. К. Оптимизационный расчет силоизмерительных устройств с последовательной и параллельной работой колец // Прогрессивные методы проектирования технологических процессов, станков и инструментов : тез. докл. МНТК. Тула : ТулГТУ, 1997. 35 с.
9. Средства контроля, управления и измерения линейных и угловых размеров в машиностроении : отрасл. кат. / ВНИИ измерения. М. : ВНИИТЭМР, 1990. 180 с.
10. Тихонов А. И., Мокров Е. А. Перспективы совершенствования упругих элементов датчиков механических параметров // Измерительные элементы (датчики) информационно-измерительных систем, автоматизированных систем управления технологическими процессами и систем автоматизации. Саратов : Саратовский ун-т, 1979. 244 с.
11. Федоров В. В. Теория оптимального эксперимента. М. : Наука, 1971. 312 с.
12. Пономарев С. Д., Андреева Л. Е. Расчет упругих элементов машин и приборов. М. : Машиностроение, 1980. 326 с.
13. Феликсон Е. И. Упругие элементы приборов. М. : Машиностроение, 1977. 311 с.
14. Румшинский Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента. М. : Наука, 1971. 192 с.
15. Табаков В. П., Антонец И. В., Плетнев Д. А. Исследование системы упругих чувствительных элементов кольцевого типа методом конечных элементов // Известия Самарского НЦ РАН. Спец. выпуск. Четверть века изысканий и экспериментов по созданию уникальных технологий и материалов для авиаракетостроения УМТЦ–ФГУП ВИАМ. 2008. Т. 1. С. 240–246.

References

1. Antonets I. V. [Dynamometric spring elements of weight measuring device]. *Sborka v priborostroenii i mashinostroenii*. 2010, No. 9, P. 35–41 (In Russ.).
2. Sorokin E. S. *Metod ucheta neuprugogo soprotivleniya pri raschete konstruktsiy i kolebaniy. Issledovaniya po dinamike sooruzheniy* [The method of accounting for inelastic resistance in the calculation of structures and vibrations. Studies on the dynamics of structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1951, 210 p.
3. Fionova A. V. *Razrabotka konstruktsiy, matematicheskikh modeley i metodov rascheta siloizmeritel'nykh ustroystv kol'tsevogo tipa dlya avtomatizatsii dozatorov. Dis. kand. tekhn. nauk* [The development of designs, mathematical models and methods of calculation of force measuring ring-type devices for the automation of feeders. Cand. Diss.]. Ulyanovsk, UlGTU, 2001, 198 p.
4. Yavlenskogo K. N., Timofeeva B. L., *Spravochnik konstruktora tochnogo priborostroeniya* [Reference precision of instrument designer]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1989, 792 p.
5. Sotskov B. S. *Osnovy teorii i rascheta nadezhnosti elementov i ustroystv avtomatiki i vychislitel'noy tekhniki* [Fundamentals of the theory and calculation of reliability elements, and automation and computer technology devices]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1970, 271 p.
6. Gusev A. A., Koval'chuk E. R., Kolesov I. M. *Tekhnologiya mashinostroeniya (spetsial'naya chast')* [Technology of mechanical engineering (special part)] Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986, 480 p.
7. Tikhonov A. I. *Funktsiya preobrazovaniya kol'tsevykh uprugikh elementov* [Function transformation of ring elastic elements]. Ryazan, Ryazanskiy radiotekhnicheskiy institute Publ., 1977, 286 p.
8. Fionova A. V. *Optimizatsionnyy raschet siloizmeritel'nykh ustroystv s posledovatel'noy i parallel'noy rabotoy kolets* [Optimization account force measuring devices with serial and parallel operation of the Rings]. Tula, TulGTU, 1997, 35 p.
9. *Sredstva kontrolya, upravleniya i izmereniya lineynykh i uglovykh razmerov v mashinostroenii: Otrasl. kat* [Controls, management and measurement of linear and angular dimensions in mechanical engineering], *VNII izmereniya*. Moscow, VNIITEMR Publ., 1990, 180.
10. Tikhonov A. I. *Perspektivy sovershenstvovaniya uprugikh elementov datchikov mekhanicheskikh parametrov* [Prospects for improving the mechanical properties of the elastic elements of the sensors]. Saratov, Saratov Univ., 1979, 244 p.

11. Fedorov V. V. *Teoriya optimal'nogo eksperimenta* [The theory of optimal experiment]. Moscow, Nauka Publ., 1971, 312 p.

12. Ponomarev S. D. *Raschet uprugikh elementov mashin i priborov* [The calculation of the elastic elements of machines and devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980, 326 p.

13. Felikson E. I. *Uprugie elementy priborov* [Elastic elements of the devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977, 311 p.

14. Rumshinskiy L. Z. *Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov eksperimenta* [The mathematical processing of the experimental results]. Moscow, Nauka Publ., 1971, 192 p.

15. Tabakov V. P. [The research system of elastic sensitive ring-type elements of finite element method]. *Izvestiya Samarskogo NTs RAN. Spetsial'nyy vypusk. Chetvert' veka izyskaniy i eksperimentov po sozdaniyu unikal'nykh tekhnologiy i materialov dlya aviaraketostroeniya UMTTs–FGUP VIAM*. 2008, Vol. 1, P. 240–246 (In Russ.).

© Антонец И. В., Борсоев В. А.,
Кацура А. В., Степанов С. М., 2017

УДК 504.054+630.11

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 367–372

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОМПОНЕНТОВ РАКЕТНОГО ТОПЛИВА НА СОСТОЯНИЕ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ

М. Е. Баранов[1*], Л. А. Герасимова[1], С. В. Хижняк[2], П. А. Дубынин[1]

[1]Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[2]Красноярский государственный аграрный университет
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, просп. Мира, 90
[*]E-mail: pavel.dubynin@mail.ru

Объектом исследования стала сосна обыкновенная как биоиндикатор загрязненности почвы с зоны хранения компонентов ракетного топлива (КРТ) одной из ракетных воинских частей. Установлено, что уровни радиации (мощность экспозиционной и эквивалентной доз внешнего гамма-излучения, уровни альфа- и бета-полей, удельная активность радионуклидов, в том числе техногенного цезия-137) на объекте соответствуют фоновым показателям. По показаниям войскового прибора химической разведки содержание КРТ на отдельных пробных площадках составляет 0,001 мг/л, что соответствует уровню «Опасно». На почве в специальных сооружениях присутствуют видимые следы проливов технических жидкостей, а в воздухе имеет место специфический запах. Химически загрязненные арматуры, строительный мусор, остатки ёмкостей и специальные сооружения находятся в брошенном состоянии. В связи с этим требуется проведение рекультивации данной территории. При проведении работ по детоксикации и реабилитации почв необходимо учитывать ярко выраженную пространственную неравномерность уровня остаточной загрязнённости. Для расчета объёма и технологии работ рекомендуется провести микробиологический анализ грунта и составить детальную карту фитотоксичности. При составлении карты фитотоксичности рекомендуется учитывать следующий комплекс показателей: процентное и качественное отношение подверженных некрозу и хлорозу образцов хвои.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, некроз, хлороз, компоненты ракетного топлива, биоиндикатор.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 367–372

INVESTIGATION OF IMPACT OF ROCKET FUEL COMPONENTS ON THE CONDITION OF SCOTCH PINE

M. E. Baranov[1*], L. A. Gerasimova[1], S. V. Khizhnyak[2], P. A. Dubynin[1]

[1]Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[2] Krasnoyarsk State Agrarian University
90, Mira Av., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation
[*]E-mail: pavel.dubynin@mail.ru

The object of the study was the Scotch pine, as a bioindicator of soil contamination from the storage area of MCT (rocket fuel components) and missile military units. It has been established that the radiation levels (exposure and equivalent dose of external gamma radiation, alpha and beta-field levels, specific activity of radionuclides, including technogenic cesium-137) at the facility correspond to background indicators. According to the indications of the military chemical reconnaissance device, the content of MCT in the individual test sites is 0.001 mg / l, which corresponds to the level of "Danger". On the soil in special facilities there are visible traces of spills of technical fluids, and in the air there is a specific smell. Chemically contaminated fittings, construction debris, remnants of containers and special structures are in abandoned condition. In this connection, reclamation of the given territory is required. When carrying out work on detoxification and rehabilitation of soils, it is necessary to take into account the pronounced spatial unevenness of the level of residual contamination. To calculate the volume and technology of the work, it is recommended to carry out a microbiological soil analysis and make a detailed map of phytotoxicity. When compiling a phytotoxicity map, the following set of indicators are recommended to be taken into account: interest and quality concerning exposed to necrosis and chlorosis of the samples of pine needles.

Keywords: pinus sylvestris, necrosis, chlorosis, propellant component, bioindicator.

Введение. Проблема рекультивации участков земли, загрязненных компонентами ракетного топлива (КРТ), где до недавнего времени располагались ракетные соединения, становится особенно острой, если эти земли предназначаются впоследствии для использования в сельскохозяйственной отрасли [1]. Сложный химический состав КРТ приводит к ряду экологических проблем, связанных с изменением микробиологических свойств почвы и воды, а также к тому, что растительному и животному миру наносится большой ущерб [2; 3]. Большинство компонентов ракетного топлива очень токсичны, и их попадание в окружающую среду сопровождаются отравлением почвы и воздуха в районе пролива [4; 5].

В период с 2003 по 2010 год представителями агентства природопользования Красноярского края, а также представителями Росприроднадзора на объекте были проведены различного рода исследования, направленные на оценку экологического состояния биообъекта в районе поселка Кедровый Красноярского края (Россия). Многие из них были проведены с целью последующей рекультивации почвы и очистки ее от остатков проливов КРТ. Специалистами подрядной организации МО РФ ЗАО «Промтекон» в 2008 году был разработан проект технической рекультивации нарушенных земель, проведено его согласование, государственная экологическая экспертиза [6]. По состоянию на 2015 год концентрация НДМГ внутри сооружений превышает ПДК в 50 раз, а на прилегающей территории – в 10 раз [7]. Из-за недостаточного финансирования со стороны Министерства обороны, рекультивация зоны хранения КРТ не проведена. В результате этого на территории бывшей ракетной части находятся бесхозные сооружения, имеющие аварийное состояние [8].

В данной статье рассмотрены вопросы оценки жизненного состояния лесных культур сосны обыкновенной в пригородной зоне поселка Кедровый Красноярского края. В качестве основных параметров выбраны поражения образцов хвои некрозом и хлорозом. С помощью визуального осмотра произведен подсчет пораженных образцов собранных хвоинок, по побегам 2015 и 2016 годов [9].

Наиболее удобными для оценки состояния окружающей среды являются растения, так как они осуществляют более интенсивный газообмен по сравнению с человеком и животными, обладают более высокой чувствительностью и стабильностью ответной реакции на действие различных внешних факторов [10].

Для оценки последствий техногенеза необходимо выявить показатели, адекватно отображающие состояние окружающей среды. Такими показателями будут являться сравнения процентного отношения пораженных некрозом и хлорозом образцов хвои, находящихся на точках в зонах возможных проливов КРТ, к общему числу исследуемой хвои.

При исследовании состояния окружающей среды многими учеными используется в качестве биоиндикатора сосна обыкновенная (Pinus silvestris L.), так как она является видом, реагирующим на загрязнение среды обитания продуктами техногенеза [11]. Этот фитоиндикатор широко распространен на всей территории Красноярского края, произрастает как на сухих песках, так и в условиях избыточной влажности. В связи с этим сосна обыкновенная представляет собой удобный объект для биоиндикации уровня загрязнения в любом районе Красноярского края.

Таким образом, в настоящее время сосна как биоиндикатор изучается в основном для определения аэрогенных загрязнений. Нами была предпринята попытка использования сосны как индикатора зараженных КРТ почв [12].

Объект и методы исследований. Объектом исследования была выбрана территория, предназначенная для хранения компонентов ракетного топлива одной из сокращённых ракетных дивизий ракетных войск стратегического назначения, и прилежащие к ней площади, расположенные в непосредственной близости к районам, подверженным возможному проливу КРТ. Зона хранения представляет собой участок местности 7000 м^2 с, на котором расположены типовые для данных объектов сооружения: сооружение № 1 – хранилище НДМГ (рис. 1); сооружение № 2 – станция очистки; сооружение № 3 – станция нейтрализации; сооружение № 4 – хранилище амила (окислителя); сооружение № 5 – лаборатория. Для подвоза компонентов ракетного топлива имеется ж/д ветка, также оборудованы технологические площадки для стоянки топливозаправщиков [13].

Наиболее распространенной древесной формой, расположенной на исследуемых территориях вблизи к зонам возможных проливов, является сосна обыкновенная (Pinus silvestris L.), которая и стала объектом исследований [14]. Для реализации намеченных целей в августе 2016 года на территориях, близких к местам предполагаемых проливов КРТ, были собраны образцы хвои (побеги 2016 и 2015 годов). Образцы были взяты с двух деревьев на каждой из девяти площадок площадью 10 х 10 м, на удалении 50 м друг от друга. Контрольная площадка располагается в пяти километрах от объекта исследования [15]. Расположение площадок указано на схеме (рис. 2).

Относительное положение каждого дерева на местности и его морфологические показатели представлены в таблице.

Средние значения морфометрических показателей определяли при камеральной обработке данных. Все материалы обработаны статистически по общепринятой методике [16].

Результаты исследования. После ликвидации воинской части сложилась неблагоприятная экологическая обстановка ввиду неконтролируемых проливов КРТ. Исследование морфометрических показателей P. silvestris L. показало, что максимальная подверженность хлорозу и некрозу была выявлена на образцах площадок № 3, 4, 6, 8. Средние показатели повреждений различных классов представленны в форме диаграмм (рис. 3, 4).

Для определения статистической значимости различия между образцами исследования и образцами с контрольной точки использовался критерий хи-квадрат [17].

На всех участках отмечено статистически значимое (от $p = 0{,}05$ до $p < 0{,}001$) поражение хвои объекта

исследования относительно контроля. При этом наблюдается статистически значимая (p < 0,001) географическая неравномерность в фитотоксичности (рис. 5).

Рис. 1. Хранилище НДМГ (фото авторов)

Fig. 1. Storage of NDMG (authors' photo)

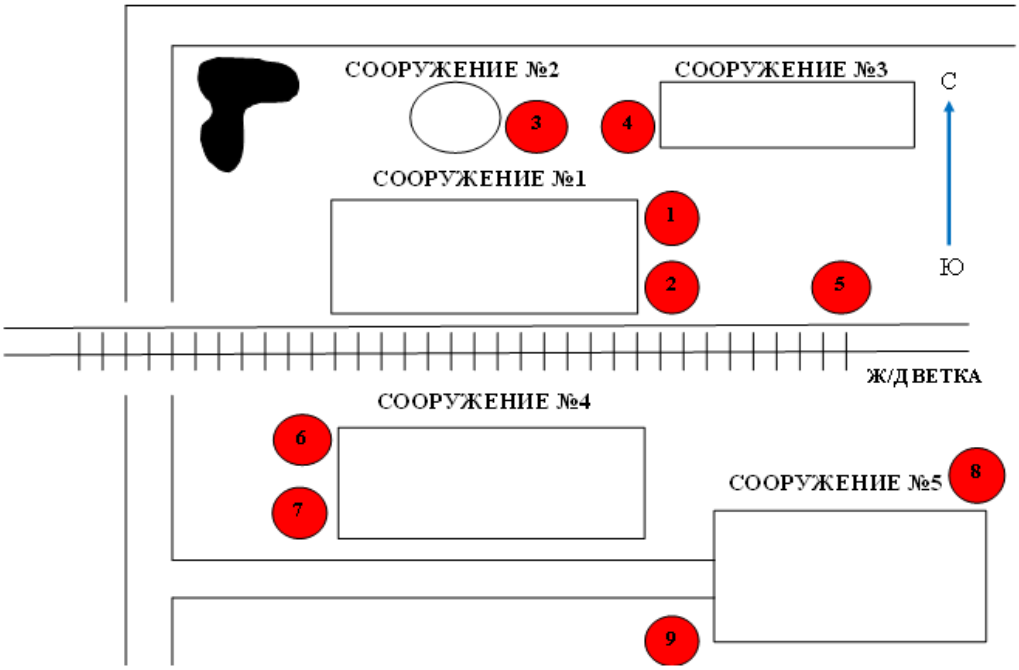


Рис. 2. Схема зоны хранения КРТ, расположение на ней площадок сбора образцов

Fig. 2. Scheme of KRT storage zone, location of sites of collection of samples

Морфологические показатели сосны обыкновенной (Pinus silvestris L.)

№ точки	Высота дерева, м	Диаметр ствола, м	Диаметр кроны, м	Высота сбора, м	Расстояние до ближайшего здания, м	Расстояние до соседнего здания, м	Расстояние до дороги, м
1	10,00	0,35	4,5–5	1–1,5	1,00	20,00	1,00
	8,00	0,33	4,3–4,5	1–1,5	2,00	21,00	2,00
2	8,00	0,27	4,00	1–1,5	17,00	14,00	2,00
	11,00	0,50	6,5–7				

Окончание таблицы

№ точки	Высота дерева, м	Диаметр ствола, м	Диаметр кроны, м	Высота сбора, м	Расстояние до ближайшего здания, м	Расстояние до соседнего здания, м	Расстояние до дороги, м
3	12,00	0,70	6,00–7,00	1–1,5	24,00	50–55	1–1,5
	9,00	0,54	6,00				
4	5,00	0,20	2,00	1–1,5	60,00	10,00	10,00
	8,5	0,47	6,00	1–1,5	63,00	12,00	14,00
5	4,00–5,00	0,20	1,50	1,00	30,00	50,00	10,00
	5,00	0,18	1,70	1–1,5	33,00	52,00	12,00
6	5,00	0,30	2,50	1,50	25,00	10,00	7,00
	6,00	0,23	2,7	1–1,5	26,50	13,5	10,00
7	3,00	0,20	1,50	1,00	55,00	2,00	15,00
	5,5	0,22	2,45	1–1,5	47,00	4,00	16,50
8	5,0–7,0	0,25	3,5–4,5	1,00	Деревья расположены непосредственно на хранилище в грунте		
	4,5–6,5	0,25	3–4	1–1,5			
9	8,00	0,30	5,50	1,00	70,00	0,00	50,00
	7,00	0,28	5,00	1–1,5	71,5	0,00	43,50

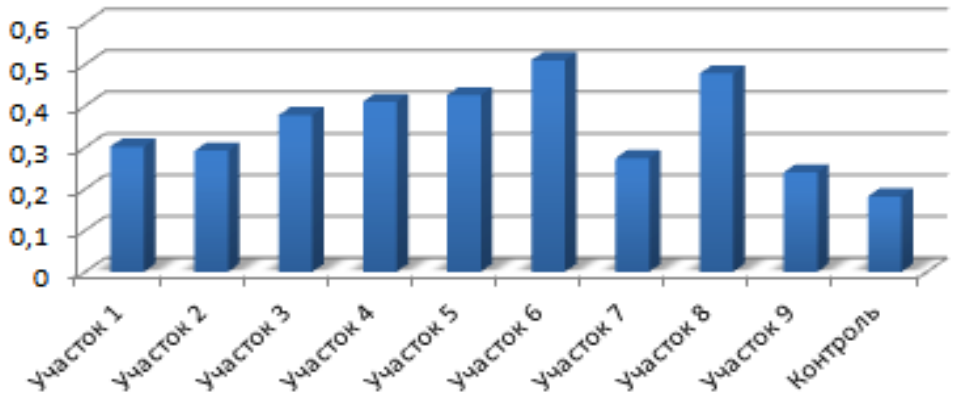


Рис. 3. Процент пораженных образцов хвои (побеги 2015 г.)

Fig. 3. Percentage of affect of needle samples (sprouts of 2015)

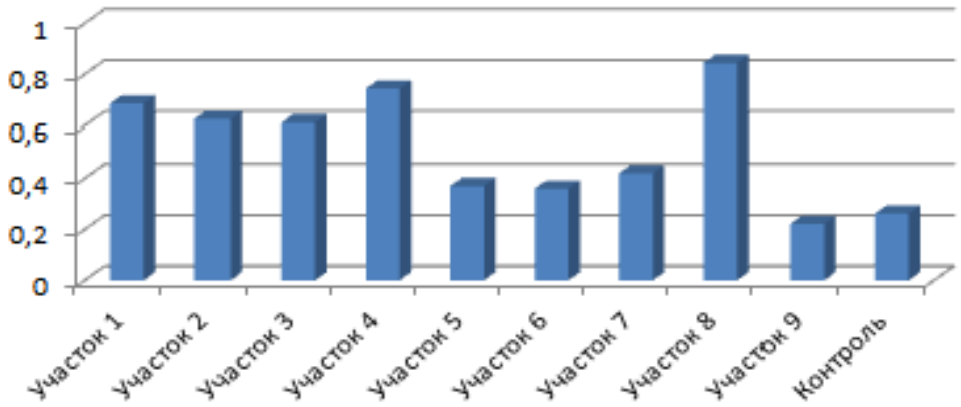


Рис. 4. Процент пораженных образцов хвои (побеги 2016 г.)

Fig. 4. Percentage of affect of needle samples (sprouts of 2016)

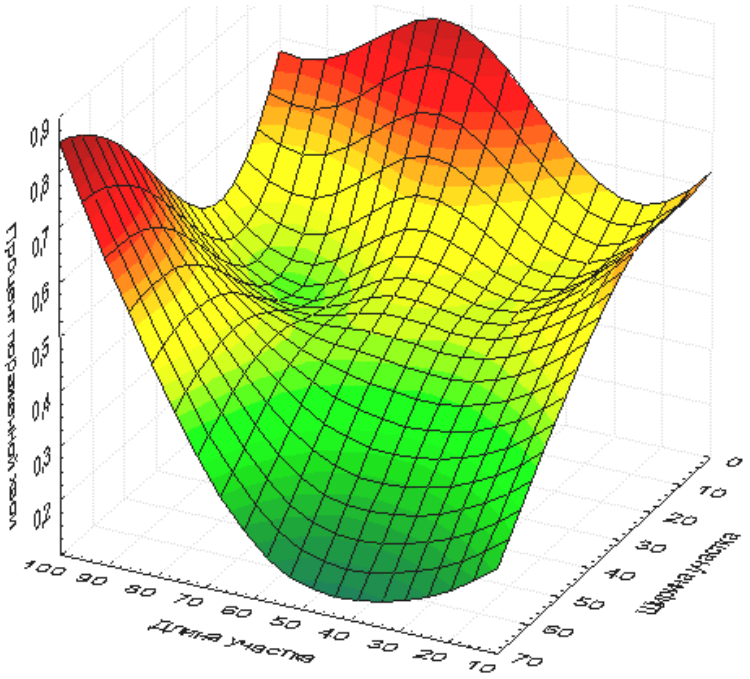


Рис. 5. Карта фитотоксичности грунта на исследуемом объекте (цифрами по вертикальной оси показан % пораженной хвои относительно контроля, по горизонтальным осям показано расстояние от крайней юго-западной точки участка)

Fig. 5. The map of phytotoxicity of priming stain on the researched object (vertically – % affect of needle related to the control, horizontally – destination from the end south-west point of the sector)

Таким образом, можно констатировать, что остаточное химическое загрязнение на исследуемом объекте носит ярко выраженный неравномерный характер. При этом неравномерность загрязнения лишь частично связана с привязкой к конкретному сооружению. Это говорит о том, что в ходе работ по демонтажу оборудования имели место аварийные проливы КРТ. В связи с этим следует рекомендовать проведение комплекса мероприятий по рекультивации данной территории без привязки к конкретным сооружениям.

Заключение:

1. После ликвидации воинской части в районе поселка Памяти 13 Борцов Емельяновского района Красноярского края из-за попадания в почву значительного количества КРТ сложилась неблагоприятная экологическая обстановка, что нашло своё отражение на морфологических показателях сосны обыкновенной (Pinus silvestris L.).

2. Остались бесхозным специальные сооружения, строительный мусор, остатки емкостей, топливной арматуры с химическими загрязнениями. В этой связи требуется проведение рекультивации данной территории.

3. При проведении работ по детоксикации и реабилитации почв необходимо учитывать ярко выраженную пространственную неравномерность уровня остаточной загрязнённости.

4. Для расчета объёма и технологии работ рекомендуется провести микробиологический анализ грунта и составить детальную карту фитотоксичности.

5. С учётом возможной миграции НДМГ следует провести химический мониторинг прилегающих территорий и реки Качи.

Библиографические ссылки

1. Артамонов В. И. Растения и чистота природной среды. М. : Наука, 1986. 172 с.

2. Ковылина О. П., Зарубина И. А., Ковылин А. Н. Оценка жизненного состояния сосны обыкновенной в зоне техногенного загрязнения // Хвойные бореальной зоны. 2008. № 3. С. 284–289.

3. Федорова А. И., Никольская А. Н. Практикум по экологии и охране окружающей среды. М., 2001. 288 с.

4. Большаков Г. Ф. Химия и технология компонентов жидкого ракетного топлива. Л. : Химия, 1983. 320 с.

5. Ермаков Е. И., Попова Г. Г., Петрова З. М. Влияние несимметричного диметилгидразина на состояние почвенно-растительной системы // Экологические аспекты воздействия компонентов жидких ракетных топлив на окружающую среду : мат. науч.-практ. конф. СПб. : РНЦ «Прикладная химия», 1996. С. 15–19.

6. Справочник по токсикологии и гигиеническим нормативам (ПДК) потенциально опасных химических веществ / под ред. В. С. Кушневой и Р. Б. Горшковой. М. : ИздАт, 1999. 272 с.

7. Анализ экологической обстановки на объектах хранения ракетного топлива / М. Е. Баранов [и др.] // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17, № 4. С. 1044.

8. Седова Г. И., Глебова Л. Ф. К методике оценки загрязнения почвы компонентами ракетных топлив // Бюллетень токсикологии, гигиены и профпатологии ракетных топлив. 1978. № 31. С. 84.

9. Седова Г. И., Коваленко И. В. К вопросу о стабильности НДМГ в подзолистой супесчаной почве // Бюллетень токсикологии, гигиены и профпатологии ракетных топлив. 1976. № 23. С. 163.

10. Сергейчик А. Растения и экология. Минск : Урожай, 1997. 224 с.

11. Захаров В. М. Здоровье среды. М. : ЦЭПР, 2000. 65 с.

12. Независимый экологический мониторинг состояния окружающей природной среды вокруг центра ликвидации межконтинентальных баллистических ракет / В. Ф. Занозина [и др.] // Экологические проблемы промышленных городов : сб. науч. тр. по материалам 6-й Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Саратов, 2013. Ч. 1. С. 192–194.

13. Комплексная экологическая оценка районов падения отделяющихся частей ракет-носителей на полигоне Плесецк / А. Б. Бушмарин [и др.] // Экологические аспекты воздействия компонентов жидких ракетных топлив на окружающую среду : материалы науч.-практ. конф. СПб. : РНЦ «Прикладная химия», 1996. С. 5–8.

14. Алексеев В. А. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. Л. : Наука. Ленингр. отд-ние, 1990. 197 с.

15. Анализ экологической обстановки на объектах эксплуатации ракетно-космической техники Министерства обороны Российской Федерации / А. Г. Кучкин [и др.] // Вестник СибГАУ. 2012. № 2(42). С. 91–95.

16. Павлов Н. В., Смольянов А. С., Вайс А. А. Математические методы в лесном хозяйстве / СибГТУ. Красноярск, 2005. 192 с.

17. Черненькова Т. В. Методика комплексной оценки состояния лесных биогеоценозов в зоне влияния промышленных предприятий // Пограничные проблемы экологии : сб. науч. тр. Свердловск : УНЦ АНССР. 1986. С. 116–127.

References

1. Artamonov V. I. *Rasteniya i chistota prirodnoy sredy.* [Plants and the purity of the natural environment]. 1986. Moskow Nauka Pabl. P.172.

2. Kovylina O. P., Zarubina I. A., Kovylin A. N. [Assessment of the vitality of Scots pine in the area of technogenic pollution]. *Hvojnye boreal'noj zony* No. 3, Krasnoyarsk, 2008, P. 284–289 (In Russ.).

3. Bol'shakov G. F. *Himiya i tekhnologiya komponentov zhidkogo raketnogo topliva* [Chemistry and technology of components of liquid rocket fuel]. Leningrad : Himiya Pabl, 1983, 320 p.

4. Ermakov E. I., Popova G. G., Petrova Z. M. [The influence of the asymmetrical dimethylhydrazine on the condition of the soil-plant system]. *Ekologicheskie aspekty vozdejstviya komponentov zhidkih raketnyh topliv na okruzhayushchuyu sredu. Mat. nauchno-praktich. konf.* [Ecological aspects of the impact of liquid rocket fuel components on the environment] St. Petersburg. RNC Prikladnaya himiya, 1996, P. 15–19 (In Russ.).

5. Kushneva V. S, Gorshkova R. B. *Spravochnik po toksikologii i gigienicheskim normativam (PDK) potencial'no opasnyh himicheskih veshchestv* [Handbook of toxicology and hygienic standards (Mac) of potentially hazardous chemicals]. Moskow. IzdAt Pabl, 1999, 272 p.

6. Baranov M. E., Gerasimova L. A., Gerasimova V. E., Khizhnyak S. V. [Analysis of the ecological situation at the sites of storage of rocket fuel]. *Vestnik SibGAU.* 2016, Vol. 17, No 4. P. 1044. (In Russ)

7. Sedova G. I., Glebova L. F. [The methodology for the assessment of soil pollution by components of rocket fuels]. *Byulleten' toksikologii, gigieny i profpatologii raketnyh topliv.* 1978, No 31, P. 84 (In Russ.).

8. Sedova G. I., Kovalenko I. V. [To the question about the stability of UDMH in podzolic sandy loam soil]. *Byulleten' toksikologii, gigieny i profpatologii raketnyh topliv.* 1976, No 23, P. 163 (In Russ.).

9. Sergejchik S. A. *Rasteniya i ehkologiya* [Plants and ecology]. Minsk, Urozhay Publ., 1997, 224 p.

10. Zaharov V. M. *Zdorov'e sredy* [The health of the environment]. Moskow : CEHPR Publ., 2000, 65 p.

11. Zanozina V. F., Hmeleva M. V., Samsonova L. E., Zorin A. D., Goryacheva N. M., Markova M. L., Gareev D. R. [Independent environmental monitoring of the environment around center for the elimination of Intercontinental ballistic missiles]. *Ekologicheskie problemyi promyishlennyih gorodov* [Ecological problems of industrial cities] *Sb. nauchn. trudov. Saratov,* 2013. P. 192–194 (In Russ).

12. Bushmarin A. B., Laskin B. M., Pimkin V. G., Solov'ev V. V., Careva O. A. [Integrated environmental assessment of areas separating from parts of rockets at the site "Plesetsk"]. *Materialy nauchn. prakt. konf. "Ehkologicheskie aspekty vozdejstviya komponentov zhidkih raketnyh topliv na okruzhayushchuyu sredu". S-Pb. : RNC "Prikladnaya himiya"* [Ecological aspects of the impact of liquid rocket fuel components on the environment] 1996. P. 5–8. (In Russ.).

13. Alekseev V. A. *Lesnye ekosistemy i atmosfernoe zagryaznenie* [Forest ecosystems and atmospheric pollution.]. 1990. Moskow. Nauka Pabl. P. 197.

14. Kuchkin A. G., Hizhnyak S. V., Muchkina E. Ya., Baranov M. E., Anpilogov V. N. [Analysis of the environmental situation at the sites of operation of rocket and space technology of the Ministry of defence of the Russian Federation]. *Vestnik SibGAU.* 2003, No. 2(42), P. 91–95 (In Russ.).

15. Pavlov N. V. Smol'yanov A. S. Vays A. A. *Mathematical methods in forestry* [Mathematical Methods in Forestry] 2005. Krasnoyarsk. SibGTU, P.192.

16. Chernen'kova T. V. [The method of complex assessment of the state of forest biogeocenosis in the zone of influence of industrial enterprises] *Pogranichnye problemy ekologii* [Borderline problems of ecology]. Sb. nauchn. trudov. Sverdlovsk : UNTs ANSSR. 1986. P. 116–127. (In Russ.).

© Баранов М. Е., Герасимова Л. А.,
Хижняк С. В. Дубынин П. А., 2017

UDC 528.8.04

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 373–378

RESEARCH OF RADIATION AND RADAR CHARACTERISTICS OF A GROWING ICE COVER

A. A. Gurulev*, S. V. Tsyrenzhapov, Y. V. Kharin

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS
16a, Nedorezova Str., Chita, 672014, Russian Federation
*E-mail: lgc255@mail.ru

Remote methods of monitoring terrestrial and water objects in the microwave range, both active and passive, are widely used at present. One of such objects is the ice cover, which is associated with the development of the Arctic and the Subarctic, as well as in connection with the climate change on the planet. For this reason, knowledge of the radiation and scattering characteristics of the ice cover in the microwave range is an urgent task. In this paper, we describe a technique for the simultaneous measurement of the radiothermal radiation and the backscattering coefficient of the growing ice cover. The technique is that measurements are made alternately of the power of the radiothermal radiation and the power of backscattering from the medium under study, and the radiation is received on the same horn antenna. Receiving of electromagnetic radiation was carried out using a microwave radiometer on two linear polarizations: horizontal and vertical. The switching time between the active and passive measurements was 10 minutes. Measurements of the radar and radiative characteristics of the growing fresh ice cover at a wavelength of 2.3 cm have been performed. It is shown that the active and passive radiolocation of the investigated object carries a complementary information. Radiometric measurements show interference, which is associated with a change in the thickness of the ice cover. Active radar methods record inhomogeneities comparable to the wavelength, which was confirmed in this paper, using the example of ice cover. This method of research (simultaneous measurements of the radiation and scattering properties of the medium in the microwave range) can be used at various objects where quasistatic processes are observed, for example, when measuring vegetation, drying, freezing or moistening of the soil cover, etc.

Keywords: ice cover, microwave range, radiometry, radar studies, ice-water phase transition.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 373–378

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ И РАДАРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСТУЩЕГО ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

А. А. Гурулев*, С. В. Цыренжапов, Ю. В. Харин

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН
Российская Федерация, 672014, г. Чита, ул. Недорезова, 16а
*E-mail: lgc255@mail.ru

Дистанционные методы наблюдения за земными и водными объектами в СВЧ-диапазоне, как активные, так и пассивные, широко используются в настоящее время. Одним из таких объектов является ледяной покров, что связывается с освоением Арктики и Субарктики, а также в связи с изменением климата на планете. По этой причине знание радиационных и рассеивающих характеристик ледяных покровов в микроволновом диапазоне является актуальной задачей. Описывается методика по одновременному измерению собственного радиотеплового излучения и коэффициента обратного рассеяния растущего ледяного покрова. Методика заключается в том, что попеременно производятся измерения мощности радиотеплового излучения и мощности обратного рассеяния от исследуемой среды, причем прием излучения осуществляется на одну и ту же рупорную антенну. Прием электромагнитного излучения осуществлялся с помощью СВЧ-радиометра на двух линейных поляризациях: горизонтальной и вертикальной. Время переключения между активным и пассивным режимом измерений составляло 10 минут. Выполнены измерения излучательных и радарных характеристик растущего пресного ледяного покрова на длине волны 2,3 см. Показано, что активная и пассивная радиолокация исследуемого объекта несет в себе взаимодополняющую информацию. При радиометрических измерениях проявляется интерференция, которая связывается с изменением толщины ледяного покрова. Активные методы радиолокации фиксируют неоднородности, сравнимые с длиной волны, что было подтверждено в данной статье на примере ледяного покрова. Данную методику исследований (одновременные измерения радиационных и рассеивающих свойств среды в микроволновом диапазоне) можно использовать на различных объектах, где наблюдаются квазистатические процессы, например, при измерениях растительного покрова, иссушения, промерзания или увлажнения почвенных покровов и др.

Ключевые слова: ледяной покров, микроволновый диапазон, радиометрия, радарные исследования, фазовый переход «лед–вода».

Introduction. Current methods of remote monitoring of the Earth from space require brand new knowledge about radiation and scattering properties of the underlying terrain in the microwave range. Using the systems with the synthetic aperture in active radio-sounding methods enables to identify properties of the natural objects spatial resolution by an order of magnitude of two meters [1]. The resolution is thousands times worse by the passive radiolocation [2]; yet, it is widely used for problem solving for a variety of reasons [3; 4]. It is related to the fact that by simultaneous use of the active and passive radiolocation much more information about the targets can be obtained. In the paper [5] it is shown by the example of the ice cover of a fresh eutrophic lake that radar and radiometric measurements enable to reveal different kinds of inclusions such as gas bubbles, frosted higher aquatic vegetation etc. Moreover, the investigation is carried out with the use of the orbital satellite, aircraft and vehicular equipment for closer spatial resolution and correct data comparison. In the paper it is also shown [6] that by simultaneous active and passive methods of the sea ice investigation, high-level accuracy of the arctic ice cover relative area can be reached. Knowledge of the radar and radiative surface characteristics is an urgent task for more effective interpretation of the data obtained by using remote methods of investigation in the microwave range. This can be achieved by the common application parameters (antenna directivity diagram, angle of sounding diagram, pattern parameters diagram). There are series of objects whose parameters change over time. They include the growing ice cover. The growth of ice cover is a quasistatic process i. e. its characteristics change relatively slowly over time [7]. Investigating the radar and radiative properties of a given object, measurements can be taken by alternating between the active and passive methods of investigation.

For more informative value it makes sense to take measurements alternatively on two linear polarizations: horizontal and vertical. However, geometrical configuration of measuring system remains constant and it enables to measure the radar and radiative characteristics of the investigated object almost at the same time.

Thus, it will likely be possible that simultaneous measurements of the radar and radiative characteristics of different media in the microwave range whose parameters change relatively slowly over time, for example, freezing soil cover, growing ice or vegetation is an urgent task. In this paper a method of simultaneous measurement of the medium radar and radiative characteristics without changing antenna parameters, geometrical configuration of application and patterns through the example of the growing ice cover is provided.

The measurement technique. We used a setup to measure characteristics of the growing ice cover alternately. Its schematic is on the fig. 1. A radiometer *2* and a Gunn diode oscillator *3* were set on the flat surface. The microwave radiometer enabled to take radiometric measurements on four linear polarizations at an angle of 45° relative to one another. To minimize the influence of the generator on the radiometer because of lower beams of the sending and receiving antennas a screen *5* was put between the devices. The experiments proved that the operating generator does not influence the receiving microwave module in active measurement mode. A photo of the experimental unit is presented in fig. 2. The measuring instruments were set at an observation angle (α) to the test medium. The devices operated at a frequency of 13 GHz in the experiment.

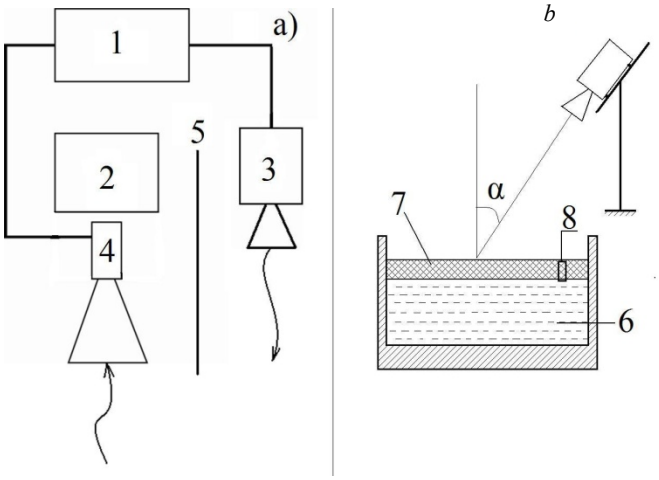


Fig. 1. Schematic of the experimental setup:
a – top view: *1* – control unit; *2* – microwave radiometer; *3* – microwave generator; *4* – electronic attenuator; *5* – the screen; *b* – side view: *6* – container with water; *7* – growing ice cover; *8* – sensors for ice thickness and temperature

Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
а – вид сверху: *1* – блок управления; *2* – СВЧ-радиометр; *3* – СВЧ-генератор; *4* – электронный аттенюатор; *5* – экран; *б* – вид сбоку: *6* – резервуар с водой; *7* – растущий ледяной покров; *8* – датчики толщины льда и температуры

The measurement technique can be described in the following way. As the process of ice cover growth takes much time, the active and passive radar measurements of the growing ice cover can be taken alternately at 10 min intervals. During the experiment the generator was switched on and off every 10 min. When it was switched on, an attenuator was triggered in the ingress path of the radiometer with attenuation 25 dB and it made the signal recording impossible . By switching off the generator and the attenuator the radiometric measurement mode was on. The radiation was realized on the vertical polarization and the reception was carried on the four linear polarizations: horizontal, vertical and at angles of 45° relative to the vertical plane at one minute intervals. The output signal recording was performed by the Agilent information gathering system. At the same time the generator and the growing ice thermodynamic temperature radiating power were recorded.

The radiometer was calibrated against the intrinsic thermal radiation of the cold sky reflected from the metal sheet and the ideal radiator with the known thermodynamic temperature [8]. Both the metal sheet and the ideal radiator had the same geometric dimensions.

Water was poured into the wooden case with the foam thermal insulation covering the inside surface to ensure the even ice cover. Measurements were taken in winter so that cooling action was naturally caused by sub-zero air temperature. Taking into account that the Transbaikal air is quite frozen out and cloudless, its impact on the brightness temperature is deemed negligible. Measurements were taken by cloudless days.

By using the measurement technique as described above, we took measurements of radiation and scattering characteristics of the growing fresh ice cover.

The water with the initial mineralization 250 mg/l was poured into the basin 60×60×30 cm^2. The maximal ice thickness reached the level 10 cm per day at an ambient temperature of ~ –30 °C. However, the average mineralization of ice measured by the conductometric method using the HANNA conductometer was around 10 mg/kg. But at the initial time faster growth of ice was noticed and it absorbed more salt. That is why the mineralization in the upper layers of ice is 3 or 4 times more than the one in the layers which form much slower. In the paper [9] it is shown that an integral coefficient of salt absorption by fresh ice cover in the natural bodies of water depends on different factors and, as a rule, is no more than 10 %.

Obtained results of measurements and analysis. As a result of measurements at a frequency of 13 GHz the relationship between brightness temperature and ice cover thickness on the horizontal and vertical polarization and backscattering power on the horizontal and vertical polarization by radiation on the vertical polarization over time was obtained.

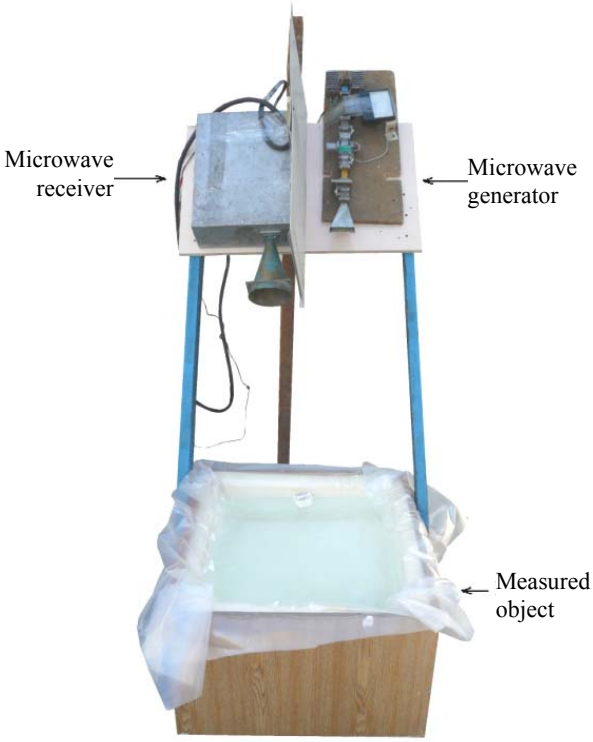


Fig. 2. Photo of an installation for measuring the radiative and scattering properties of a growing ice cover at a frequency of 13 GHz, using a single antenna

Рис. 2. Фотография установки для измерения излучательных и рассеивающих свойств растущего ледяного покрова на частоте 13 ГГц с использованием одной антенны

The relationship of brightness temperature on the horizontal and vertical polarization is shown on fig. 3. It is obvious that there were brightness temperature variations by ice growing. It should be noted that there are some errors in the fringe pattern because of ice inhomogeneity. One of the reasons of its appearance is internal mechanical stresses during the crystal growth under conditions of limited space [10]. It can lead to ice amorphization [11; 12] or crack initiation and water penetrating these cracks. Such types of crystal habit disturbance would be hard to differentiate by one type of measurement. However, the differentiation is possible by scattering radiation measurements of an external source. For example, cracks of ice are visible on the radar image [13].

Power change of the backscattering radiation from the growing ice cover on the horizontal polarization is shown in fig. 4. As is seen from this diagram there are certain variations of radiation power, which do not depend on the thickness of ice cover but they are linked with inhomogeneity within the ice cover which is commensurable with the wavelength and the reflecting increase of the ice cover thickness.

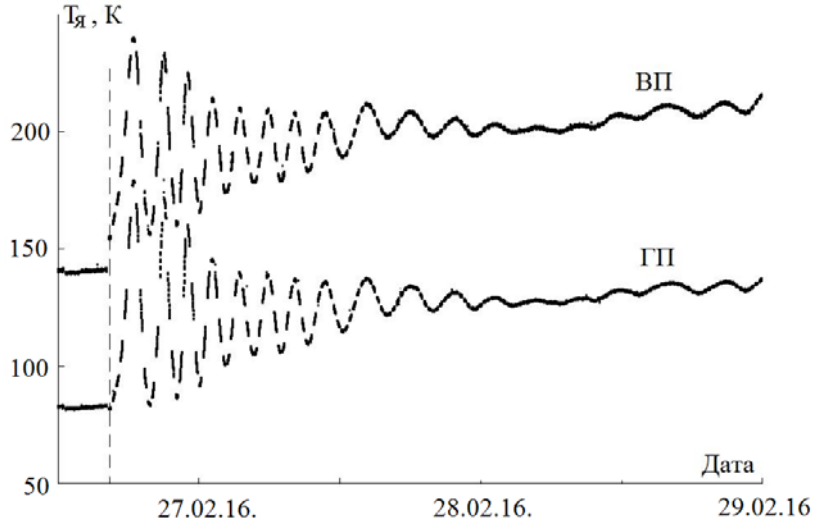


Fig. 3. Change in the radiobrightness temperature of the growing ice cover at a frequency of 13 GHz. The viewing angle is 45°. The band of received frequencies is ~ 1 GHz. The vertical line marks the beginning of the formation of an ice crust

Рис. 3. Изменение радиояркостной температуры растущего ледяного покрова на частоте 13 ГГц. Угол наблюдения 45°. Полоса принимаемых частот ~ 1 ГГц. Вертикальной линией отмечено начало образования ледяной корки

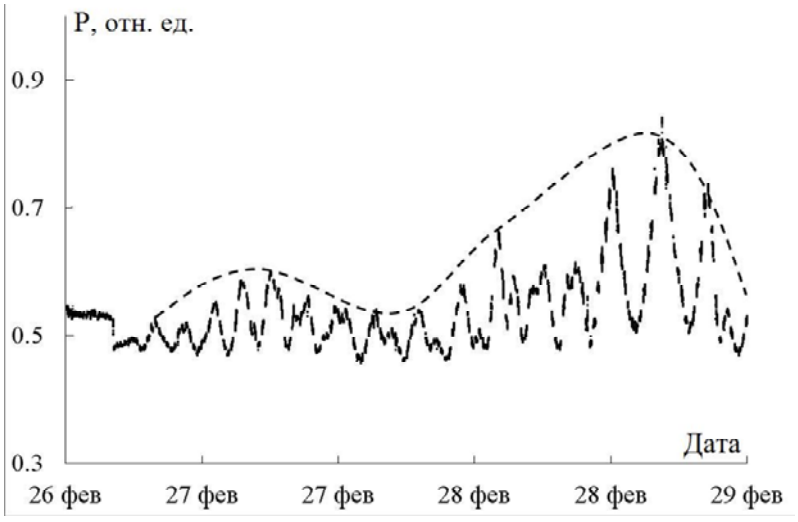


Fig. 4. The power of the scattered signal (P) in relative units from the growing ice cover at a frequency of 13 GHz. Horizontal polarization. The dashed line is the envelope of the interference backscatter maxima

Рис. 4. Мощность рассеянного сигнала (P) в относительных единицах от растущего ледяного покрова на частоте 13 ГГц. Горизонтальная поляризация. Штриховая линия – огибающая интерференционных максимумов обратного рассеяния

Active and passive radar measurements in other cases with different water-soluble additions showed similar proceeding of brightness temperature and backscattering power with the growth of the ice cover.

The supplied results of measurements of the growing ice cover show a substantial difference between the radar and radiometric data. In the paper [5] the reason of some possible variances is nuanced.

Radiometric measurements show interference which is associated with a change in the thickness of the ice cover. This effect is widely known in radiometry for the ice cover at its initial forming stage [14; 15]. By the further growth of the interference event they decrease because of the influence of the frequency range intercepted by a radiometer. Interference variances of backscattering radiation are also determined for radar measurements. Such an effect can be linked with the scattering radiation and its interference from the internal inhomogeneity and roughened surface. As is seen from Fig. 4 this process increased during the growth of ice cover and inhomogeneity production. The envelope of the scattered signal amplitude shows diurnal variations of the backscattering coefficient which can be explained by the difference between air temperature and ice growth rate.

Conclusion. Thus, an alternative technique of virtually simultaneous radar and radiometric measurements of the object parameters with slowly varying characteristics is suggested. The same receiving antenna with fixed geometry is used to obtain data for more meaningful comparison of radiation and scattering surface characteristics. This technique is tried out through the example of the growing ice cover by microwave measurements. Based on the measurement findings, the different features of behaviour of the brightness temperature and the backscattering power for ice are shown and it outlines features of the changing medium structure and its dependence on external conditions.

References

1. Armand N. A., Zakharov A. I., Zakharova L. N. [Spaceborne SAR Systems for Earth Remote Sensing: Modern Instruments and Prospective Projects]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 2010, No 2, P. 3–13 (In Russ.).
2. Rees W. G. Physical Principles of Remote Sensing. Cambridge University Press. 2014, 492 p.
3. Sharkov E. A. Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations. Berlin, N.Y., London, Paris, Tokyo. Springer/PRAXIS, 2003. 613 p.
4. Olmedo E., Martínez J., Turiel A., Ballabrera-Poy J., Portabella M. Debiased non-Bayesian retrieval: A novel approach to SMOS Sea Surface Salinity. 2017. *Remote Sensing of Environment,* Vol.193, P. 103–126.
5. Bordonskiy G. S., Gurulev A. A., Orlov A. O., Tsyrenzhapov S. V. [Difference between radar and radiometric signatures (the case of eutrophic lake ice cover)]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2014, Vol. 11, No 2, P. 228–240 (In Russ.).
6. Voss S., Heygster G., Ezraty R. Improving sea ice type discrimination by the simultaneous use of SSM/I and scatterometer data. *Polar Research*. 2003, Vol. 22, Iss. 1, P. 35–42.
7. Kvasnikov I. A. *Termodinamika i statisticheskaya fizika. T. 1: Teoriya ravnovesnykh sistem: Termodinamika.* [Thermodynamics and statistical physics. Vol. 1: Theory of equilibrium systems: Thermodynamics]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2002, 240 p. (In Russ.).
8. Gurulev A. A. *Radioteplovoe izluchenie ledyanykh pokrovov presnykh i slabosolenykh vodoemov. Kand. Diss.* [Radiothermal radiation of ice cover of fresh and slightly saline water bodies. Cand. Diss.]. Moscow, 2005, 128 p.
9. Bordonskii G. S., Gurulev A. A. Characteristics of thermal radiation of ice covers on water bodies with different mineralization. *Water Resources*. 2008, Vol. 35, No 2, P. 199–204.
10. Bordonskiy G. S. [Microwave properties of freshwater ice covers under plastic deformation]. *Kriosfera Zemli*. 2014, Vol. XVIII, No 2, P. 24–30 (In Russ.).
11. Silonov V. M., Chubarov V. V. On the metastable nature of amorphous ice near melting point. *Journal of Surface Investigation.* 2016, Vol. 10(4), P. 883–886.
12. Loerting T., Winkel K., Seidl M., Bauer M., Mitterdorfer C., Handle P.H., Salzmann C.G., Mayer E., Finney J. L., Bowron D. T. How many amorphous ices are there? *Physical Chemistry Chemical Physics.* 2011, Vol. 13 (19), P. 8783–8794.
13. Chimitdorzhiev T. N., Tatkov G. I., Tubanov Zh. A., Dagurov P. N., Zakharov A. I., Kirbizhekova I. I., Dmitriev A. V., Bikov M. E. *Issledovaniya dinamiki ledovogo pokrova ozera Baykal po radarnym dannym i metodami GPS-navigatsii* [Research of lake Baikal ice cover dynamics on the basis of radar data and GPS-navigation methods]. *Vestnik SibGAU.* 2013, Vol. 5 (51), P. 76–79 (In Russ.).
14. Gurulev A. A., Orlov A. O., Tsyrenzhapov S. V. [Radiative characteristics of three-layer medium with a thin intermediate layer in the microwave range]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* 2011, Vol. 8, No. 2, P. 26–33 (In Russ.).
15. Gaikovich K. P., Snopik L. M., Troitsky A. V. Helicopter radiometer measurements of thin lake ice and oil spills on lakes and soil. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 1995, Vol. 38(11), P. 719–726.

Библиографические ссылки

1. Арманд Н. А., Захаров А. И., Захарова Л. Н. Космические радары с синтезированной апертурой в дистанционном зондировании Земли: современные системы и перспективные проекты // Исследование Земли из космоса. 2010. № 2. С. 3–13.
2. Rees W. G. Physical Principles of Remote Sensing. Cambridge University Press, 2014. 492 p.
3. Sharkov E. A. Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations. Berlin ; N. Y. ; London ; Paris ; Tokyo : Springer/PRAXIS, 2003. 613 p.
4. Debiased non-Bayesian retrieval: A novel approach to SMOS Sea Surface Salinity / E. Olmedo [et al.] // Remote Sensing of Environment 2017. Vol. 193. P. 103–126.

5. Различие картин радарных и радиометрических измерений (на примере ледяного покрова эвтрофированного озера) / Г. С. Бордонский [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 2. С. 228–240.

6. Voss S., Heygster G., Ezraty R. Improving sea ice type discrimination by the simultaneous use of SSM/I and scatterometer data // Polar Research. 2003. Vol. 22, iss. 1. P. 35–42.

7. Квасников И. А. Термодинамика и статистическая физика. Т. 1. Теория равновесных систем: Термодинамика. 2 изд. М. : Едиториал УРСС, 2002. 240 с.

8. Гурулев А. А. Радиотепловое излучение ледяных покровов пресных и слабосоленых водоемов : дис. … канд. физ.-мат. наук / Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН. М., 2005. 128 с.

9. Бордонский Г. С., Гурулев А. А. Особенности радиотеплового излучения ледяных покровов водоемов с различной степенью минерализации // Водные ресурсы. 2008. Т. 35, № 2. С. 210–215.

10. Бордонский Г. С. Характеристика микроволновых свойств пресных ледяных покровов при пластической деформации // Криосфера Земли. 2014. Т. XVIII, № 2. С. 24–30.

11. Silonov V. M., Chubarov V. V. On the metastable nature of amorphous ice near melting point // Journal of Surface Investigation. 2016. Vol. 10 (4). P. 883–886.

12. How many amorphous ices are there? / T. Loerting [et al.] // Physical Chemistry Chemical Physics. 2011. Vol. 13 (19). P. 8783–8794.

13. Исследования динамики ледового покрова озера Байкал по радарным данным и методами GPS-навигации / Т. Н. Чимитдоржиев [и др.] // Вестник СибГАУ. 2013. № 5(51). С. 76–79.

14. Гурулев А. А., Орлов А. О., Цыренжапов С. В. Излучательные характеристики трехслойных сред с тонким промежуточным слоем в СВЧ-диапазоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 2. С. 26–33.

15. Gaikovich K. P., Snopik L. M., Troitsky A. V. Helicopter radiometer measurements of thin lake ice and oil spills on lakes and soil // Radiophysics and Quantum Electronics. 1995. Vol. 38 (11). Pp. 719–726.

© Gurulev A. A., Tsyrenzhapov S. V., Kharin Y. V., 2017

УДК 621.91.01

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 379–386

ВЛИЯНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РОТАЦИОННОГО ТОЧЕНИЯ МНОГОГРАННЫМИ РЕЗЦАМИ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУЖКИ И ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ

Н. С. Индаков, Ю. И. Гордеев, А. С. Бинчуров, Д. И. Киселев, В. Б. Ясинский

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

Расчетными и экспериментальными методами исследованы особенности процесса ротационного точения многогранными резцами и установлен характер влияния режимов резания на интенсивность деформационных процессов резания, форму и размеры сечения срезаемого слоя в виде стружки и показатели шероховатости обработанной поверхности. Полученные полуэмпирические зависимости позволяют при назначении режимов резания прогнозировать параметры шероховатости Ra, Rz, R_{max}. Представленный метод сочетает в себе элементы безвершинного косоугольного точения, основным достоинством которого является движение срезаемого слоя вдоль режущей кромки, и метода ротационного точения, основным достоинством которого является постоянное обновление участков режущей кромки, что приводит к хорошему охлаждению и, следовательно, повышению стойкости инструмента. Обеспечение требуемой скорости резания осуществляется путем требуемого количества оборотов резца, а вращение обрабатываемого вала является круговой подачей. В данном методе ширина среза является величиной переменной и возникает на участке профиля резца с возрастающим радиусом-вектором, а глубина резания изменяется в вертикальной плоскости среза. Исходя из кинематики резания возможно возникновение кинематической волнистости. Для исключения ее формирования необходимо назначить продольную и конструктивную подачу согласно рекомендациям. Проведение соответствующих исследований позволяет выявить оптимальные режимы обработки и дать практические рекомендации по их выбору для различных условий и материалов. В целом проведенные исследования подтвердили перспективность предложенного метода.

Ключевые слова: ротационное точение, многогранный ротационный резец, лезвие, конструктивная подача, круговая подача, дробление стружки, отвод стружки, углы наклона режущей кромки.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 379–386

INFLUENCE OF CINEMATIC AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF ROTARY TURNING BY MULTIFACETED CUTTERS ON CHIP FORMATION AND SURFACE ROUGHNESS

N. S. Indakov, Yu. I. Gordeev, A. S. Binchurov, D. I. Kiselev, V. B. Jasinski

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

By calculated and experimental methods features of the process of turning the rotary multifaceted cutters were investigated. Influence of cutting conditions on the intensity of deformation processes, shape and dimensions of the cross section of cutting layer in the form of chips and roughness of the treated surface were installed. The resulting semi-empirical equations allow the appoint the cutting modes to predict the roughness parameters Ra, Rz, R_{max}. The proposed method combines elements of skew turning (in which the cut layer moves along the cutting edge) and rotary turning (in which the sections of the cutting edge are constantly renewed). That leads to better cooling and hence longer tool life. The required cutting speed is ensured by selection of the cutter speed; the rotation of the machined shaft corresponds to the azimuthal supply. In the proposed method, the cut width is variable and corresponds to the section of the cutter profile with an increasing radius vector, while the cutting depth varies in the vertical plane of the cut. On the basis of the cutting kinematics, kinematic undulation may appear. To eliminate that, the longitudinal and azimuthal supply must be specified in accordance with our recommendations. Carrying out the corresponding researches allows revealing optimum modes of processing and to make practical recommendations about their choice for various conditions and materials. In general, studies have confirmed the promise of the proposed method.

Keywords: rotational turning, versatile rotary cutter, blade, constructive feed, circular feed, chip control, chip removal, the angles of inclination.

Введение. В области обработки материалов резанием наиболее широко применяются следующие методы: вершинными резцами, безвершинными резцами, ротационными с самовращением или с принудительным вращением. Каждый из указанных методов имеет свои рациональные области применения [1–4]. Однако эти традиционные методы механической обработки имеют существенные ограничения при обработке труднодеформируемых материалов, вызванные недостаточной стойкостью режущего инструмента вследствие образования сливной стружки, что приводит к перегреву инструмента и заготовки, требует использования дорогостоящих и токсичных СОТС. Это не позволяет применять высокие скорости резания, снижает производительность процессов, особенно при обработке крупногабаритных валов, и требует разработки альтернативных по кинематике методов формообразования. Метод ротационного точения многогранными резцами является перспективным способом обработки вязких, сложнолегированных, труднодеформируемых сталей и сплавов, в том числе на основе титана, широко используемых в аэрокосмическом и транспортном машиностроении.

Несмотря на значительный объем публикаций в области ротационного точения, разработанный в Политехническом институте СФУ принципиально новый по кинематике метод ротационного точения многогранными резцами (РТМР) [5; 6] остается крайне мало изученным как теоретически, так и экспериментально. Поэтому для развития и практической реализации этого метода необходимо проведение комплекса теоретических и экспериментальных исследований по оптимизации геометрических и кинематических параметров, определению режимов РТМР, которые обеспечивают высокую производительность и одновременно требуемое качество обработанной поверхности.

Методика и аппаратура исследований. Экспериментальные исследования проводились на токарно-винторезном станке повышенной точности ИЖ250ИТВМ.Ф1 с применением инструментального модуля для ротационного точения. При проведении экспериментальных исследований влияния режимов резания на параметры шероховатости использовались оправки с образцами из стали 45 и сплава Д16. На основании анализа однофакторных экспериментов (проведенных ранее [7–9]) были выбраны уровни варьирования независимых переменных для дальнейших экспериментальных исследований по плану ПЭФ: $S_{\text{пр}_{\text{ст}}}$ = 0,04–1,2 мм/об; $S_{\text{кр}}$ = 7,85–25 м/мин; $V_{\text{р}}$ = 310–933 м/мин; t = 0,1–1 мм. Качество обработанной поверхности образцов оценивалось по трем высотным параметрам шероховатости Ra, Rz, $R_{\max}$ на профилометре-профилографе модели MarSurf M300, диапазон измерений 350 мкм (от –200 до +150 мкм). Анализ микроструктуры образцов и морфологии стружки проводился на растровом электронном микроскопе HITACHI TM 1000 и растровом электронном микроскопе JEOL JSM-7001F.

Результаты и обсуждение. Кинематические параметры процесса ротационного точения определяют его основные особенности и закономерности, условия стружкообразования, качество обработки, работоспособность режущего инструмента, являются исходными для выбора режимов резания и геометрии инструмента. В формировании обрабатываемой поверхности участвуют три движения: главное движение (вращение инструмента) $V_{\text{р}}$, прямолинейное движение, или продольная подача $S_{\text{пр}}$, и дополнительное движение, или круговая подача (вращение заготовки) $S_{\text{кр}}$ (рис. 1). Многогранный резец *1* совершает принудительное вращение вокруг своей оси со скоростью $V_{\text{р}}$ относительно вращающейся заготовки *2*, в то же время инструменту сообщается прямолинейное движение вдоль оси заготовки – продольная подача $S_{\text{пр}}$. При этом ось вращения инструмента устанавливается перпендикулярно оси вращения заготовки и находится на линии оси центров. Подробно кинематика процесса РТМР, влияния геометрических и технологических параметров на характер процессов формообразования представлена в работах [10–13].

Ротационный резец *1* представляет собой многогранное тело чашечной формы с посадочным отверстием и режущей частью, состоящей из N режущих лезвий. Каждое лезвие содержит заднюю и переднюю поверхности, которые образуют между собой прямолинейную режущую кромку. Сформированные на каждом лезвии режущие кромки, размещенные в плоскости, перпендикулярной оси вращения ротационного резца, образуют режущий многоугольник. Главным движением является вращение инструмента, причем скорость вращения инструмента должна быть как минимум на порядок больше скорости вращения заготовки [8; 10; 12]. Схема обработки многогранным ротационным резцом приведена на рис. 1.

Обработка ротационным резцом производится таким образом, что основная деформация (которая является результатом сложного напряженного состояния и сочетания различных формообразующих движений РТМР) снимаемого слоя в виде стружки реализуется вдоль режущей кромки резца, при этом суммарная подача на грань профиля резца определяется [7; 8; 13; 14] как

$$S_{\text{гр}} = \sqrt{S^2_{\text{кр}_{\text{гр}}} + S^2_{\text{пр}_{\text{гр}}}}. \quad (1)$$

Продольная подача на грань резца определяется, но формуле

$$S_{\text{пр}_{\text{гр}}} = \frac{\text{S}_{\text{пр}_{\text{ст}}} \cdot n_{\text{з}}}{n_{\text{р}} \cdot N}, \quad (2)$$

где $S_{\text{пр}_{\text{ст}}}$ – продольная подача резца на оборот обрабатываемого вала, мм/об; $n_{\text{з}}$ – число оборотов заготовки, об/мин; $n_{\text{р}}$ – число оборотов инструмента, об/мин; N – число граней профиля резца.

Круговая подача на грань резца находится по формуле

$$S_{\text{кр}_{\text{гр}}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{з}} \cdot n_{\text{з}}}{n_{\text{р}} \cdot N}, \quad (3)$$

где $d_{\text{з}}$ – диаметр заготовки, мм.

Из анализа кинематики процесса РТМР следует, что срез снимаемого слоя материала заготовки генерируется в виде отдельных элементов стружки клинового типа (рис. 1, 2).

Размер и форму элементарных стружек можно охарактеризовать тремя параметрами: шириной B, толщиной t и длиной L (рис. 2).

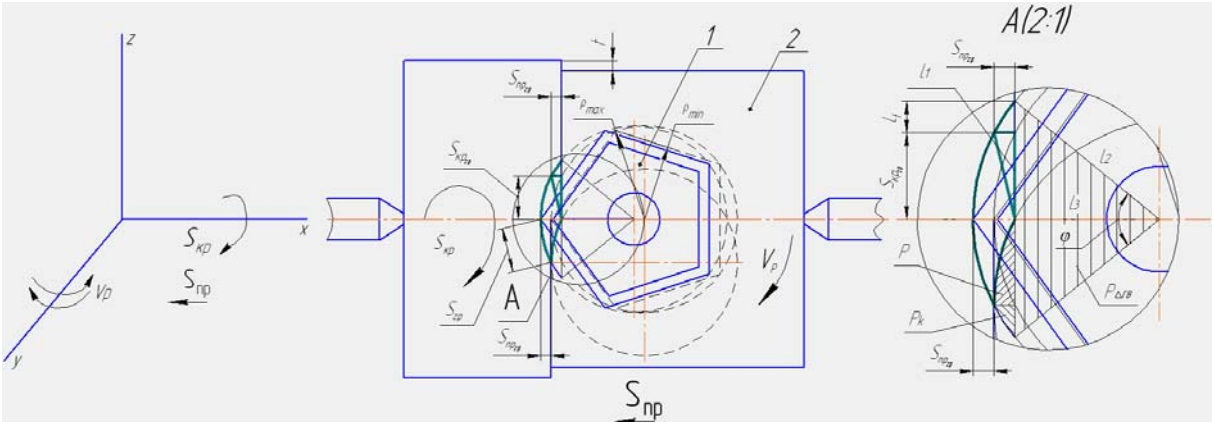
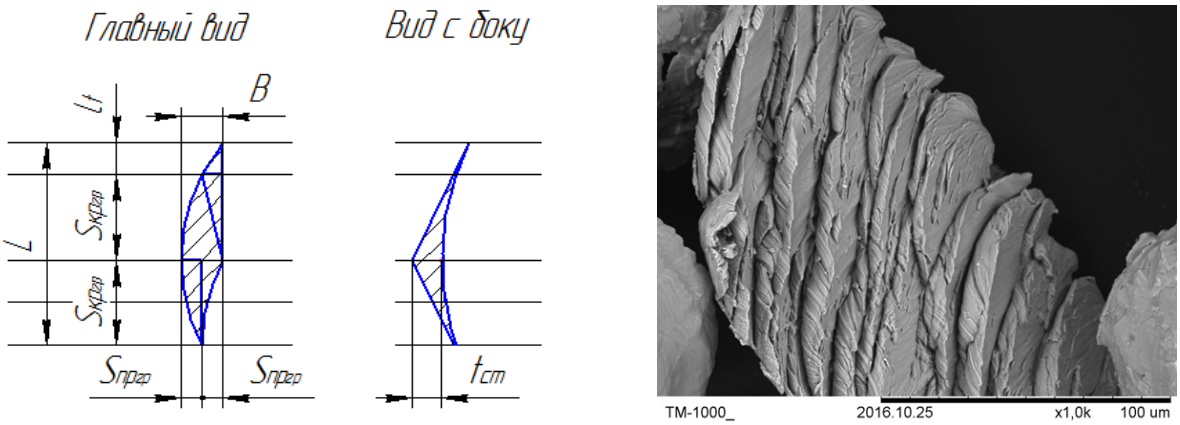


Рис. 1. Кинематическая схема обработки многогранным ротационным резцом

Fig. 1. Kinematic scheme of roughing by multisided rotating cutting bit



а *б*

Рис. 2. Форма и размеры сечения элементарных стружек формирующихся при РТМР:
а – теоретическая схема; *б* – реальная структура, сегментов стружки

Fig. 2. Shape and sizes of section of common cuts formed under rotary turning operation of multisided rotating cutting bit:
a – theoretical scheme; *b* – real structure of cuts segment

Ширина стружки определяется по формуле

$$B = 2S_{\text{пр}_{\text{гр}}}. \quad (4)$$

Длина стружки:

$$L = 2S_{\text{кр}_{\text{гр}}} + l_t, \quad (5)$$

где l_t – длина участка, зависящая от глубины резания, мм.

Длина участка, зависящая от глубины резания, определяется по формуле

$$l_t = \sqrt{\rho_{\max}^2 - \left(\rho_{\max} - 2S_{\text{пр}_{\text{гр}}}\right)^2} - S_{\text{кр}_{\text{гр}}}. \quad (6)$$

Толщина стружки:

$$t = t_{\text{ст}} - \Delta h = t_{\text{ст}} - \\ -\sqrt{\rho^2 \cdot \sin k^2 + R_{\partial\min}^2} + R_{\partial\min}, \quad (7)$$

где t – глубина резания в каждом положении режущей кромки, находящейся в зоне резания, мм; $t_{\text{ст}}$ – глубина резания в плоскости оси центров, мм; Δh – высота возможных остаточных неровностей, мм; $R_{\partial\min}$ – радиус обработанной заготовки, мм; k – угол между осью центров и прямой к точке контакта режущей кромки и обрабатываемой поверхности.

Высотные и угловые размеры снимаемого слоя материала и размеры остаточных микронеровностей поверхности могут быть определены на основании схемы контактного взаимодействия «инструмент–заготовка» (рис. 3).

Угол между осью центров и прямой к точке контакта режущей кромки и обрабатываемой поверхности находится по формуле

$$\cos k_{\max} = \frac{\rho_{\max} - B}{\rho_{\max}}. \quad (8)$$

Так как при данном методе возникает прерывистость резания на участке режущей кромки с убывающим радиусом-вектором, то возможно возникновение кинематической волнистости. Для исключения ее формирования необходимо значения продольной и круговой подач назначить в зависимости от глубины резания, количества граней, диаметра и числа оборотов ротационного резца.

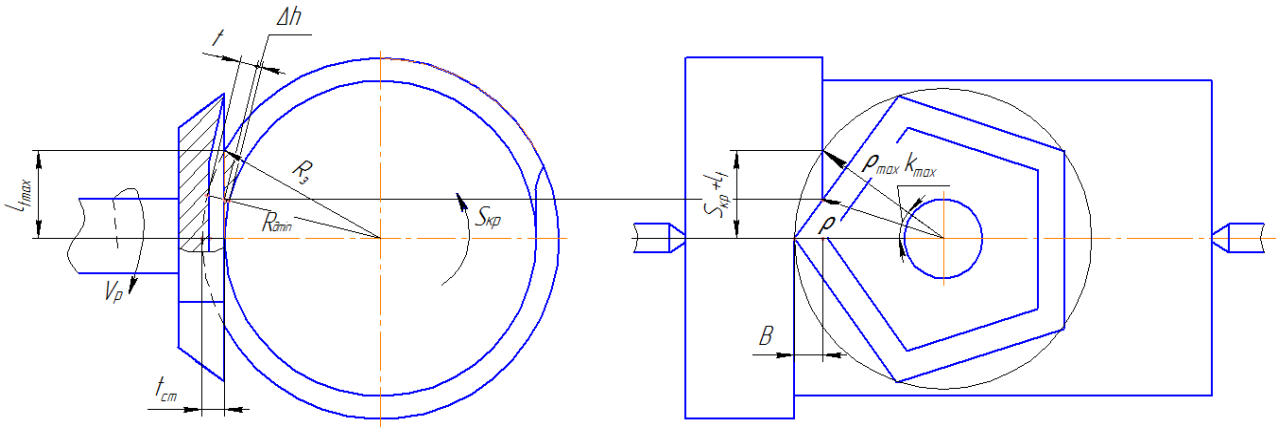


Рис. 3. Схема формирования микропрофиля поверхности при РТМР

Fig. 3. Scheme of formation of microprofile of surface under rotary turning operation of multisided rotating cutting bit

Во избежание возникновения кинематической волнистости необходимо круговую подачу назначать с учетом следующих рекомендаций:

$$l_{t\max} = \sqrt{R_з^2 - \left(R_з - t_{ст}\right)^2}; \quad (9)$$

$$l_{t\max} \geq S_{кр_{гр}} + l_t, \quad (10)$$

где $l_{t\max}$ – высота выхода режущего лезвия из зоны резания относительно плоскости центров, мм; R_3 – радиус обрабатываемой заготовки, мм.

Круговая подача назначается исходя из следующей зависимости:

$$S_{кр\max} = \sqrt{\rho_{\max}^2 - \left(\rho_{\max} - S_{пр}\right)^2} = \\ = \sqrt{2\rho_{\max} \cdot S_{пр} - S_{пр}^{\ 2}}. \quad (11)$$

При известной круговой подаче необходимо вычислить продольную подачу, которая определяется из следующего соотношения:

$$S_{пр\min} = \rho_{\max} - \sqrt{\rho_{\max}^2 - S_{кр}^2}. \quad (12)$$

При выполнении данных условий глубина необрабатываемого при РТМР участка поверхности детали будет являться основным показателем, влияющим на качество обрабатываемой поверхности. Из приведенной схемы (рис. 2, 3) видно, что толщина стружки является величиной переменной и изменяется от 0 до величины, равной глубине резания.

Для определения влияния на площадь среза углов инструмента, диаметра режущих граней и режимов резания необходимо оценить действительную площадь среза (рис. 1, 2). Действительная площадь среза при РТМР можно определить из построений (см. рис. 1) по формуле

$$P_{дейГВ} = \frac{\pi \cdot \rho_{\max}^{\ 2}}{360} \cdot \varphi_{ГВ} - P_{\Delta ГВ} - P - P_k, \quad (13)$$

где $\varphi_{ГВ}$ – угол треугольника на главном виде; $P_{\Delta ГВ}$ – площадь необрабатываемой части треугольника на главном виде; P – площадь участка обработанного предыдущим лезвием; P_k – площадь среза, возникающая за счет конструктивной подачи.

Угол треугольника ($\varphi_{ГВ}$) на главном виде определяется по формуле

$$\cos\frac{\varphi_{ГВ}}{2} = \frac{(\rho_{\max} - B)}{\rho_{\max}}, \quad (14)$$

где B – ширина срезаемого слоя; $\rho_{\max}$ – максимальный радиус-вектор контура режущей кромки.

В свою очередь, площадь необработанной части треугольника $\left(P_{\Delta ГВ}\right)$ может быть определена как

$$P_{\Delta ГВ} = \frac{1}{2} \cdot \left(L + l_t\right) \cdot \left(\rho_{\max} - B\right). \quad (15)$$

Площадь участка, обработанного предыдущим лезвием, определяется выражением

$$P = \frac{1}{2} \cdot S_{пр_{гр}} \cdot S_{кр_{гр}}. \quad (16)$$

Площадь конструктивного участка определяется по формуле

$$P_k = \frac{1}{2} \cdot S_{пр} \cdot l_t. \quad (17)$$

Действительная площадь среза ($P_{дей\,BC}$):

$$P_{дей\,BC} = \frac{\pi \cdot R_3^{\ 2}}{360} \cdot \varphi_{BC} - P_{\Delta BC}, \quad (18)$$

где φ_{BC} – угол треугольника.

Угол треугольника φ_{BC} (рис. 4) определяется как

$$\varphi_{BC} = \varphi_{BC1} + \varphi_{BC2}, \quad (19)$$

где φ_{BC1} – угол треугольника над высотой центров; φ_{BC2} – угол треугольника ниже высоты центров.

Угол треугольника (φ_{BC1}) над высотой центров определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi_{BC1} = \frac{S_{кр} + l_t}{R_{д\min}}. \quad (20)$$

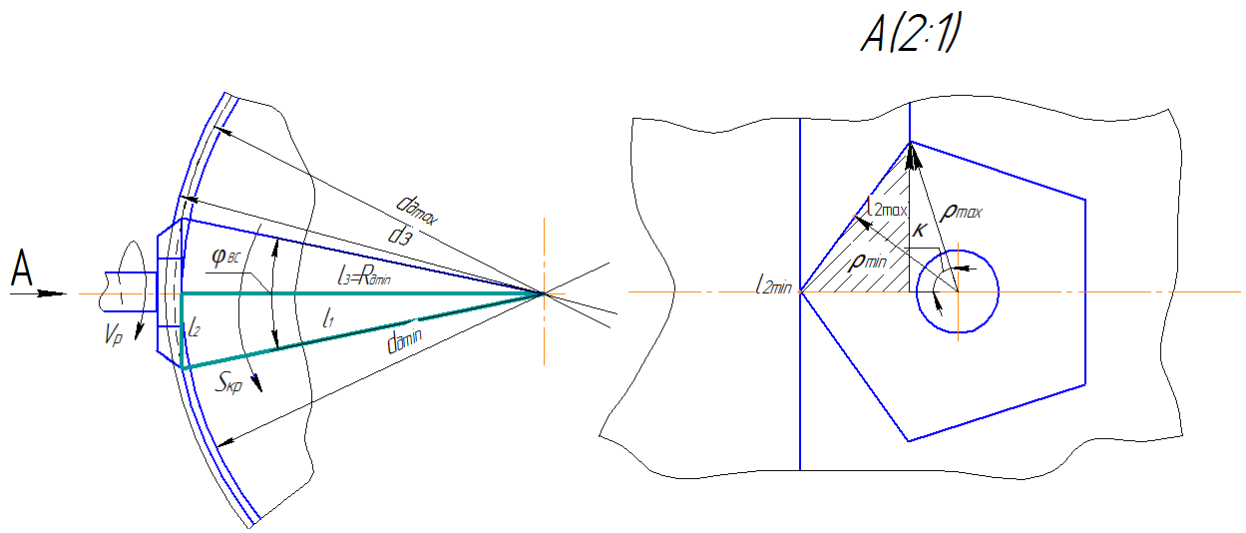


Рис. 4. Схема изменения толщины стружки

Fig. 4. Scheme of measuring of cuts thickness

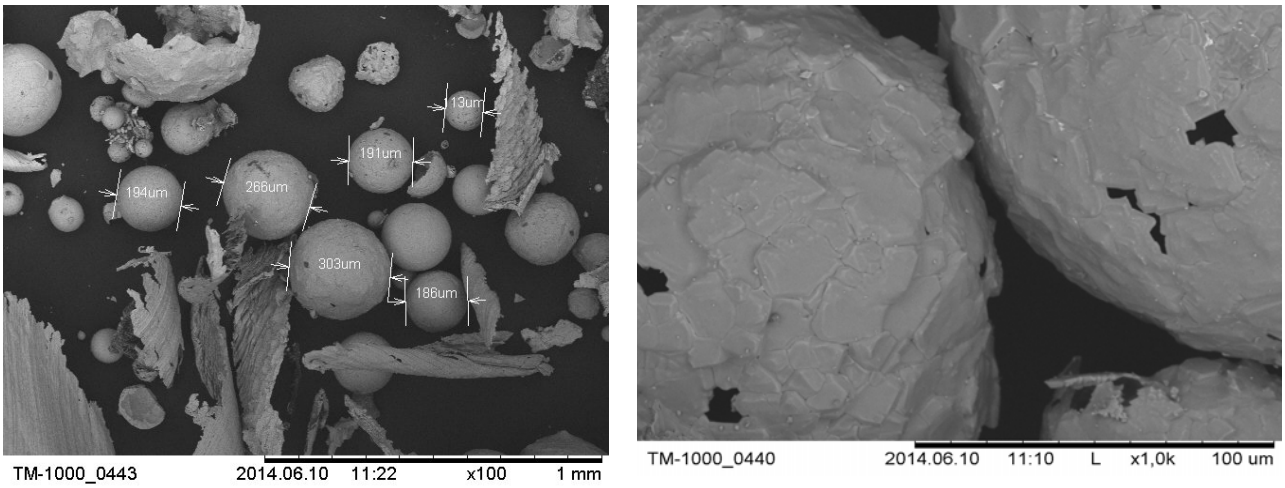


Рис. 5. Стальная стружка в виде полых сфер

Fig. 5. Steel cuts in the form of hollow spheres

Угол треугольника (φ_{BC2}) ниже высоты центров определяется как

$$\operatorname{tg}\varphi_{BC2} = \frac{S_{кр}}{R_{\partial\min}}; \qquad (21)$$

Площадь необработанной части треугольника на виде сбоку определяется выражением

$$P_{\Delta BC} = \frac{1}{2}\left(2S_{кр} + l_t\right)\cdot\left(R_3 - t_{ст}\right), \qquad (22)$$

где R_3 – радиус заготовки.

Из приведенных формул следует, что с возрастанием численных значений подач глубины резания и диаметра обрабатываемой заготовки пропорционально увеличивается площадь среза. Изменение диаметра многогранного резца, а также изменение инструментальных углов на площадь среза значительного влияния не окажут.

Форма сечения и размеры образующейся стружки, вычисленные на основании аналитических выражений, приведенных выше, и электронно-микроскопическое изображение элемента реальной стружки, полученной при РТМР при тех же геометрических параметрах и режимах резания, наглядно подтверждают адекватность разработанных кинематических и геометрических моделей. Проведённые оценки средних размеров элементов стружки (рис. 5) подтверждают, что метод РТМР обеспечивает формирование мелкодробленой стружки с размерами не более 300 мкм, что способствует гарантированному удалению ее из зоны резания, создает благоприятные температурные условия на поверхностях инструмента и заготовки. Естественно, все эти факторы снижают интенсивность износа режущих кромок, повышают качество обработанной поверхности.

Качество обработанной поверхности определяется шероховатостью поверхности и состоянием материала поверхностного слоя (однородность структуры, отсутствие окалины, степень наклепа, остаточных напряжений, глубины дефектного слоя). На основании

полученных аналитических расчетных формул (7)–(12) для определения размеров срезаемого слоя при РТМР можно произвести соответствующие кинематические и геометрические преобразования для определения расчетных формул по основным высотным параметрам шероховатости при РТМР. Микронеровности поверхности могут быть определены исходя из геометрических построений (см. рис. 3). При этом необходимо соблюдать несколько условий и допущений: обрабатываемый материал (материал заготовки) абсолютно недеформируемый; технологическая система абсолютно жесткая; лезвие инструмента и форма профиля заготовки представляют собой геометрические линии.

Расчетный микропрофиль цилиндрической поверхности обрабатываемой РТМР изображен на рис. 3. Высота расчетных неровностей Δh может быть определена по формуле

$$\Delta h = \sqrt{\rho^2 \cdot \sin k^2 + R_{\partial\min}^2} - R_{\partial\min}. \qquad (23)$$

Продольная подача на грань резца определяется как

$$S_{\text{пр}_{\text{гр}}} = B/2. \qquad (24)$$

Продольная подача резца на оборот обрабатываемого вала рассчитывается по формуле

$$S_{\text{пр}_{\text{ст}}} = \frac{S_{\text{пр}_{\text{гр}}} \cdot n_{\text{р}} \cdot N}{n_{\text{з}}}. \qquad (25)$$

Круговая подача на грань резца может быть определена как

$$S_{\text{кр}_{\text{гр}}} = \rho_{\max} \cdot \sin k_{\max}. \qquad (26)$$

Число оборотов заготовки рассчитывается по формуле

$$n_{\text{з}} = \frac{S_{\text{кр}_{\text{гр}}} \cdot n_{\text{р}} \cdot N}{\pi \cdot d_{\text{з}}}. \qquad (27)$$

Число оборотов инструмента назначается, исходя из соотношения

$$n_{\text{р}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{з}} \cdot n_{\text{з}}}{S_{\text{кр}_{\text{гр}}} \cdot N}. \qquad (28)$$

Из анализа проведенных ранее исследований [15–17] следует, что эксплуатационные свойства, а также многие характеристики качества поверхности зависят от технологических методов и условий механической обработки.

Качество обрабатываемой (образовывающейся) поверхности зависит от многих технологических параметров обработки при РТМР (режимы резания, геометрические параметры режущего инструмента, кинематика ротационного точения многогранными резцами и др.). На рис. 6 приведены зависимости шероховатости поверхности от параметров режимов резания.

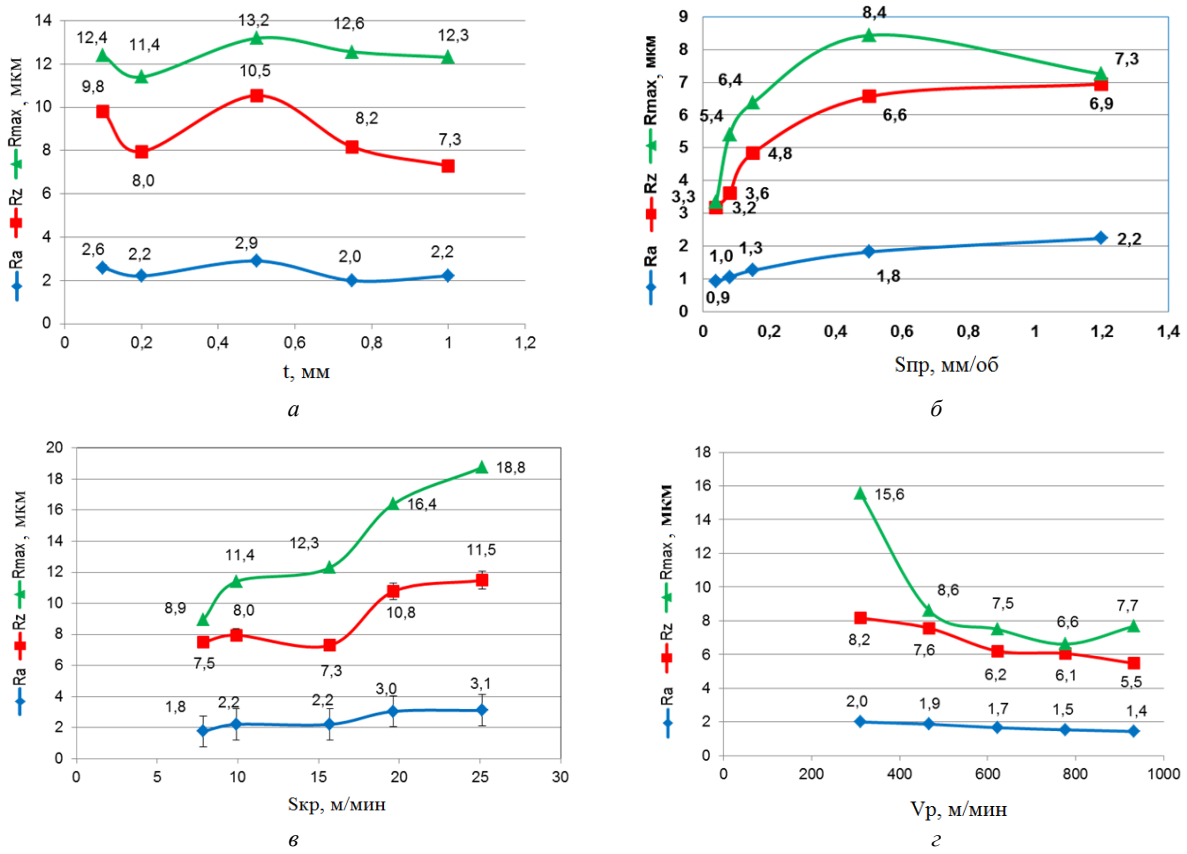


Рис. 6. Влияние режимов резания на шероховатость поверхности:
а – глубины резания *t*; *б* – продольной подачи $S_{\text{пр}}$; *в* – круговой подачи $S_{\text{кр}}$; *г* – скорости резания $V_{\text{р}}$

Fig. 6. Influence of cutting conditions on the roughness of surface:
a – cut amount, *t*; *b* – length feed, $S_{\text{пр}}$; *c* – rotary feed, $S_{\text{кр}}$; *d* – cut speed, $V_{\text{р}}$

На основе обработки экспериментальных данных получены полуэмпирические зависимости параметров шероховатости обработанной поверхности от режимов резания:

$$Ra = 6,01\frac{S_{\text{пр}}^{0,2701} \cdot S_{\text{кр}}^{0,4679}}{V_{\text{р}}^{0,3081} \cdot t^{0,0548}}; \quad (29)$$

$$Rz = 41,52\frac{S_{\text{пр}}^{0,2471} \cdot S_{\text{кр}}^{0,3583}}{V_{\text{р}}^{0,3733} \cdot t^{0,0721}}; \quad (30)$$

$$R_{\max} = 251,89\frac{S_{\text{пр}}^{0,2208} \cdot S_{\text{кр}}^{0,594} \cdot t^{0,02}}{V_{\text{р}}^{0,6775}}. \quad (31)$$

Наибольшее влияние на формирование высотных параметров шероховатости Ra, Rz, $R_{\max}$ оказывают круговая подача $S_{\text{кр}}$ и скорость резания $V_{\text{р}}$, чуть менее значимым фактором является продольная подача $S_{\text{пр}}$. Глубина резания t РТМР практически не оказывает существенного влияния на изменение параметров шероховатости.

Доминирующее влияние на шаг микронеровности на уровне средней линии S_m оказывает круговая подача $S_{\text{кр}}$ и скорость главного движения $V_{\text{р}}$. Значимым параметром, влияющим на шаг микронеровности на уровне средней линии S_m, является также продольная подача $S_{\text{пр}}$. Относительная опорная длина профиля на уровне средней линии t_m увеличивается с ростом скорости главного движения $V_{\text{р}}$ и уменьшается с увеличением круговой и продольной подач $S_{\text{кр}}$.

Заключение. Применение ротационного точения многогранными резцами для изготовления деталей типа вала подтверждает эффективность использования предложенного метода обработки, который позволяет уменьшить количество технологических переходов, уменьшить влияние износа инструмента на точность и качество обрабатываемых поверхностей, снизить основное технологическое время. Кинематика процесса резания обеспечивает гарантированное дробление стружки и ее отвод из зоны резания, что благоприятно сказывается на условиях работы режущей части инструмента, кроме того, снижается интенсивность теплового износа и обеспечивается требуемое качество обработки поверхности.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-08-00508).

Acknowledgments. This work was supported by the Russian Found of Fundamental Investigations (grant RFFI № 14-08-00508).

Библиографические ссылки

1. Коновалов Е. Г. Основы новых способов металлообработки. Минск : Машиностроение, 1961. 286 с.

2. Бобров В. Ф., Иерусалимский Д. Е. Резание металлов самовращающимися резцами. М. : Машиностроение, 1972, 111 с.

3. Ротационное резание материалов / П. И. Ящерицын [и др.]. Минск : Наука и техника, 1987. 229 с.

4. Грановский Г. И. Кинематика резания. М. : Машгиз, 1948. 201 с.

5. Способ лезвийной обработки валов с профилем «равноосный контур» : а. с. 1126375 СССР : МКИ[3] В 23 В 1/00 / Э. В. Рыжов, Н. С. Индаков, Э. А. Петровский и др. Опубл. 30.11.1984.

6. Индаков Н. С. Чистовое точение РК – профильных валов многогранными ротационными резцами // Вестник машиностроения. 1991. № 1. С. 64–65.

7. Indakov N. S., Binchurov A. S. Turning by multifaceted cutters // Russian Engineering Research. 2014. Vol. 34, No. 1. Pp. 52–54. DOI: 10.3103/S1068798X14010080.

8. Индаков Н. С., Бинчуров А. С. Исследование метода ротационного точения многогранными резцами // Станки инструмент (СТИН). 2013. № 6. С. 21–24.

9. Indakov N. S., Binchurov A. S. Geometry of Multifaceted Rotary Cutters // Russian Engineering Research. 2014. Vol. 34, No. 2. Pp. 79–82. DOI: 10.3103/S1068798X14020051.

10. Индаков Н. С., Бинчуров А. С. Особенности ротационного точения многогранными резцами // Вестник машиностроения. 2013. № 10. С. 56–58.

11. Ротационный резец : пат. 2463130 Рос. Федерация : МПК В 23 В 27/12 / Индаков Н. С., Гордеев Ю. И., Бинчуров А. С. Опубл. 10.10.2012.

12. Индаков Н. С., Бинчуров А. С. Особенности геометрии многогранных резцов для ротационного точения // Вестник машиностроения. 2013. № 11. С. 38–41.

13. Индаков Н. С., Бинчуров А. С. Ротационное точение многогранными резцами // Современные инновации в науке и технике : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2012. С. 71–74.

14. Индаков Н. С., Бинчуров А. С. Метод ротационного точения многогранными резцами // Вестник ассоциации выпускников КГТУ. 2011. № 20. С. 146–149.

15. Indakov N. S., Gordeev Y. I., Binchurov A. S. Method of Rotational Turning With Multifaceted Cutters // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 124, № 1. P. 012150.

16. Armarego E. J. A., Karri V., Smith A. J. R. Fundamental studies of driven and self-propelled rotary tool cutting processes – I. Theoretical investigation // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1994. Vol. 34, № 6. Pp. 785–801.

17. Armarego E. J. A., Karri V., Smith A. J. R. Fundamental studies of driven and self-propelled rotary tool cutting processes – II. Experimental investigation // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1994. Vol. 34, № 6. Pp. 803–815.

References

1. Konovalov E. G. *Osnovy novykh sposobov metalloobrabotki* [Fundamentals of New Metalworking Methods]. Minsk, Mashinostroenie Publ., 1961p.

2. Bobrov V. F., Ierusalimskii D. E. *Rezanie metallov samovrashayushchimisya reztsami* [Metal Cutting by Rotating Tools], Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972 p.

3. Yashcheritsyn P. I., Borisenko A. V., Drivotin I. G., and Lebedev, V. Y. *Rotatsionnoe rezanie materialov* [Rotary Cutting of Materials], Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1987 p.

4. Granovsky G. *Kinematika rezanie* [Kinematics of cutting]. Moscow, Mashgiz Publ., 1948, 201 p.

5. Ryzhov E. V., Indakov N. S., Petrovsky E. A. et al. *Sposob lezviynoy obrabotki valov s profilem "ravnoosnyy kontur"* [A process of processing blade shafts with the profile "equiaxed contour"]. Patent USSR, No. 1126375.

6. Indakov N. S. [Finish turning RK – core shafts multifaceted rotary cutters]. *Vestnik Engineering*. 1991, No. 1, P. 64–65 (Russ.).

7. Indakov N. S., Binchurov A. S. Turning by multifaceted cutters. *Russian Engineering Research*, 2014, Vol. 34, No. 1, P. 52–54. DOI: 10.3103/S1068798X14010080.

8. Indakov N. S. Binchurov A. S. [Research by rotational turning indexable cutters]. *Machine tools (STIN)*. 2013, No. 6, P. 21–24.

9. Indakov N. S., Binchurov A. S. Geometry of Multifaceted Rotary Cutters. *Russian Engineering Research*. 2014, Vol. 34, No. 2, P. 79–82. DOI: 10.3103/S1068798X14020051.

10. Indakov N. S., Binchurov A. S. [Features turning rotary cutters multifaceted]. *Vestnik engineering*. 2013, No. 10, P. 56–58 (In Russ.).

11. Indakov N. S., Gordeev Y. I., Binchurov A. S. *Rotatsionniy rezets* [Rotary cutter]. Patent RF. No. 2463130.

12. Indakov N. S., Binchurov A. S. [Features polyhedral geometry of the rotary cutters for turning]. *Vestnik Engineering*. 2013, No. 11, P. 38–41 (In Russ.).

13. Indakov N. S., Binchurov A. S. [Rotational turning indexable cutters]. *Modern innovations in science and technology: Materials IX-th International Scientific and Practical Conference*. South-West. state. Univ. Kursk, 2012, P. 71–74.

14. Indakov N. S., Binchurov A. S. [The method of turning the rotary cutters multifaceted]. *Vestnik of the Association of graduates KSTU*. 2011, No. 20, P. 146–149 (In Russ.).

15. Indakov N. S., Gordeev Y. I., Binchurov A. S. Method of Rotational Turning With Multifaceted Cutters. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing.* 2016, Vol. 124, No. 1, P. 012150.

16. Armarego E. J. A., Karri V., Smith A. J. R. Fundamental studies of driven and self-propelled rotary tool cutting processes – I. Theoretical investigation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture.* 1994, Vol. 34, No. 6, P. 785–801.

17. Armarego E. J. A., Karri V., Smith A. J. R. Fundamental studies of driven and self-propelled rotary tool cutting processes – II. Experimental investigation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1994, Vol. 34, No. 6, P. 803–815.

© Индаков Н. С., Гордеев Ю. И., Бинчуров А. С., Киселев Д. И., Ясинский В. Б., 2017

УДК 621.391

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 387–395

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ЗАМКНУТОГО КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА УЧАСТКЕ ТРУБОПРОВОДА ПОД УПРАВЛЕНИЕМ КОНТРОЛЛЕРА «ОВЕН ПЛК100 220»

А. О. Калинин*, М. В. Посконин, М. В. Сарамуд, В. В. Лосев, И. В. Ковалев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: andrey.kalinin@phkp.ru

Рассматривается проблема временных задержек при передаче информации от первичного преобразователя к управляющему органу в автоматических системах управления технологическими процессами. В настоящее время отсутствуют методики оценки влияния временных задержек информационного сигнала на время реакции контура регулирования, что приводит к неэффективному использованию ресурсов систем. Увеличенный временной интервал между изменением технологического параметра и управляющим воздействием также может привести к негативным последствиям. В качестве инструмента для исследования системы выбрана параметрическая идентификация отдельных узлов с последующим составлением циклограммы замкнутого контура регулирования. В процессе синтеза циклограммы временных задержек производится разделение структурной схемы контура регулирования на две составные части: регулятивную (отображает элементы рассматриваемого контура регулирования, непосредственно участвующие в технологическом процессе) и информативную (отображает элементы, не влияющие на процесс автоматического регулирования технологического параметра) карты прохождения сигнала. Разделение на элементы, относящиеся к регулятивной или информативной карте, производится на основании влияния на суммарное время реакции системы рассматриваемого контура автоматического регулирования. Учитывая технические параметры каждого узла регулятивной карты и общей технической документации, составляется функциональная схема временных задержек каждого элемента в виде графического изображения (циклограммы). Исходя из полученных моделей составляются две циклограммы с максимальным и минимальным быстродействием рассматриваемого контура регулирования путем смещения моделей элементов относительно друг друга. В качестве примера приведен расчет отдельного контура регулирования давления воздуха в трубопроводе, состоящего из первичного преобразователя «МЕТРАН 100 ДИ 1051», устройства связи с объектом (УСО) «ЭЛЕМЕР EL 4019», программируемого логического контроллера «ОВЕН ПЛК100 220», УСО «ЭЛЕМЕР EL 4024», исполнительного механизма МЭО-6,3/20-0,63-01, обеспечение связи между контроллером и УСО осуществляется при помощи сетевого интерфейса RS485 (протокол MODBUS RTU).

Ключевые слова: время реакции системы, временные задержки, параметрическая идентификация, циклограммы регулятивной карты прохождения сигнала.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 387–395

METHODS FOR CALCULATING THE TIME CHARACTERISTICS OF THE ELEMENTS OF AN AUTOMATED CONTROL SYSTEM ON THE EXAMPLE OF A CLOSED LOOP FOR REGULATING THE PRESSURE IN A PIPELINE SECTION UNDER THE CONTROL OF THE “OWEN PLC100 220”

A. O. Kalinin*, M. V. Poskonin, M. V. Saramud, V. V. Losev, I. V. Kovalev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: andrey.kalinin@phkp.ru

This article deals with the problem of time delays in the transmission of information from the primary drive to the governing body with automatic process control systems. Nowadays there are no methods which check the effect of time delays of the information signal on the loop response time, which leads to an inefficient use of system resources. The longer time interval between the change in process variable and control can also lead to negative consequences. As a tool for the study of the system the parametric identification of each selected component followed by drawing a time sequence diagram is used. During the synthesis of the sequence diagrams of time delays, the structural diagram

of the control loop is separated into two components: regulative (displays the elements of the control loop directly involved in the process) and informative (maps elements that do not affect the process of automatic adjustment of the process parameter). Separation of the elements related to regulatory or informative map is based on the effect on the total time under consideration of automatic control loop system response. Taking into account the technical parameters of each node of the regulatory chart and the general technical documentation, a model of the functioning of each element in the form of a graphic image (sequence diagrams) is compiled. Based on the models obtained, two sequence diagrams are compiled with the maximum and minimum speed of the control loop under consideration, by shifting the model of elements relative to each other. As an example, there is a calculation of a separate air pressure control loop in the pipeline, consisting of: a "METRAN 100 DIO 1051" primary transducer, an object communication device (UCO) "ELEMER EL 4019", a programmable logic controller "OWEN PLC 100 220", a UEL "ELEMER EL 4024", 6.3 / 20-0.63-01, the communication between the controller and the USO is carried out using the RS485 network interface (MODBUS RTU protocol).

Keywords: system reaction time, time delays, parametric identification, sequence diagrams of the regulatory signal transmission map.

Введение. В процессе эксплуатации автоматических систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) могут возникать аварийные ситуации, имеющие глобальные негативные последствия, такие как повреждение узлов оборудования, брак, причинение вреда здоровью человека и окружающей среде [1]. Зачастую это связано с несвоевременной реакцией системы автоматического управления на происходящие изменения критических параметров в технологическом процессе. Причиной тому является отсутствие методологии анализа временных характеристик АСУ ТП. Современный уровень развития технических систем вызывает необходимость решения как теоретических, так и практических задач идентификации состояния отдельных элементов системы и каналов передачи информации [2]. Однако при изучении структурно сложных объектов нерационально анализировать весь объем информации о системе. При текущем уровне автоматизации объем информации об изучаемой системе чрезмерен [3], тогда как в критически важных процессах участвует лишь ограниченное число контуров управления.

Системный подход к разработке математической модели предполагает единый подход к описанию всего тракта преобразования и передачи информации, начиная с первичного преобразователя, воспринимающего непрерывную измеряемую величину, и заканчивая устройствами цифровой обработки информации и устройствами регулирования [4]. Анализировать рационально лишь контуры автоматического регулирования критических параметров, как на стадии проектирования, так и в уже действующих АСУ ТП. Перечень критических параметров определяется индивидуально для рассматриваемого технологического процесса. Каждый контур автоматического регулирования критического параметра рассматривается индивидуально.

Характерные особенности задачи идентификации в этом случае связаны с наличием обратной связи (ОС), устанавливающей причинно-следственную связь между выходом объекта и входным управляющим воздействием на объект. Применение в этих условиях методов пассивной идентификации без учета влияния обратной связи приводит к неверным результатам или порождает неоднозначность решения задачи идентификации, что приводит к необходимости использования алгоритма параметрической идентификации, учитывающего влияние ОС [5; 6].

Рассмотрим расчет временных задержек для замкнутого контура регулирования давления жидкости в трубопроводе (рис. 1).

Анализ структурной схемы. Введем понятие «карта прохождения сигнала». Это полный путь, который пройдет сигнал, сформированный первичным преобразователем.

Исходя из структурной схемы, карту прохождения каждого сигнала [7] можно разделить на две части:

– регулятивная карта прохождения сигнала (РКС) – включает в себя устройства и сети от первичного преобразователя до исполнительного механизма, наличие которых приводит к увеличению времени реакции контура регулирования;

– информативная карта прохождения сигнала (ИКС) – включает в себя остальные устройства и сети, предназначенные для обработки, хранения, отображения и передачи сигнала, не влияющие на время реакции контура регулирования.

На основании этого объектом для анализа вероятностно-временной характеристики является регулятивная карта прохождения сигнала (РКС).

В результате анализа РКС можно:

– установить недостатки контура автоматического регулирования технологического параметра на стадии проектирования (неподходящий протокол связи, устройство с низким быстродействием, неоптимизированная конфигурация сети и т. д.);

– произвести изменения в уже имеющуюся АСУ ТП для предотвращения возможности возникновения чрезвычайных ситуаций;

– определить функциональные зависимости между допустимыми величинами критических параметров и временем реакции системы, которые способна компенсировать АСУ ТП без наступления негативных последствий.

Состав РКС может быть различным и включать в себя разное число устройств и сетей связи.

1. Первичный преобразователь. По типу формирования сигнала на выходе первичные преобразователи можно разделить на две группы.

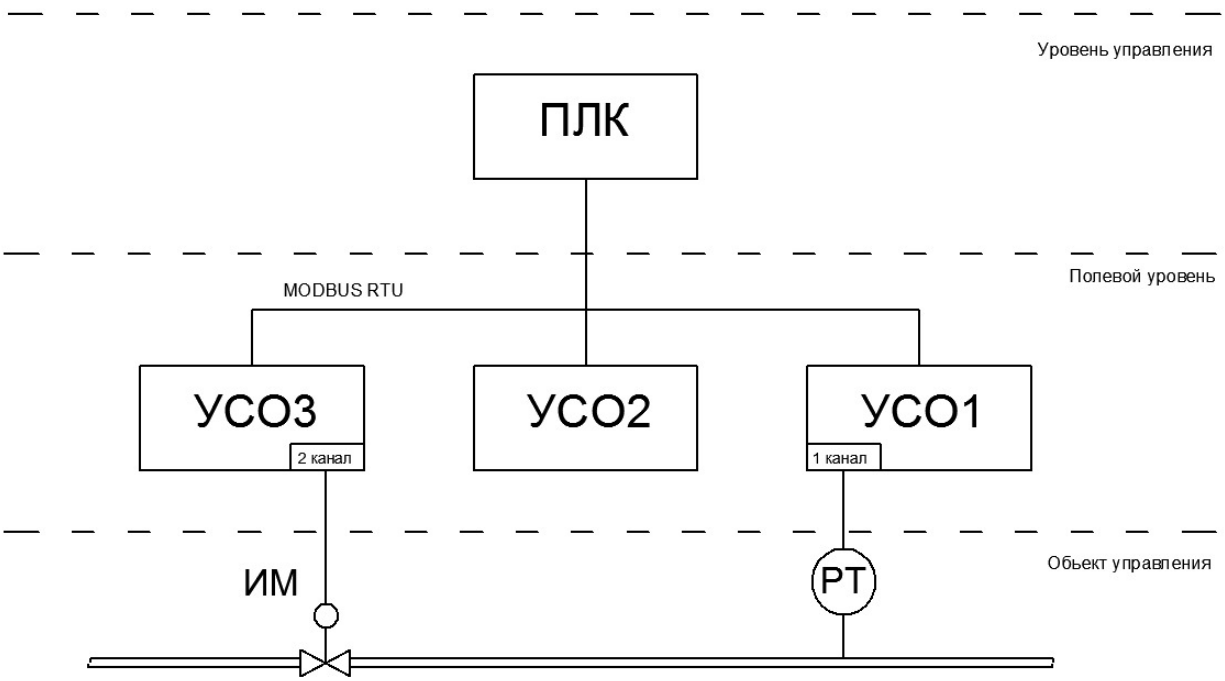


Рис. 1. Структурная схема замкнутого контура регулирования давления жидкости в трубопроводе: РТ – датчик давления «МЕТРАН-100-ДИ-1051»; УСО1, УСО2 – устройство связи с объектом «ЭЛЕМЕР-EL-4019»; УСО3 – устройство связи с объектом «ЭЛЕМЕР-EL-4024»; ПЛК – контроллер «ОВЕН ПЛК100-220»; ИМ – исполнительный механизм МЭО-6,3/20-0,63-01

Fig. 1. Structural diagram of a closed loop for regulating the pressure in a pipeline section: PT – pressure sensor “METRAN-100-DI-1051”; YCO1, YCO2 – communications device with the item “ELEMER-EL-4019”; YCO3 – communications device with the item “ELEMER-EL-4024”; PLK – controller “OWEN PLK100-220”; IM – executive device ME0-6,3/20-0,63-01

1.1. Преобразователь без электронно-цифровых узлов с непрерывным формированием сигнала. Сам сигнал по роду может быть аналоговым или дискретным. Принимаем

$$T_{\text{пп. уст}} = 0 \text{ с},$$

где $T_{\text{пп. уст}}$ – время установления выходного сигнала первичного преобразователя, с.

1.2. Преобразователь с электронно-цифровыми узлами формирования сигнала. Сигнал на выходе по роду может быть как цифровым, так и аналоговым или дискретным, однако его изменение происходит с некоторой задержкой, которая возникает в результате обработки и формирования сигнала в электронном блоке:

$$T_{\text{пп.уст}} = T_{\text{пс}} + T_{\text{эб}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{пс}}$ – время переходного процесса сенсора, с; $T_{\text{эб}}$ – время задержки электронного блока, с.

Время задержки электронного блока определяется по формуле

$$T_{\text{эб}} = t_{\text{д}} + \tau, \quad (2)$$

где $t_{\text{д}}$ – время демпфирования, с; τ – время цикла измерения датчика, с.

2. Устройство связи с объектом (УСО). По типу опроса / вывода информации можно выделить:

2.1. УСО с последовательным опросом каналов. Опрос каналов либо вывод информации производится последовательно один за другим. Таким образом, время задержки сигнала в УСО ($T_{\text{усо}}$) будет определяться по формуле

$$T_{\text{усо}} = N_{\text{кн}} \cdot T_{\text{кн}}, \quad (3)$$

где $N_{\text{кн}}$ – количество каналов, шт; $T_{\text{кн}}$ – время опроса одного канала, с.

2.2. УСО с параллельным опросом каналов. Опрос всех каналов происходит одновременно, соответственно $T_{\text{усо}} = T_{\text{опр}}$, где $T_{\text{опр}}$ – время опроса каналов, с.

Вся информация о задержках имеется в документации к тому или иному устройству.

3. Протокол обмена данными, который можно разделить следующим образом:

3.1. Протоколы последовательного опроса типа Master/Slave. Последовательный опрос ведомых устройств осуществляется одним ведущим устройством (например, протокол Modbus). В протоколах такого типа основным фактором задержки обмена информацией является количество подключенных ведомых устройств.

Для расчета задержек, возникающих в протоколе обмена, необходимо знать: $N_{\text{усо}}$ – количество подключенных ведомых устройств, шт; $T_{\text{зап}}$ – время запроса, с; $T_{\text{тиш}}$ – время паузы после цикла опроса, с; $T_{\text{усо.отв}}$ – время ответа подключенного устройства, с; $P_{\text{ош}}$ – вероятность возникновения коллизии.

3.2. Протоколы с фиксированным временем для передачи информации. В протоколах данного типа [8; 9] ведущее устройство открывает «окно» для приема данных. Время приема строго фиксировано. Данный протокол применяется в системах реального времени [10]. Для расчета задержек в протоколе данного типа необходимо знать: $T_{зап}$ – продолжительность приема информации, с; P – приоритет рассматриваемого сигнала; $T_{тиш}$ – время задержки между «окнами» приема информации, с.

Следует считать приоритет рассматриваемого критического параметра наивысшим, что обеспечивает первоочередную передачу.

3.3. Протоколы с равными участниками сети [11; 12]. Все устройства в сети с протоколом такого типа имеют право сами инициировать передачу данных.

Если в сети все устройства имеют равный приоритет, то это будет приводить к постоянным коллизиям и потере информации, что является недопустимым для большинства САР.

При разделении на приоритеты устройства с низким приоритетом могут никогда не передать информацию из-за большого потока информации с устройств с более высоким приоритетом.

4. Программируемый логический контроллер. Время обработки информации и выдачи сигнала для каждого контроллера описано в технической документации, но может варьироваться от закона регулирования для исследуемого параметра и нагрузки на ПЛК в данный момент времени. $T_{плк}$ – время обработки информации и выдачи сигнала, с.

5. Исполнительный механизм (ИМ). Под временем реакции исполнительного механизма понимается время, прошедшее с момента появления сигнала на его входе до момента начала движения регулирующего органа. Задержки могут быть созданы электронным блоком обработки сигнала ИМ. $T_{им}$ – время реакции исполнительного механизма, с.

При анализе каждого компонента, входящего в состав РКС, к имеющимся формулам могут быть добавлены параметры, влияющие на прохождение сигнала. Вся информация о задержках, имеющихся в конкретном узле, описана в технической документации к устройствам/протоколам связи.

Время реакции контура регулирования критического параметра является переменной величиной в прогнозируемых пределах от T_{min} до T_{max}, где T_{min} – минимальное время реакции системы, с; T_{max} – максимальное время реакции системы, за исключением случаев, когда все устройства и сети связи между ними имеют единый синхронизирующий сигнал, что на практике бывает крайне редко.

Пример расчета РКС. Для примера расчета РКС возьмем контур регулирования давления жидкости в трубопроводе.

Выделив РКС из общей структурной схемы, описываем каждый ее элемент.

1. Интеллектуальный датчик давления «МЕТРАН-100-ДИ-1051» (рис. 1, поз. РТ). Исходя из технической документации, определяем параметры для расчета времени установления выходного сигнала:

$T_{пс}$ – время переходного процесса сенсора, с;

$t_д$ – время демпфирования, с;

τ – время цикла измерения датчика (время обновления данных канала), с.

$T_{пс}$ для данного датчика равен 100 мс, параметр $t_д$ установлен на значение 200 мс, время обновления данных канала равно 100 мс:

$$T_{пп.уст} = 100 + 200 + 100 = 400 \text{ мс}.$$

Отобразим на временной шкале цикл работы первичного преобразователя (рис. 2).

2. Устройство связи с объектом «ЭЛЕМЕР-EL-4019» (рис. 1, поз. УСО1) имеет 8 аналоговых входов. Согласно принципиальной схеме, первичный преобразователь подключен к первому каналу:

– метод опроса каналов – последовательный;

– число каналов равно 8 ($N_{кн} = 8$);

– скорость опроса канала равна 120 мс/канал ($T_{нк} = 120$):

$$T_{усо} = N_{кн} \cdot T_{кн} = 8 \cdot 120 = 960 \text{ мс}.$$

Графически изобразим полученную информацию (рис. 3).

3. Протокол связи ModBUS RTU. Исходя из документации протокола ModBUS RTU, а также параметров исследуемой сети, определяем необходимые для расчета величины:

– количество подключенных ведомых устройств в одну сеть (так как опрос происходит последовательно) $N_{усо} = 3$ шт;

– время запроса определено параметрами протокола $T_{зап} = 100$ мс;

– время ответа подключенного устройства определяется настройками сети (в протоколах Modbus среднее время ответа ведомых устройств равно 0,25 с): $T_{отв} = 200$ мс;

– время паузы после цикла опроса определяется настройками сети: $T_{тиш} = 100$ мс.

Изобразим на временной шкале цикл опроса ведомых устройств рассматриваемой РКС (рис. 4).

4. Программируемый логический контроллер «ОВЕН ПЛК100-220» (рис. 1, поз. ПЛК). Время обработки и формирования выходного сигнала зависит от программы, которая занесена или будет занесена в ПЛК. Инструкция на прибор регламентирует время выполнения цикла программы в пределах 0,05–1 с. Если мы производим анализ существующей РКС, то этот параметр известен и является конкретной величиной. В случае анализа проектируемой АСУ ТП для расчета принимается как минимальное, так и максимальное значение:

$$T_{cpu_{min}} = 50 \text{ мс};$$

$$T_{cpu_{max}} = 1000 \text{ мс}.$$

5. Устройство связи с объектом «ЭЛЕМЕР-EL-40242» имеет 4 аналоговых выхода (рис. 1, поз. УСО3). Согласно принципиальной схеме исполнительный механизм подключен ко второму каналу.

Согласно инструкции на прибор, при установленной скорости обмена данными 9600 бод, скорость чтения регистров $T_{чт} = 100$ мс.

Также, согласно спецификации, требуется пауза не менее 40 мс перед обработкой следующей команды: $T_{паузы} = 40$ мс.

Изобразим на временной шкале цикл формирования выходных сигналов (рис. 5).

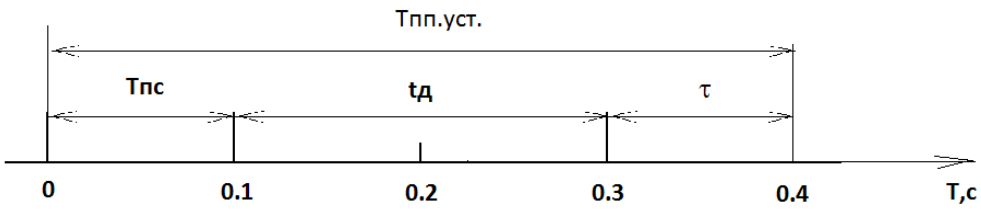


Рис. 2. Цикл работы интеллектуального датчика давления «МЕТРАН-100-ДИ-1051»

Fig. 2. Operating cycle of intelligent sensor of pressure “METRAN-100-DI-1051”

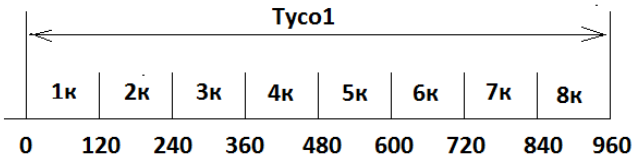


Рис. 3. Цикл работы УСО «ЭЛЕМЕР-EL-4019»

Fig. 3. Operating cycle of YCO “ELEMER-EL-4019”

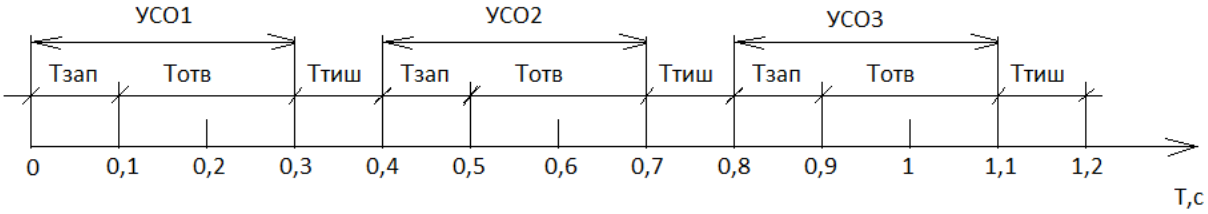


Рис. 4. Цикл опроса ведомых устройств

Fig. 4. Poll cycle of in-house devices

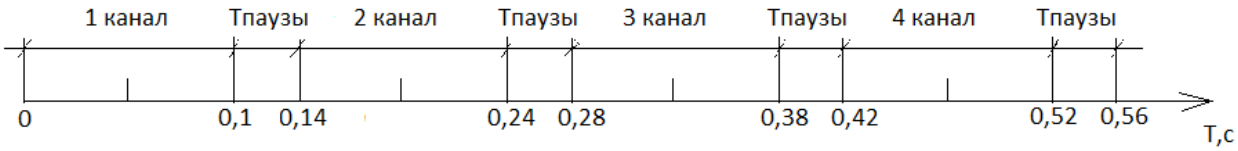


Рис. 5. Цикл формирования выходных сигналов на УСО «ЭЛЕМЕР-EL-4024»

Fig. 5. Formation cycle of loop output signal on YCO “ELEMER-EL-4024”

6. Исполнительный механизм МЭО-6,3/20-0,63-01 (рис. 1, поз. ИМ). В инструкции к прибору не сказано о возникающих задержках и циклах его работы. Однако так как ИМ принимает унифицированный сигнал, в его составе есть электронный блок, включающий в себя АЦП, нормирующий узел обработки, ЦАП, что накладывает определенные задержки на сигнал. Примем $T_{им_{min}}$ = 1 мс и $T_{им_{max}}$ = 10 мс.

Однако для расчета, например предельного значения критического параметра, необходимо учесть время полного хода выходного вала, равное 20 с.

Расчет максимального времени прохождения сигнала по регулятивной карте. Составим графики циклов максимальной продолжительности работы [13] всех устройств и протоколов рассматриваемой РКС (рис. 6), сдвигая их относительно друг друга так, чтобы задержка сигнала в каждом узле была максимальной [14]. Порядок расположения графиков выстраивается согласно логике прохождения сигнала:

– изменение величины критического параметра;
– цикл работы первичного преобразователя;
– цикл работы УСО1;
– цикл передачи данных по ModBUS RTU;
– цикл обработки и формирования сигнала в ПЛК;
– цикл передачи данных по ModBUS RTU;
– цикл обработки и передачи управляющего сигнала на УСО3;
– цикл работы ИМ;
– изменение величины критического параметра.

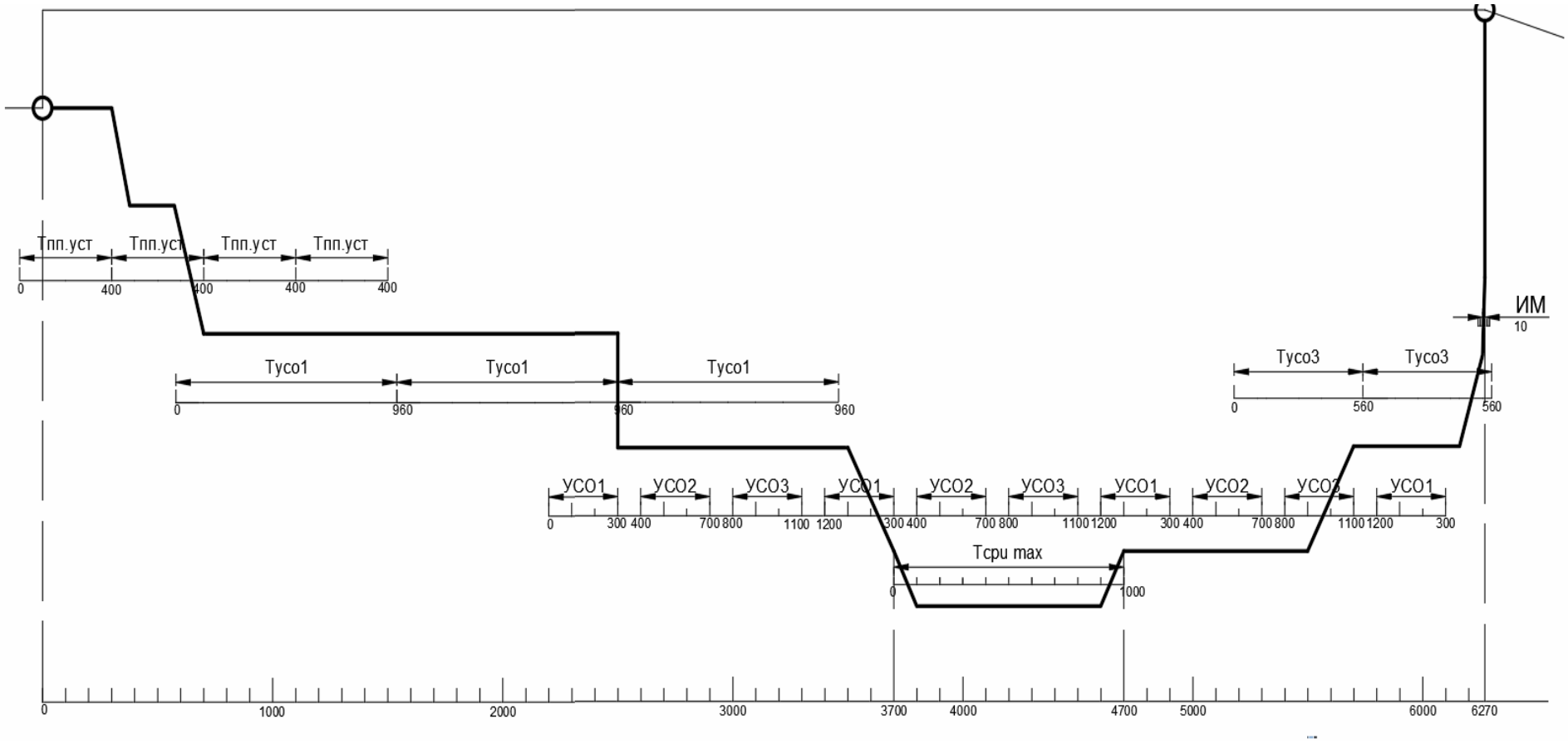


Рис. 6. График циклов максимальной продолжительности работы всех устройств и протоколов рассматриваемой РКС

Fig. 6. Diagram of cycles of maximum time of operation of all devices and reports of the considered РКС

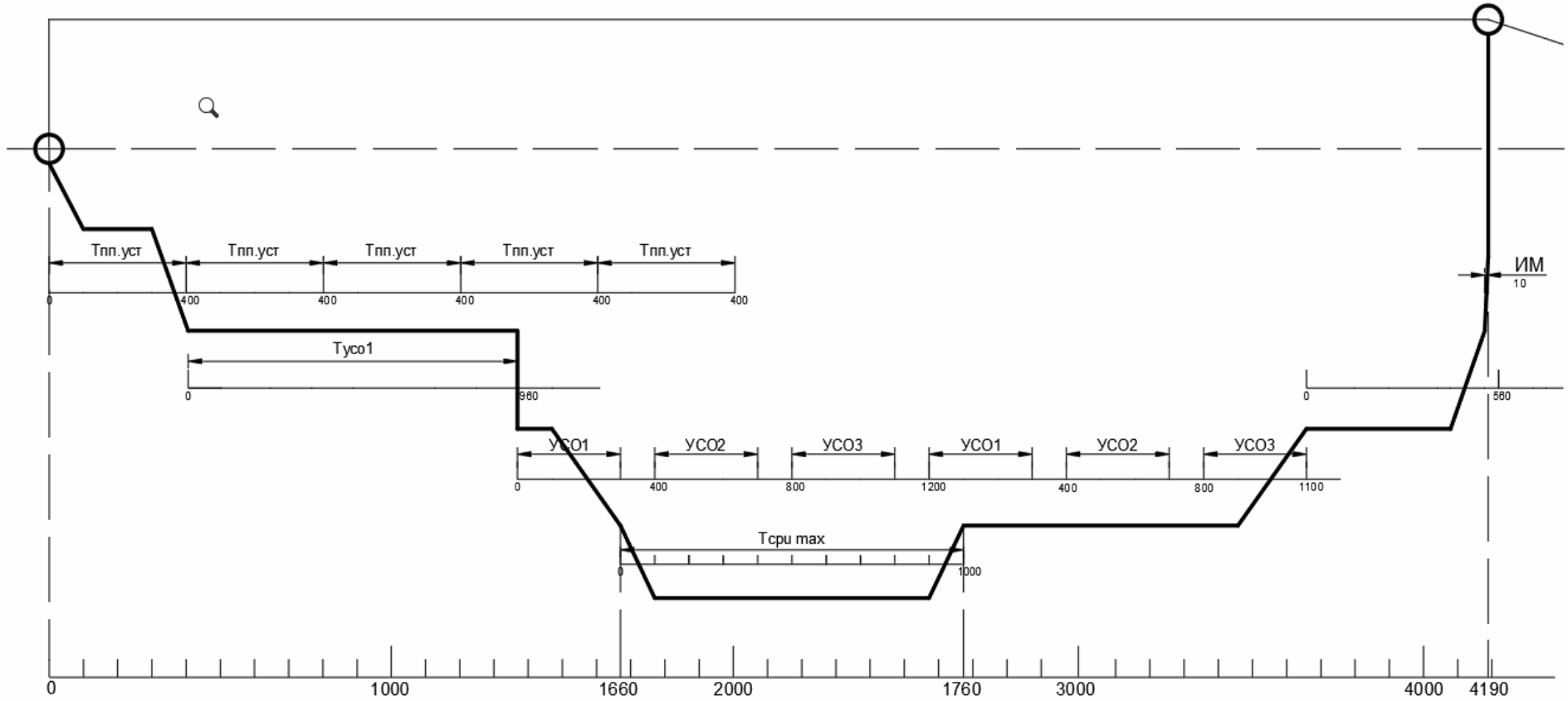


Рис. 7. График циклов минимальной продолжительности работы всех устройств и протоколов рассматриваемой РКС

Fig. 7. Diagram of cycles of minimum time of operation of all devices and reports of the considered РКС

Исходя из данных, полученных графически, выписываем задержки, возникающие в результате прохождения сигнала по РКС: T_{max} = 3700 + 1000 + 1570 = = 6270 мс.

Расчет минимального времени прохождения сигнала по регулятивной карте. Составим графики циклов минимальной продолжительности работы всех устройств и протоколов рассматриваемой РКС (рис. 7), сдвигая их относительно друг друга так, чтобы задержка сигнала в каждом узле была минимальной. Порядок расположения графиков аналогичен вышеуказанному: T_{min} = 1660 + 1000 + 1530 = 4190 мс.

Анализ полученных результатов. Анализируя данную РКС, был вычислен диапазон времени реакции системы на изменение критического параметра: 4190–6270 мс.

Для того, чтобы понять, удовлетворяет ли данный контур регулирования предъявляемым требованиям, необходимо сравнить максимальную скорость изменения регулируемого параметра и сопоставить ее со временем реакции системы [15].

Принимаем время реакции системы как сумму максимального значения времени и запаса надежности, равного 20 % [16]:

$$T_{\text{ркс.}max} = 7524 \text{ мс}.$$

Например, вследствие некорректной работы компрессора начался бесконтрольный набор давления в трубопроводе (0,7 атм/с). Величина задания 5 атм ($P_{нач}$ = 5). Максимально допустимое давление в системе 12 атм ($P_{мах}$ = 12). Исходя из данных, получим:

$$T_{кр} = (12 – 5)/0,7 = 10 \text{ с}.$$

Следовательно, время реакции системы на изменение данного параметра не должно превышать 10 с, в противном случае произойдет разрушение технологического оборудования.

Из неравенства 7,524 < 10 сделаем вывод, что анализируемый контур регулирования критического параметра *удовлетворяет предъявляемым требованиям*.

Рассмотрим случай, когда анализируемая РКС не удовлетворяет условиям безопасности объекта.

Предположим, что бесконтрольный набор давления происходит со скоростью 1 атм/с:

$$T_{кр} = (12 – 5)/1 = 7 \text{ с};$$

$$7,524 > 7 \text{ с}.$$

Анализируемый контур регулирования критического параметра *не удовлетворяет условиям безопасности*. Для предотвращения возможности наступления негативных последствий в случае возникновения аварийной ситуации, необходимо произвести модернизацию замкнутого контура регулирования с целью уменьшения времени реакции.

Заключение. В настоящей работе была приведена методика расчета временных задержек на основании исследования регулятивной карты сигнала. Исходя из полученных результатов, сделан вывод о необходимости разработки методики реструктурирования контура автоматического регулирования с целью достижения требуемого времени реакции системы.

Библиографические ссылки

1. Федоров Ю. К. Порядок создания, модернизации и сопровождения АСУТП. М. : Инфра-Инженерия, 2011. 576 с
2. Шидловский С. В. Математическое моделирование сложных объектов с распределенными параметрами в задачах автоматического управления структурно-перестраиваемых систем // Известия ТПУ. 2006. № 8. С. 19–22.
3. Мандель А. С. Экспертно-статистические методы обработки информации в интегрированных системах управления производством и технологическими процессами // Проблемы управления. 2006. № 6. С. 55–59.
4. Олссон Г., Пиани Д. Цифровые системы автоматизации и управления. СПб. : Невский Диалект, 2001. 557 с.
5. Ходашинский И. А. Идентификация нечетких систем: методы и алгоритмы // Проблемы управления. 2009. № 4. С. 15–23.
6. Кувайскова Ю. Е. Методика структурно-параметрической идентификации системы временных рядов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15, № 4-4. С. 914–918.
7. Калинин А. О. Общая методология расчета времени реакции системы автоматического управления критических параметров технологических процессов // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки : материалы Всерос. науч.-практ. конф. / СибГТУ. Красноярск, 2016. Т. 1. С. 219–221.
8. Performanceaspectsof PROFINET IO / H. Kleines [et al.] // IEEE Transactionsonnuclearscience. 2008. Т. 55, № 1. С. 290–294.
9. Poschraann A., Neumann P. Architectureand-modelofProfinet IO // AFRICON. 7th AFRICON ConferenceinAfrica. IEEE. 2004. Т. 2. С. 1213–1218.
10. Климентьев К. Е. Системы реального времени. Самара : Изд-во СГАУ. 2008.
11. Третьяков С. А. ControllerAreaNetwork (CAN) локальная сеть контроллеров // Электроника. 1998. № 9. С. 14–16.
12. Лопухов И. Сети: от теории к практической реализации. RealTimeEthernet, 2010.
13. Алгоритмизация детерминированных моделей технологических циклов автоматизированных систем управления / И. В. Ковалев [и др.] // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17, № 3. С. 569–574.
14. Сердюков О. В. Методика измерения параметров быстродействия современных ПТК для АСУТП тепловых электростанций // Горение твердого топлива : VIII Всерос. конф. с междунар. участием (13–16 ноября 2012 г.) / Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН. С. 941–948.
15. Kaczor G., Młynarski S., Szkoda M. Verification of safety integrity level with the application of Monte Carlo simulation and reliability block diagrams // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2016. Т. 41. С. 31–39.
16. К вопросу о состояниях работоспособности структурно-сложных систем автоматического управления / Кузнецов П. А. [и др.] // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 4. С. 941–945.

References

1. Fedorov Yu. K. *Poryadok sozdaniya modernizacii I soprovozhdeniya asutp* [The order of creation, modernization and maintenance of process control systems]. Moscow, Infra-Inzheneriya Publ., 2011, 576 p.

2. Shidlovsky S. V. [Mathematical modeling of complex objects with distributed parameters in problems of automatic control of structurally tunable systems]. *Izvestiya TPU*. 2006, No. 8. P. 19–22. (In Russ.)

3. Mandel A. S. [Expert statistical methods of information processing in integrated control systems of production and technological processes]. *Control problems*. 2006, No. 6. P. 55–59. (In Russ.).

4. Olsson G., Piani D. *Cifrovye sistemy avtomatizacii i upravleniya* [Digital systems of automation and control]. St. Petersburg, Nevskiy Dialekt Publ., 2001, 557 p.

5. Khodashinsky I. A. [Identification of fuzzy systems: methods and algorithms]. *Control problems*. 2009, No. 4. P. 15–23 (In Russ.)

6. Kuvayskova Yu. E. [Method of structural parametric identification of a system of time series] Izvestiya *Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.* 2013, Vol. 15, No. 4-4. P. 914–918. (In Russ.).

7. Kalinin A. O. [General methodology for calculating the response time of the automatic control system for critical parameters of technological processes]. *Young scientists in solving urgent problems of science: Mater. All Russia. Scientific practical. Conf.* Krasnoyarsk, SibSTU. 2016, Vol. 2. P. 219–221 (In Russ.).

8. Kleines H. et al. Performance aspects of PROFINET IO IEEE. *Transactions on nuclear science*. 2008, Vol. 55, No. 1, P. 290–294.

9. Poschraann A., Neumann P. Architecture and model of Profinet IO AFRICON, 2004. 7th AFRICON Conferencein Africa. IEEE, 2004, Vol. 2, P. 1213–1218.

10. Klimentyev K. E. [Real time systems]. *Samara: SGAU Publishing House.* 2008 (In Russ.).

11. Tretyakov S. A. Controller Area Network CAN lokalnaya set kontrollerov [Controller Area Network (CAN) local network of controllers] Electronics. 1998, No. 9, P. 14–16 (In Russ.)

12. Lopukhov I. *Seti ot teorii k prakticheskoy realizacii* [Networks: from theory to practical implementation]. Real Time Ethernet, 2010.

13. Kovalev I. V., Zelenkov P. V., Losev V. V., Khrapunova V. V., Efremova S. V. [Algorithmization of deterministic models of technological cycles of automated control systems]. *Bulletin of Siberian State University of Management*. 2016, Vol. 17, No. 3, P. 569–574 (In Russ.).

14. Serdyukov O. V. [Method of measuring the performance parameters of modern PTC for ASUTP thermal power plants]. VIII All Russian Conference with international participation “Combustion of solid fuel” Institute of Thermo physics. S. S. Kutateladze SB RAS. 2012, No. 13–16. P. 941–948 (In Russ.).

15. Kaczor G., Młynarski S., Szkoda M. Verification of safety integrity level with the application of Monte Carlo simulation and reliability block diagrams. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016, Vol. 41, P. 31–39.

16. Kuznetsov P. A., Kovalev D. I., Losev V. V., Kalinin A. O. To the question of the states of efficiency of structurally-complex systems of automatic control. *Bulletin of Siberian State University of Management*. 2015. Vol. 16, No 4, P. 941–945 (In Russ.).

© Калинин А. О., Посконин М. В., Сарамуд М. В., Лосев В. В., Ковалев И. В., 2017

УДК 669.24

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 396–403

ФОРМИРОВАНИЕ КЛАСТЕРНЫХ АГРЕГАТОВ С ПЕНТАГОНАЛЬНОЙ СИММЕТРИЕЙ В ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ОБРАЗЦАХ $Ni_{51}Ti_{49}$

Ф. М. Носков[1], Л. И. Квеглис[1*], М. Н. Волочаев[2], А. К. Абкарян [1], В. С. Жигалов[2]

[1]Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79/10
[2]Институт физики им. Киренского СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50
[*]E-mail: kveglis@list.ru

Исследование особенностей структурно-фазовых превращений в сплаве с эффектом памяти формы $Ni_{51}Ti_{49}$, происходящих при пластических деформациях, является актуальным в связи с широким использованием сплавов системы «никель–титан» при изготовлении разнообразных изделий ракетно-космической и авиационной техники. Проблема структурообразования в никелиде титана при пластической деформации является предметом широких дискуссий и нуждается в дополнительных исследованиях. Целью работы является исследование микроструктуры линзовидных кристаллов, возникающих при пластической деформации образцов $Ni_{51}Ti_{49}$.

Термически обработанные образцы сплава $Ni_{51}Ti_{49}$ подвергались статическому растяжению до разрыва. Растянутые образцы в области шейки утонялись и подготавливались с помощью ионного травления для исследования методами просвечивающей электронной микроскопии.

Обнаружены линзовидные кристаллы с многочисленными экстинкционными контурами. На картинах дифракции электронов от линзовидных кристаллов обнаружена система рефлексов, соответствующих фазе с пентагональной осью симметрии. В результате расшифровки дифракционной картины выявлены матричная фаза B2 с параметром 3,01 Å, фаза с ГЦК-решеткой с параметром 3,68 Å, а также система рефлексов от примитивной кубической решетки с параметром 2,13 Å.

На основании выполненного обзора по модульному представлению кристаллических структур предложена схема образования кластерного агрегата с пентагональной симметрией, позволяющая объяснить экспериментальные результаты. ОЦК-решетка может быть описана как система, состоящая из 6 неправильных октаэдров. ГЦК-решетка может быть представлена как комбинация одного правильного октаэдра, окруженного правильными тетраэдрами, связанными общими треугольными гранями.

В работе связываются десять рефлексов от фазы с пентагональной симметрией, соответствующих d_{111} = 2,13 Å ГЦК-решетки, с набором кристаллических симплексов, образующих икосаэдр. Пентагональные элементы, которые мы наблюдаем в эксперименте, состоят из тетраэдрических кристаллических симплексов ГЦК-решетки, которыми вследствие небольших смещений атомов формируется кластерный агрегат с пентагональной симметрией. Продемонстрировано, как икосаэдрическая фаза с пентагональной симметрией, образованная из тетраэдрических симплексов ГЦК-решетки, может быть вписана в простой куб с соответствующими параметрами.

Представлены теоретические сведения, касающиеся особенности дифракционных методов исследования структуры, позволяющие описать наблюдаемые дифракционные картины, а также связать их с теоретическими представлениям, предложенными в рамках кластерных моделей.

Ключевые слова: никелид титана, просвечивающая электронная микроскопия, линзовидный кристалл, кластер, икосаэдр, пентагональная симметрия.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 396–403

FORMATION OF CLUSTER AGGREGATES WITH PENTAGONAL SYMMETRY IN PLASTICALLY DEFORMED SAMPLES $Ni_{51}Ti_{49}$

F. M. Noskov[1], L. I. Kveglis[1*], M. N. Volochaev[2], A. K. Abkaryan[1],V. S. Zhigalov[2]

[1]Siberian Federal University
79/10, Svobodnyy Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
[2]Kirensky Institute of Physics SB RAS
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
[*]E-mail: kveglis@list.ru

The research of features of structural and phase transformations in alloys with shape memory effect $Ni_{51}Ti_{49}$, occurring during plastic deformation is relevant in connection with the extensive use of alloys of nickel-titanium systems in the manufacture of various products of rocket-space and aviation technology. The problem of structure in NiTi during plastic deformation is the subject of a lot of debates and needs further research. The aim is to study the microstructure of lenticular crystals, appearing as a result of plastic deformation $Ni_{51}Ti_{49}$ samples.

Heat-treated alloy samples $Ni_{51}Ti_{49}$ were static stretched before breaking. The stretched samples were thinned at the neck region and prepared through ion etching for study by transmission electron microscopy.

The lenticular crystals with numerous extinction contours were detected. In the electron diffraction patterns from crystals of lenticular system reflexes found appropriate phase with pentagonal symmetry axis. As a result of the decryption of the diffraction pattern revealed B2 matrix phase with parameter 3.01 Å, phase fcc with parameter 3.68 Å, as well as a system of reflexes of the primitive cubic lattice with a parameter of 2.13 Å.

Based on the review performed by the modular representation of the crystal structures of the scheme of formation of the cluster unit with pentagonal symmetry, can explain the experimental results. BCC lattice can be described as a system consisting of 6 wrong octahedra. FCC lattice can be represented as a combination of a regular octahedron surrounded by a regular tetrahedron, linked by common triangular faces.

The ten reflexes of phase with pentagonal symmetry correspond to d_{111} = 2.13Å FCC lattice. 20 tetrahedrons from FCC lattice are forming an icosahedron due to small displacements of atoms It is demonstrated how icosahedral phase with pentagonal symmetry formed from tetrahedral simplices FCC lattice can be inscribed in a simple cube with the appropriate parameters.

Theoretical information on features of the diffraction methods of the structure investigation was considered, which allowed describing the observed diffraction patterns, as well as linking them with the theoretical concepts proposed in the framework of the cluster model.

Keywords: titanium nickel alloy, transmission electron microscopy, lenticular crystal cluster, the icosahedron, pentagonal symmetry.

Введение. Известно [1], что сплавы системы «никель–титан», обладающие эффектом памяти формы, широко применяются при изготовлении разнообразных изделий ракетно-космической и авиационной техники. В связи с этим актуальным является исследование особенностей структурно-фазовых превращений в сплавах с эффектом памяти формы $Ni_{51}Ti_{49}$, происходящих при пластических деформациях.

Многие исследователи [2–5] наблюдали возникновение монокристаллов линзовидной формы, которые содержали большое количество изгибных экстинкционных контуров, свидетельствующих о значительной кривизне кристаллической решетки, возникающей из-за концентрации напряжений в локализованных областях [6].

В нашей работе [7] в образцах сплава $Ni_{51}Ti_{49}$, подвергнутых растяжению, обнаружены линзовидные кристаллы, отличающиеся составом и структурой от структуры матричного сплава. Сделанные оценки внутренних напряжений показывают, что в зонах локализации деформации могут создаваться напряжения, превышающие предел прочности для всего материала [7].

В работе была показана возможность появления ГЦК-решетки в массивных образцах никелида титана после растяжения [8]. На основании расшифровки дифракционных картин нами показано, что процесс мартенситного превращения структуры B2 может проходить по схеме Курдюмова–Закса. Описание превращений при помощи моделей относительных смещений плоских сеток затруднено в связи с различными обозначениями атомных плоскостей и векторов прямой и обратной решеток для структур с различной симметрией.

Одной из активно развивающихся концепций структурообразования является концепция кластерного моделирования трехмерных структур. В этом методе полиморфное мартенситное превращение описывается не как относительное смещение плоских атомных сеток, а как реконструкция трехмерных координационных полиэдров, составляющих кристаллические структуры фаз-партнеров по фазовому превращению с сохранением их связности [9–12]. Метод основан на представлении каждого структурного состояния в виде комбинации элементарных кристаллических кластеров. Кластер – это система атомов, (частиц) свойства которой зависит от их числа [13]. Кластеры собираются на основе кристаллических модулей и/или симплексов. Кристаллический модуль – однозначно выделенная только по химическим связям в структуре кристаллов пустота в виде полиэдра, заполняющего при параллельном переносе все пространство. Модуль может быть образован несколькими симплексами. Симплекс – полиэдр, образованный атомами структуры, лежащими на поверхности пустой сферы, ребрами которого являются кратчайшие межатомные расстояния (химические связи) [10]. Таким образом, кластерные агрегаты – это комбинация кластеров, порожденных симплексами и/или модулями различных кристаллических решеток.

Нам удалось показать возможность существования фазы с ГЦК-решеткой в никелиде титана [14] при помощи кластерного моделирования. С помощью кластерного моделирования предложена схема мартенситных превращений в никелиде титана из структуры B2 (ОЦК-решетка) в структуру B19′ (ГПУ-решетка) через промежуточную фазу с ГЦК-решеткой.

В работе [15] предложена модель кристаллической структуры мартенситной *R*-фазы в системе Ni–Ti, основанная на кластерном подходе: ромбододекаэдр исходной ОЦК-структуры превращается в конечный кубооктаэдр через промежуточные конфигурации

кластера особой фазы и икосаэдра. Автор [16] допускает, что наблюдаемые структуры с пентагональной симметрией на самом деле периодические и обладают не икосаэдрической, а близкой к икосаэдрической кубической симметрией. В [17] показано, что повышение точечной симметрии кристалла может быть вызвано несоразмерной деформацией исходной периодической структуры, обладающей более низкой точечной симметрией. Несоразмерная деформация приводит к атомным смещениям, в работах В. Г. Пушина, например [18], показана возможность значительных атомных смещений, превышающих несколько десятых долей ангстрема, при мартенситных превращениях в никелиде титана.

Проблема структурообразования в никелиде титана при пластической деформации является предметом широких дискуссий и нуждается в дополнительных исследованиях.

Цель работы – исследование микроструктуры линзовидных кристаллов, возникающих при пластической деформации образцов $Ni_{51}Ti_{49}$.

Задачи работы:

1. Методами электронной микроскопии исследовать микроструктуру утоненных массивных образцов сплава $Ni_{51}Ti_{49}$, подвергнутых растягивающей нагрузке на испытательной машине.

2. Методами дифракции электронов исследовать структурно-фазовые превращения при формировании линзовидных кристаллов в области шейки растянутого образца.

3. Объяснить с помощью представлений о кристаллических модулях возможности формирования в зонах локализации деформации кластерных агрегатов с пентагональной симметрией.

Образцы и методы. Термически обработанные образцы сплава $Ni_{51}Ti_{49}$ подвергались статическому растяжению до разрыва на испытательной машине WDW-5E. Для исследования образцов методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопах Hitachi 7700 и JEOL-2100 подготавливали образцы с помощью ионного травления на установке PIPS (Gatan). Подробнее методика изложена в [7].

Экспериментальные результаты. На рис. 1. приведено электронно-микроскопическое изображение утоненного образца $Ni_{51}Ti_{49}$, растянутого до разрыва в области шейки. Наблюдается линзовидный кристалл с многочисленными экстинкционными контурами внутри [7].

Картина дифракции электронов, полученная от линзовидного кристалла, показанного на рис. 1, приведена на рис. 2. Особенностью дифракционной картины является наличие пентагональной симметрии, о которой свидетельствуют десять рефлексов, расположенных с шагом 36° на наиболее интенсивном дифракционном кольце (рис. 2, *а*). Схема расшифровки показана на рис. 2, *б*, а данные сведены в таблицу.

При составлении таблицы исходили из того, что параметр решетки B2 a = 3,01 Å [19]. Значение d_{110} ячейки B2, равной $d_{110} = 3{,}01/\sqrt{2} = 2{,}13$ Å [20], присвоили линии 4 (см. рис. 2, *а*, таблицу). Исходя из этой величины, были получены остальные линии ОЦК-решетки B2, соответствующие исходной матрице, окружающей линзовидный кристалл (см. таблицу).

В нашей работе [14] было показано, что при мартенситном переходе в никелиде титана возможно формирование фазы с ГЦК-решеткой, причем рефлекс $[110]_{ОЦК}$ близок к рефлексу $[111]_{ГЦК}$. Исходя из этой предпосылки, мы присвоили индекс $[111]_{ГЦК}$ линии 4 и, сделав необходимые расчеты, выявили рефлексы ГЦК-решетки (см. таблицу) с параметром a = 3,68 Å. Оставшиеся линии расшифровывались как индексы примитивной кубической решетки с параметром a = 2,13 Å, причем индекс $[100]_{ПК}$ оказался также лежащим на линии 4 (основном дифракционном кольце).

Обсуждение результатов. У. Пирсон [9] описывает структуру ОЦК-решетки (рис. 3) как систему, состоящую из 6 неправильных октаэдров (рис. 3, *а*). Согласно [10] ГЦК-решетка может быть представлена как комбинация одного правильного октаэдра, окруженного правильными тетраэдрами, связанными общими треугольными гранями (рис. 3, *б*).

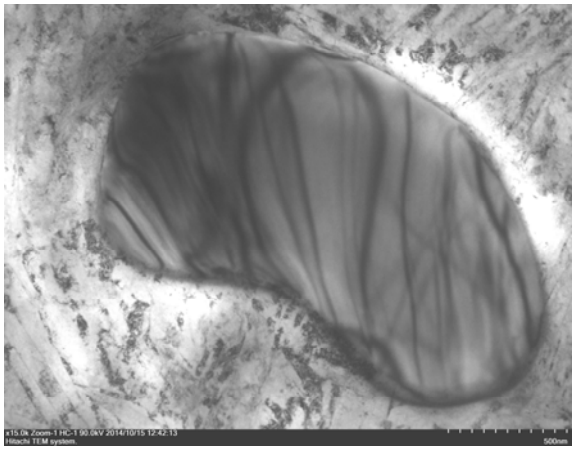
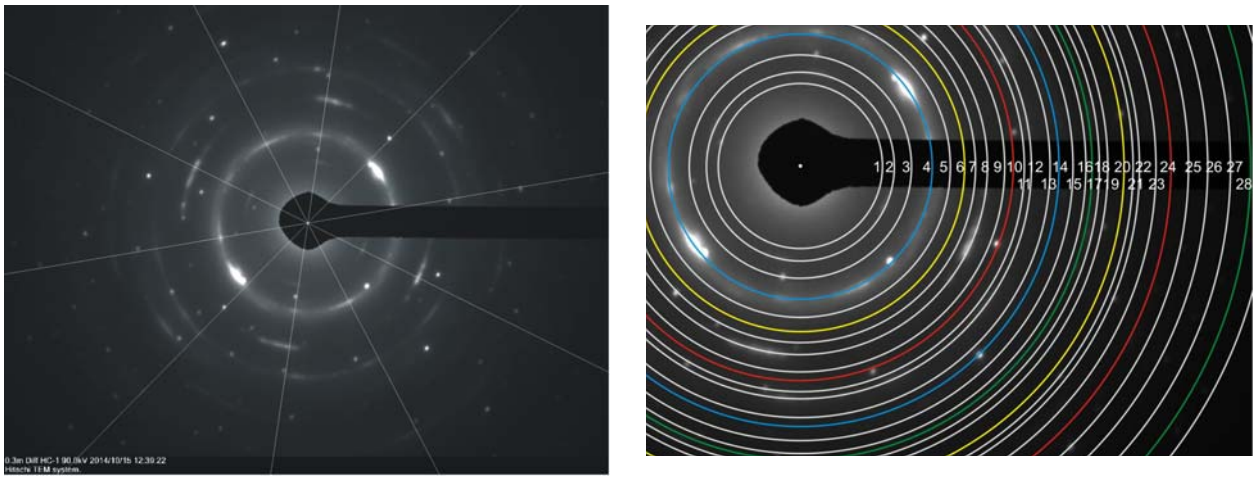


Рис. 1. ПЭМ-изображение линзовидного кристалла, выросшего в зоне локализации напряжений деформированного образца $Ni_{51}Ti_{49}$

Fig. 1. TEM image of lens-shaped crystal grown in the zone of electric porential location of deformed sample $Ni_{51}Ti_{49}$



а *б*

Рис. 2. Дифракционная картина, полученная от линзовидного кристалла, представленного на рис. 1: *а* – десять рефлексов, расположенных с шагом 36° на дифракционном кольце с наибольшей интенсивностью; *б* – схема расшифровки дифракционной картины, представленная в таблице

Fig. 2. Diffraction pattern received from lens-shaped crystal, shown on fig. 1: *a* – ten reflexes situated in increments of 36° on the diffraction circle with the utmost intensity; *b* – scheme of decipher of diffraction pattern shown on table

Результаты расшифровки дифракционной картины, приведенной на рис. 2

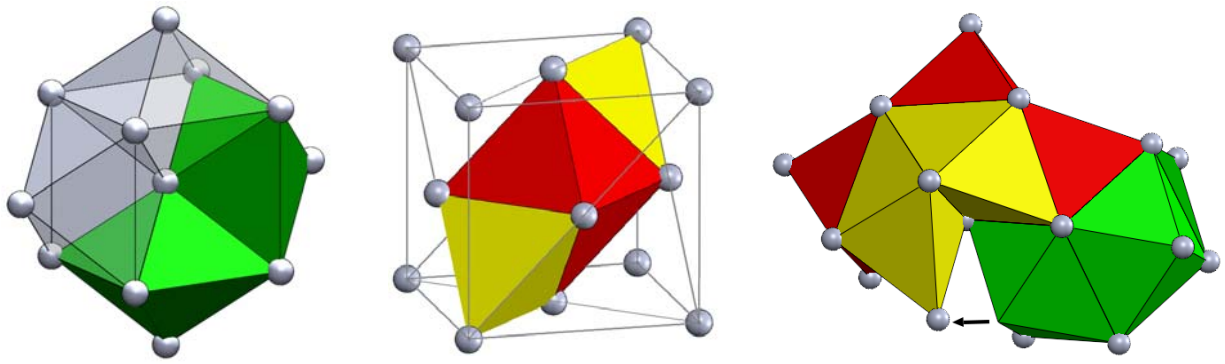
Номер линии	Межплоскостное расстояние *d*, Å	Объемно-центрированная кубическая решетка	Гранецентрированная кубическая решетка	Примитивная кубическая решетка
1	3,44	½ ½ ½ *(+0,04)		
2	2,99	100* (+0,02)		
3	2,53		110*(+0,07)	½ ½ ½*(–0,07)
4	2,13	110	111	100(–0,01)
5	1,86		200(–0,02)	
6	1,71	111*(+0,03)		
7	1,63		210*(–0,02)	
8	1,50	200(+0,01)	211*(0,00)	110(+0,01)
9	1,37	210*(–0,02)		
10	1,31		220(+0,01)	
11	1,25			111(–0,02)
12	1,22	211(+0,01)	221*(+0,01)	
13	1,12		311(–0,01)	
14	1,09		222(–0,03)	200(–0,02)
15	1,03	220(+0,03)		
16	0,98	300*(+0,02)		
17	0,96			210(–0,01)
18	0,94	310(+0,01)		
19	0,91		400(+0,01)	
20	0,87			211(0,00)
21	0,84	222(+0,03)	331(0,00)	
22	0,83		420(–0,01)	

Окончание таблицы

Номер линии	Межплоскостное расстояние *d*, Å	Объемно-центрированная кубическая решетка	Гранецентрированная кубическая решетка	Примитивная кубическая решетка
23	0,79	321(+0,01)		
24	0,75	400(0,00)	422(0,00)	220(0,00)
25	0,71	411(0,00)	511(0,00)	221(0,00)
26	0,68	420(–0,01)		310(–0,01)
27	0,65	332(–0,01)	440(0,00)	311(+0,01)
28	0,62	422(–0,01)	531(0,00)	
29	0,60	511*(–0,02)	442(+0,01)	

Примечания: 1. Числа в скобках показывают, сколько надо добавить/отнять от наших экспериментальных данных до идеального расчетного показателя.

2. Звездочками помечены сверхструктурные рефлексы атомно-упорядоченных фаз.



а *б* *в*

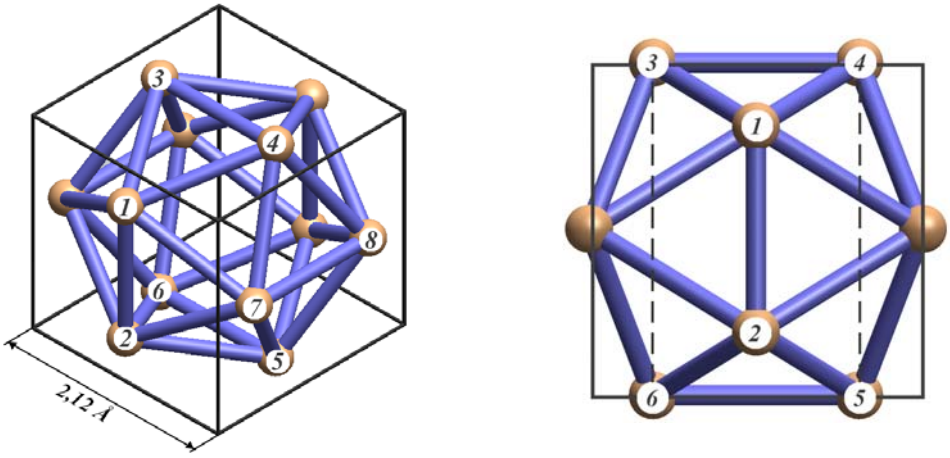
Рис. 3. Модульное представление кристаллических структур: *а* – октаэдрические модули ОЦК-решетки [9]; *б* – ромбоэдрический модуль ГЦК-решетки [10], состоящий из тетраэдрических и октаэдрического симплексов; *в* – кластерный агрегат, образованный связанными друг с другом кристаллическими модулями ОЦК-решетки с октаэдрическими и тетраэдрическими симплексами ГЦК-решетки

Fig. 3. Chinese representation of crystal structures: *a* – octahedral module of OCK-grid [9]; *b* – rhombohedral module of GCK-grid [10] consisting of tetrahedral and octahedral symplexes; *c* – cluster component made of connected crystal modules of OCK-grid with tetrahedral and octahedral symplexes of GCK-grid

Мы связываем десять рефлексов, расположенных на кольце 4 (см. рис. 2), соответствующих d_{111} = 2,13 Å ГЦК-решетки, с набором кристаллических симплесов, образующих икосаэдр. Длина ребра тетраэдрического кристаллического симплекса (которая всегда совпадает с плоскостью типа $(111)_{ГЦК}$) в ГЦК-решетке с параметром 3,68 Å равна d_{220} = 1,31 Å. По нашей гипотезе икосаэдрические элементы, которые мы наблюдаем в эксперименте, состоят из тетраэдрических кристаллических симплесов ГЦК-решетки (рис. 3, *в*). Здесь атомы смещаются (например, как показано стрелкой на рис. 3, *в*), формируя кластерный агрегат с пентагональной симметрией.

Из таблицы видно, что наряду с рефлексами от фаз с ОЦК- и ГЦК-решетками мы обнаружили наличие системы рефлексов, соответствующих примитивной кубической решетке, параметр которой равен 2,12 Å. Это число можно получить, если в куб с указанным параметром примитивной решетки, изображенным на рис. 4, вписать икосаэдр с ребром (расстояние 1-2 и эквивалентные ему на рис. 4), равным расстоянию d_{220} = 1,31 Å ГЦК-решетки (см. таблицу). На рис. 4 продемонстрировано, как икосаэдр вписывается в куб. Для этого ребра типа 1-2, 3-4 или 7-8 располагаются в гранях куба. В икосаэдре все ребра попарно параллельны, каждая пара образует золотой прямоугольник, т. е. прямоугольник с отношением ребер, равным 1,618 [21]. Золотой прямоугольник выделен на рис. 4, *б* как прямоугольник 3-4-5-6. И действительно, 1,31 Å (ребро икосаэдра) умноженное на отношение золотого сечения 1,618, даст 2,12 Å, т. е. d_{100} примитивного куба, показанного на рис. 4 (см. также таблицу).

Следует заметить, что в вершинах примитивного куба на рис. 4 атомы отсутствуют. Согласно [9], решетка с кубической симметрией может и не содержать атомы в вершинах куба. Поэтому наблюдаемые нами наборы рефлексов кубической решетки будут представлять собой экстрарефлексы, которые по своей природе отличаются от сверхструктурных рефлексов, вызванных атомным упорядочением.



а *б*

Рис. 4. Схема, демонстрирующая связь икосаэдра с примитивной кубической решеткой: *а* – ребра икосаэдра типа 1-2, 3-4, 7-8 находятся в ортогональном положении в соответствующих плоскостях куба; *б* – золотой прямоугольник 3-4-5-6, помеченный пунктирной линией, находится в плоскости (200) куба

Fig. 4. Diagram shown connection of icosahedron with primitive cubic lattice: *a* – bonds of icosahedron, sort of 1-2, 3-4, 7-8, located in the orthogonal position in the relevant cube flatness; *b* – golden rectangle 3-4-5-6 marked by dashed line is located in the cube flatness (200)

В работе [22] показано, что появление экстрарефлексов может быть связано, с одной стороны, с растяжением узлов обратной решетки, а с другой – с эффектами двойной дифракции. Расшифровка структуры квазикристаллов по их дифракционной картине трудна и всегда требует дополнительных допущений о взаимном расположении атомов. Авторы [17] утверждают, что структура икосаэдрического квазикристалла может быть рассмотрена как результат искажения ГЦК-решетки.

В книге [23] указывается, что каждый элементарный объем излучает рассеянный волновой пакет с фазовым множителем $\exp(-i\Delta k \times r_j)$, где r_j координата элементарного объема, а Δk – это изменение волнового вектора k в обратном пространстве, $\Delta k \equiv k - k_0$, где k_0 – волновой вектор падающей электронной волны, а k – волновой вектор рассеянной электронной волны. Авторы доказывают, что Фурье-образ потенциала, «видимого» падающим электроном при его прохождении через рассеиватель, прямо пропорционален потенциалу всего кристалла. Этот кластерный агрегат с пентагональной симметрией может не иметь дальнего порядка, однако Фурье-преобразование от деталей такого кластерного агрегата, когерентно ориентированных в объеме исследуемого объекта, может создать картину реально существующего кристалла с дальнем порядком, что и наблюдается на рис. 2.

Из геометрии известно, что в двойственный к икосаэдру многогранник – додекаэдр можно вписать пять кубов. На дифракционной картине наблюдается симметрия 5-го порядка (рис. 2), т. е. возможно одновременное сосуществование в объеме линзовидного кристалла пяти ориентаций кубической решетки. На дифракционной картине видны не точечные рефлексы, как это представлено в работе [24], а дуги с углами примерно 14°–17°. Длина каждой дуги связана с разориентацией тетраэдрических симплексов, составляющих икосаэдр. Фурье-образ с пентагональной осью симметрии может быть получен в двух случаях. Первый случай, если квазикристалл сформирован как единая икосаэдрическая фаза, как это представлено в работе [24]. В этом случае должна быть система точечных рефлексов, выстроенная по правилу Фибоначчи вдоль каждого выбранного направления. В нашем эксперименте это не наблюдается (рис. 2, *а*). Второй случай, если имеется система связанных между собой кластеров, имеющих ближний порядок и заполняющих некоторый объем [23]. В таком случае разориентации между кластерными агрегатами создадут дуговые рефлексы на электронограмме, которая является Фурье-образом от системы наблюдаемых кластерных агрегатов.

Пентагональная симметрия во втором случае является результатом почти когерентных равновероятных пяти ориентаций кластерных агрегатов, состоящих из связанных между собой кристаллических модулей и симплексов ОЦК- и ГЦК-решеток. Подобная схема связанных икосаэдрического кластера и кристаллических модулей ГЦК-решетки была предложена в работе [25].

Таким образом, наблюдаемая нами картина дифракции от линзовидного кристалла может быть проинтерпретирована как дифракция от когерентно ориентированной системы кластерных агрегатов, формирующих элементы трехмерной икосаэдрической структуры (состоящей из тетраэдрически плотноупакованных кристаллических симплексов), встроенных в матрицу с кубической симметрией.

Заключение:

1. Методами электронной микроскопии исследована микроструктура утоненных массивных образцов сплава $Ni_{51}Ti_{49}$, подвергнутых растягивающей нагрузке

на испытательной машине. Обнаружены линзовидные кристаллы с многочисленными экстинкционными контурами.

2. На основании расшифровки картин дифракции электронов от линзовидных кристаллов обнаружены системы рефлексов, соответствующих фазе, обладающей пентагональной осью симметрии.

3. С помощью представлений о кристаллических модулях предложено объяснение возможности формирования в зонах локализации деформации кластерных агрегатов с пентагональной симметрией.

Благодарности. Авторы благодарят сотрудника лаборатории ИРГЕТАС Восточно-Казахстанского государственного технического университета А. В. Джес за помощь в проведении эксперимента.

Acknowledgments. The authors are grateful to A. B. Dzhes, the laboratory worker of the Laboratory IRGETAS of East Kazakhstan State Technical University, for help with the experiment.

Библиографические ссылки

1. Халов М. О. Перспективы применения сплавов с памятью на основе никелида титана в устройствах аэрокосмического назначения [Электронный ресурс] // Труды МАИ : электрон. жур. 2012. № 55. URL: www.mai.ru/science/trudy/.

2. Kolosov V. Yu., Tholen A. R. Transmission electron microscopy studies of the specific structure of crystals formed by phase transition in iron oxide amorphous films // Acta Materialia. 2000. Vol. 48. P. 1829.

3. Багмут А. Г. Электронная микроскопия пленок, осажденных лазерным испарением. Харьков : Підручник НТУ. ХПІ, 2014. 304 с.

4. Квеглис Л. И. Структурообразование в аморфных и нанокристаллических пленках сплавов на основе переходных металлов : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Красноярск : КГТУ, 2005. 280 с.

5. Bolotov I. E., Kolosov V. Yu. Electron microscope investigation of crystals based on bend-contour arrangement. I. Relationship between bend-contour arrangement and bend geometry // Physica Status Solidi. 1982. Vol. (A) 69. P. 85–96.

6. Коротаев А. Д., Тюменцев А. Н., Суховаров В. Ф. Дисперсионное упрочнение тугоплавких металлов. Новосибирск : Наука, 1989. 210 с.

7. Особенности формирования линзовидных кристаллов при мартенситных превращениях в никелиде титана / А. В. Джес [и др.] // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2016. Т. 13, № 1. С. 96–104.

8. Особенности мартенситного превращения в никелиде титана / Р. Б. Абылкалыкова [и др.] // Известия РАН. Серия физическая. 2009. Т. 73, № 11. С. 1642–1644.

9. Пирсон У. Кристаллохимия и физика металлов и сплавов. М. : Мир, 1977. Т. 2. 472 с.

10. Бульёнков Н. А., Тытик Д. Л. Модульный дизайн икосаэдрических металлических кластеров // Известия АН. Серия химическая. 2001. № 1. С. 1.

11. Крапошин В. С., Талис А. Л. Кристаллография и вещество // Природа. 2014. № 11. С. 3–15.

12. Крапошин В. С., Талис А. Л. Комбинаторика и прочность стали // Природа. 2014. № 12. С. 3–12.

13. Елецкий А. В., Смирнов Б. М. Свойства кластерных ионов // УФН. 1989. Т. 159, № 1. С. 45–81.

14. Мартенситные превращения в никелиде титана через промежуточную фазу с ГЦК-решеткой / Л. И. Квеглис [и др.] // Физическая мезомеханика. 2016. Т. 19, № 2. С. 100–107.

15. Крапошин В. С., Нгуен В. Т. Модель кристаллической структуры *R*-мартенсита в сплавах с эффектом памяти формы на основе NiTi // Наука и образование : электрон. науч.-техн. изд-е. 2007. № 6. С. 2.

16. Дмитриенко В. Е. $Al_{86}Mn_{14}$ – квазикристалл или кубический кристалл? // Письма в ЖЭТФ. 1987. Т. 45. С.31–34.

17. Чижиков В. А. Квазикристалл как несоразмерная кристаллическая фаза // Рентгеновское, синхротронное излучения, нейтроны и электроны для исследования наносистем и материалов : материалы IV национальной конф. РСНЭ–2003 (17–22 нояб. 2003, г. Москва) / ИК РАН. 2003. 553 с.

18. Пушин В. Г., Кондратьев В. В., Хачин В. Н. Предпереходные явления и мартенситные превращения / РАН. Ур. отд-ние ; Ин-т физики металлов. Сиб. отд-ние ; Конструкт.-технол. ин-т «РИТЦ». Екатеринбург : УрО РАН, 1998. 367 с.

19. Сплавы с эффектом памяти формы / К. Ооцука [и др.] / пер. с япон. М. : Металлургия, 1990. 224 с.

20. Горелик С. С., Скаков Ю. А., Расторгуев Л. Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ : учеб. пособие для вузов. 3-е изд. доп. и перераб. М. : МИСИС, 1994. 328 с.

21. Крапошин В. С. Золотое сечение в структуре металлов // Металловедение и термическая обработка металлов. 2005. № 8. С. 3–10.

22. Матутес Х. А., Хатанова Н. А. Особенности дифракции электронов на тонких пластинах ε-мартенсита // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. 1982. Т. 23, № 3. С. 64–66.

23. Фульц Б., Хау Дж. М. Просвечивающая электронная микроскопия и дифрактометрия материалов / пер. с англ. В. И. Даниленко ; под ред. А. В. Мохова. М. : Техносфера, 2011. 903 с.

24. Shechtman D. The Icosahedral Quasiperiodic Phase // Physica Scripta. 1988. Vol. 23. P. 49–53.

25. Квеглис Л. И., Жарков С. М., Староверова И. В. Структурная самоорганизация и формирование ПМА в нанокристаллических плёнках $Co_{50}Pd_{50}$ // ФТТ. 2001. Т. 43, № 8. С. 1482–1486.

References

1. Halov M. O. [Prospects of application memory alloys based on nickel-titanium in aerospace devices]. *Elektronnyy zhurnal Trudy MAI*. 2012, No. 55 (In Russ.). Available at: www.mai.ru/science/trudy/ (accessed 27.10.2016).

2. Kolosov V. Yu., Tholen A. R. Transmission electron microscopy studies of the specific structure of crystals formed by phase transition in iron oxide amorphous films. *Acta Materialia*. 2000, Vol. 48, P. 1829.

3. Bagmut A. G. *Jelektronnaja mikroskopija plenok, osazhdennykh lazernym ispareniem* [Electron microscopy of films deposited by laser evaporation]. Har'kov, Pidruchnik NTU. HPI, 2014, 304 p. (In Russ.).

4. Kveglis L. I. *Strukturoobrazovanie v amorfnykh i nanokristallicheskikh plenkakh splavov na osnove perehodnykh metallov. Diss. Dokt. fiz.-mat. Nauk* [Gelation in amorphous and nanocrystalline films based on transition metal alloys. Dr. phys. and мathem. sci. diss.]. Krasnoyarsk, KGTU Publ., 2005, 280 p. (In Russ.)

5. Bolotov I. E., Kolosov V. Yu. Electron microscope investigation of crystals based on bend-contour arrangement. I. Relationship between bend-contour arrangement and bend geometry. *Physica Status Solidi*. 1982, Vol. (A) 69, P. 85–96.

6. Korotaev A. D., Tjumencev A. N., Suhovarov V. F. *Dispersionnoe uprochnenie tugoplavkikh metallov* [Dispersion hardening of refractory metals]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989, 210 p. (In Russ.).

7. Dzhes A. V., Noskov F. M., Kveglis L. I., Volochaev M. N., Tazhibaeva G. B. [Features of formation of lenticular crystals with martensitic transformations in NiTi]. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 2016, Vol. 13, No. 1, P. 96–104 (In Russ.).

8. Abylkalykova R. B., Tazhibaeva G. B., Noskov F. M., Kveglis L. I. [Features of martensitic transformation in NiTi]. *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya.* 2009, Vol. 73, No. 11, P. 1642–1644 (In Russ.).

9. Pirson U. *Kristallokhimiya i fizika metallov i splavov* [Crystal chemistry and physics of metals and alloys]. Moscow, Mir Publ., 1977, Vol. 2, 472 p.

10. Bul'enkov N. A., Tytik D. L. [The modular design of icosahedral metal clusters]. *Izvestiya AN. Seriya khimicheskaya.* 2001, No. 1, P. 1 (In Russ.).

11. Kraposhin V. S., Talis A. L. [Crystallography and substance]. *Priroda*. 2014, No. 11, P. 3–15 (In Russ.).

12. Kraposhin V. S., Talis A. L. [Combinatorics and strength of steel]. *Priroda*. 2014, No. 12, P. 3–12 (In Russ.).

13. Eleckij A. V., Smirnov B. M. [Properties of cluster ions]. *UFN*. 1989, Vol. 159, No. 1, P. 45–81 (In Russ.).

14. Kveglis L. I., Noskov F. M., Volochaev M. N., Dzhes A. V. [Martensitic transformations in NiTi through an intermediate phase with fcc]. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2016, Vol. 19, No. 2, P. 100–107 (In Russ.).

15. Kraposhin V. S., Nguen V. T. [Crystal structure model R-martensite in alloys with shape memory effect based on NiTi]. *Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie.* 2007, No. 6, P. 2 (In Russ.).

16. Dmitrienko B. E. [$Al_{86}Mn_{14}$ – quasicrystal or a cubic crystal?]. *Pis'ma v ZhETF*. 1987, Vol. 45, P. 31–34 (In Russ.).

17. Chizhikov V. A. [Quasicrystal how incommensurate crystal phase]. *Rentgenovskoe, sinkhrotronnoe izlucheniya, neytrony i elektrony dlya issledovaniya nanosistem i materialov : materialy IV Natsional'noy konf. RSNE-2003* [The X-ray synchrotron radiation, neutrons and electrons for studies of nanosystems and materials: Materials of the IV National Conf. RSNE-2003]. Moscow, 2003, 553 p. (In Russ.).

18. Pushin V. G., Kondrat'ev V. V., Hachin V. N. *Predperekhodnye yavleniya i martensitnye prevrashcheniya* [Pretransitional phenomena and martensitic transformations]. Ekaterinburg, RAN. Ur. otd-nie. In-t fiziki metallov, Sib. otd-nie. Konstrukt.-tehnol. in-t "RITC" Publ., 1998, 367 p.

19. Oocuka K., Simidzu K., Sudzuki Ju. *Splavy s effektom pamyati formy* [Alloys with shape memory]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990, 224 p.

20. Gorelik S. S., Skakov Ju. A., Rastorguev L. N. *Rentgenograficheskiy i elektronno-opticheskiy analiz* [X-ray and electron-optical analysis]. Moscow, MISIS Publ., 1994, 328 p.

21. Kraposhin V. S. [The Golden Ratio in the metal structure]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2005, No. 8, P. 3–10 (In Russ.).

22. Matutes X. A., Hatanova N. A. [Features of diffraction of electrons on thin plates of ε-martensite]. *Bectn. Mosk. un-ta. Cep. 3. Fizika. Astronomiya.* 1982, Vol. 23, No. 3, P. 64–66 (In Russ.).

23. Ful'c B., Hau Dzh. M. *Prosvechivayushchaya elektronnaya mikroskopiya i difraktometriya materialov* [Transmission electron microscopy and diffraction materials]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2011, 903p.

24. Shechtman D. The Icosahedral Quasiperiodic Phase. *Physica Scripta*. 1988, Vol. 23, P. 49–53.

25. Kveglis L. I., Zharkov S. M., Staroverova I. V. [The structural self-organization and formation of PMA in nanocrystalline films $Co_{50}Pd_{50}$]. *FTT*. 2001, Vol. 43, No 8, P. 1482–1486 (In Russ.).

© Носков Ф. М., Квеглис Л. И., Волочаев М. Н., Абкарян А. К., Жигалов В. С., 2017

UDC 629.7 : 621.7

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 404–414

METHODOLOGY OF CREATING MANAGEMENT PROGRAMS FOR CASE PRESSES USED IN THE AVIATION INDUSTRY

M. M. Pogartseva

Komsomolsk-na-Amure State Technical University
27, Lenin Av., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russian Federation
E-mail: marry_pog@mail.ru

The article is devoted to the optimization of the technological process for the manufacture of aircraft parts by the tightening method on CNC presses (Computer numerical control). The aim of the work is to create a control program that provides the manufacturing of the details-sheaths of the required accuracy and quality according to the control program in an automated mode. The method of creating control programs proposed in the article takes into account the shortcomings of the S3F software, which is the apparatus for forming control programs for the equipment considered. The method is based on the choice of the optimal loading scheme, under which the deformation program is created, the values of the control coordinates of the press are calculated in accordance with the kinematic model of the press and, as a result, a control program is formed. The mathematical module for creating control programs includes several computational units using modern CAD/CAM/CAE programs. Calculations, analysis and visualization of the tightening process were carried out using software-computational complexes MathCAD, ANSYS, T-LEX, NX, etc. As a result, we obtain a control program that provides more accurate production of the part with a minimum amount of finishing work. The presented method of calculation of the tightening process makes it possible, on the basis of the details of the part, to determine the shape of the tightening punch, and also, if necessary, to adjust the existing tightening punch in order to ensure a more precise manufacturing of the part.

Keywords: tensioning press, CNC, control program, deformation scheme, loading history.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 404–414

МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ ОБТЯЖНЫХ ПРЕССОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

М. М. Погарцева

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет
Российская Федерация, 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, просп. Ленина, 27
E-mail: marry_pog@mail.ru

Рассмотрен вопрос оптимизации технологического процесса изготовления деталей летательных аппаратов методом обтяжки на прессах с ЧПУ. Целью работы является создание управляющей программы, обеспечивающей изготовление деталей-обшивок требуемой точности и качества по управляющей программе в автоматизированном режиме. Предложенная методика создания управляющих программ учитывает недостатки программного обеспечения S3F, которое является аппаратом формирования управляющих программ для рассмотренного оборудования. Методика основана на выборе оптимальной схемы нагружения, под которую создается программа деформирования, рассчитываются значения управляющих координат пресса в соответствии с кинематической моделью пресса и в результате формируется управляющая программа. Математический модуль создания управляющих программ включает несколько вычислительных блоков с применением современных CAD/CAM/CAE-программ. Расчеты, анализ и визуализация процесса обтяжки проводились с применением программно-вычислительных комплексов MathCAD, ANSYS, T-FLEX, NX и др. В результате получается управляющая программа, обеспечивающая более точное изготовление детали, с минимальным объемом доводочных работ. Представленная методика расчета процесса обтяжки позволяет на основе данных о детали определить форму обтяжного пуансона, а также при необходимости скорректировать имеющийся обтяжной пуансон с целью обеспечения более точного изготовления детали.

Ключевые слова: обтяжной пресс, ЧПУ, управляющая программа, схема деформирования, история нагружения.

Introduction. Implementation in production of the equipment with the computer numerical control (CNC) is the main objective of scientific and technical progress in aircraft manufacturing industries. More difficult the process of implementation and management of automation systems is being solved in procuring and forming production [1]. Control of any technological process proceeds by means of change of parameters and the modes of processing. Incorrectly selected modes can result in irreversible defects (tucks, gaps) and, as a result, spoilage of details. Therefore, to find the best solution of the task of manufacturing aircraft details with the lowest expenses providing the given quality, optimization of technological processes is necessary. This task is very important, however a question of optimization of technology is very difficult both from mathematical and practical point of view.

Problem statement. To manufacture aircraft parts from sheet procurement by the tightening method at aircraft factories, the presses of cross (Loire T 600, Loire FET 1500/6000) and longitudinal (Loire FEL 2x500) tightening of the French firm ACB are used (fig. 1).

Control of parts of the press can proceed both in manual and in automated (according to the controlling program (CP)) mode. The S3F software which allows to create control program on the basis of geometry of a detail and physicomechanical properties of material which it is made of, is delivered to the enterprises of the aviation industry together with the equipment.

The S3F software is CAM/CAE module which automatically creates control program in the press CNC language on the basis of the built-in kinematic model (KM) of the press. Such method of forming of control program is automated, rather simple and fast. However details formed according to the control program on the basis of the S3F software do not always provide details of the required quality. The reason of such results is a number of restrictions of the S3F software:

– irrespective of a detail form only one option of tightening according to the scheme И-Р is applied (a bend with the subsequent stretching);

– it is difficult to get control program for aircraft parts having difficult geometry (low technological effectiveness);

– algorithms of search of initial position of the press operating parts and their further movement aren't optimum;

– the deformation model of procurement in use is simplified and doesn't allow to predict puckering;

– the program doesn't help to define necessary deformation (it is set by the user);

– doesn't allow to correct a trajectory of the operating parts of the press movement.

Two versions of the solution of a problem of increase in accuracy of production of the required detail form are possible:

– creation new control program (correction of a trajectory of procurement movement);

– creation new or correction of the available tightening punch.

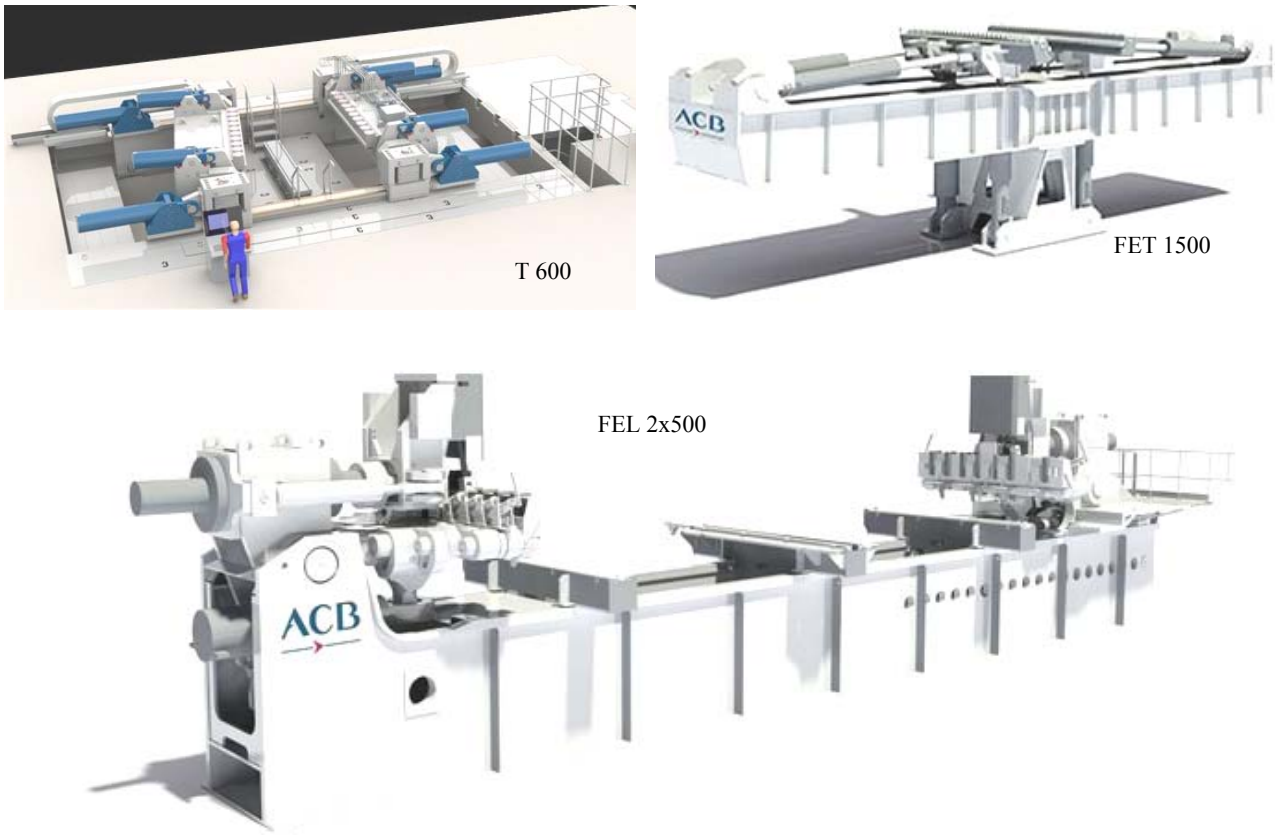


Fig. 1. Tensoning presses

Рис. 1. Обтяжные прессы

As there is no possibility of correction of KM in the S3F software, development of new KM of the press and the mathematical module for forming control program taking into account complexity of geometrical forms of aircraft parts is required. Such KM will give the complete idea of interconnection of movement of parts of the press [2; 3].

The KM in the form of analytical dependences allows to define a necessary combination of values of movements of controlling parameters of the press which will provide more accurate trajectory of tightening of sheet procurement on a punch surface.

Approbation of a trajectory of tightening, distribution of deformations and tension, identification of dangerous sites (zones of possible gaps, formations of folds and puckering) allows the use of CAE software products – ANSYS, MARK, etc.

The KM, realized geometrically in CAD system, allows to define by a graphic method a trajectory of the parts of the press movement on trajectories described by an evolvent. A graphic method is effective to apply only to simple forms of details (an ellipse, the cylinder, a circle). However such search of a trajectory of the movement does not guarantee exact production even for simple forms. Therefore it is convenient to use a graphic method as addition to analytical methods and as means of visualization of a tightening process. To increase accuracy of production of aircraft parts it is necessary to create control program by use of various schemes of loading and optimization of process of tightening. In fig. 2 the scheme of possible ways of realization of process of creating control programs for tensioning presses with CNC is presented.

In fig. 2 the solid lines show an option of control program creation using the S3F software. The dash lines show an option of creation of control program based on a combination of analytical calculations and finite and element modelling. The second option includes several computing units. The dotted lines show an option of creation of control program using graphic programs which is approved by means of finite and element modelling [4].

The analysis of schemes of loading when tightening. As it was stated above, the program of deforming according to the diagram of И-Р is used in the S3F software. The process of B-S is characterized by the fact that a procurement is initially bent on a punch and then in a curved status is exposed to stretching. The frictional forces between a procurement and a punch which appear in the course of stretching reduce the calibrating deformations and exert the negative impact on the process of forming as the detail springing increases.

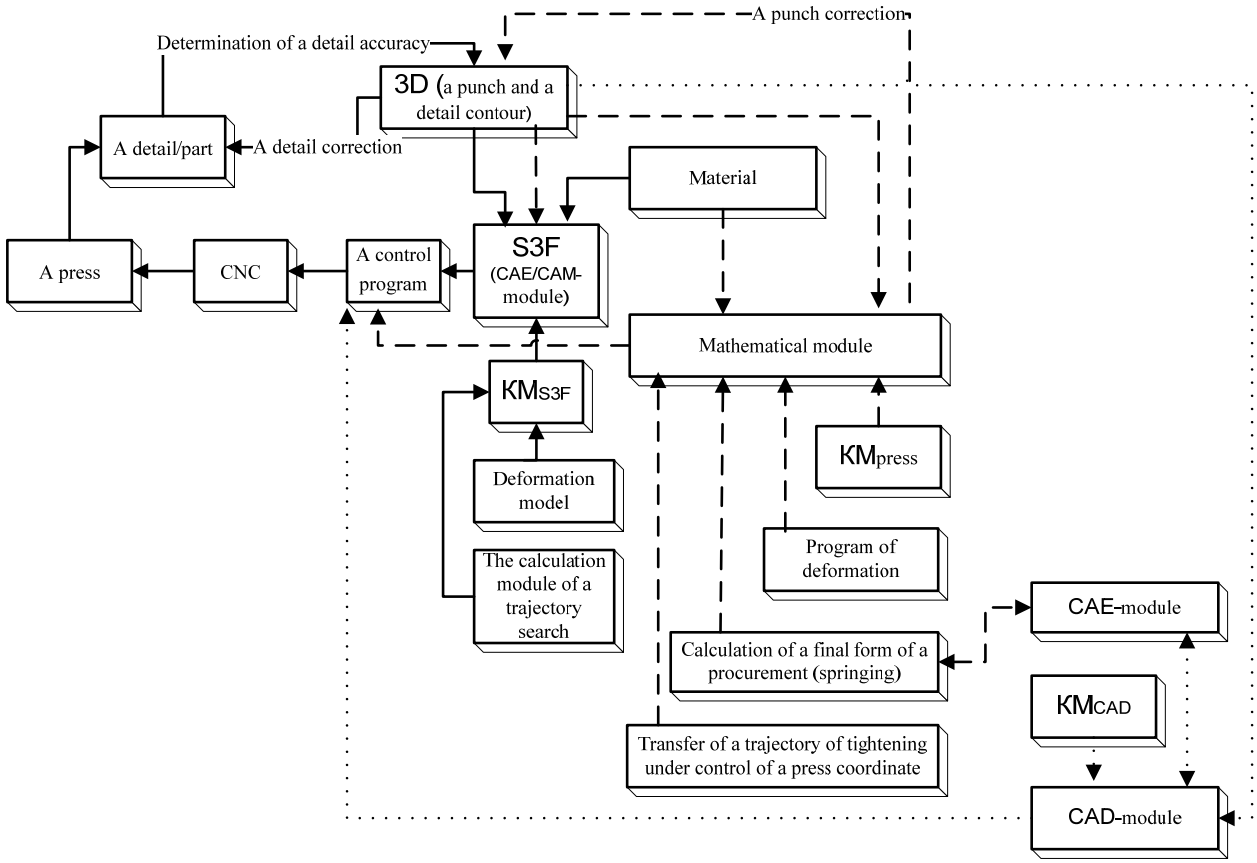


Fig. 2. The diagram of process of creation CP for presses with CNC

Рис. 2. Схема процесса создания УП для прессов с ЧПУ

Technological capabilities of tensioning presses with CNC also allow to realize other schemes: S-B (stretching with the subsequent bend), S1-B-S2 (preliminary stretching, the subsequent bend and the additional calibrating stretching), and also their combinations BS-S (a bend with stretching and the additional calibrating stretching), etc. The process S-B is also characterized by the fact that deformation of stretching uniform on section is originally created, and then at preservation of constancy of the stretching force the bend on a punch of the corresponding curvature is made. Process of S1-B-S2 is a combination of two types of difficult loading of S-B and B1-S to various ratio of sizes of preliminary and additional stretching. In the course of BS-S there is a rounding by a procurement of a working surface of a punch along with procurement stretching, at the same time tension during all process of forming has to increase monotonously in all sections of procurement, so that the forming should occur without unloading. At the same time the angle of coverage of a punch surface by a procurement increases gradually in the process of providing abutment beginning from punch top that promotes reduction of friction forces [5; 6].

In fig. 3 diagrams of deformations and tension for various schemes of tightening and the corresponding charts of deforming are shown.

Formulas for determination of resultant tension for different schemes of loading at the description of a single deformation curve in the form of linearly-stage function of a type are given in table:

$$\sigma = \begin{cases} E \cdot \varepsilon, & \varepsilon \le \varepsilon_{\text{п}}, \\ K \cdot \varepsilon^{n}, & \varepsilon > \varepsilon_{\text{п}}. \end{cases}$$

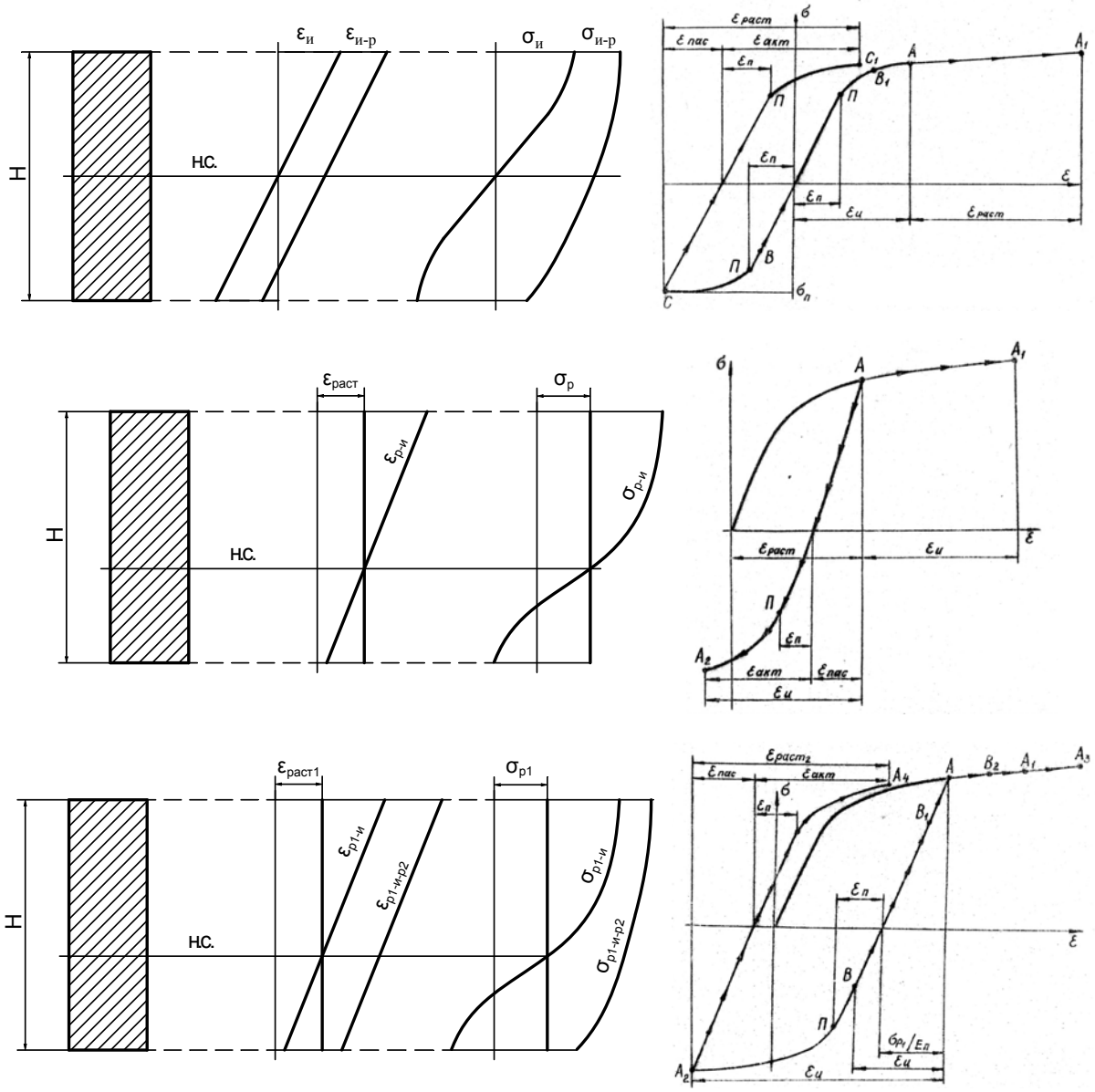


Fig. 3. Diagrams of deformations and tension, charts of deforming

Рис. 3. Эпюры деформаций и напряжений, диаграммы деформирования

The choice of tightening scheme depends on a detail form. Also a technologist faces a question of setting values of initial parameters of tightening process. Therefore when developing technological process it is necessary to carry out the analysis of all schemes of deformation and to choose an optimal variant to manufacture a detail with the least error [7–10].

Definition of a terminating form of a detail for various schemes of a loading. The developed mathematical module allows to calculate analytically a terminating form of a detail using various schemes of tightening. The analysis of results of calculation will allow to choose the most optimal variant of a detail manufacture.

Input data for calculation is the geometrical amount of sheet procurement: H – thickness of a sheet and B – sheet width; R0nar – the external radius of a bend; E, $\sigma_в$, σ_{02} and δ – mechanical characteristics of material; $\varepsilon_{раст1}$ – the relative deformation of preliminary stretching and $\varepsilon_{раст2}$ – the relative deformation of the calibrating stretching (fig. 4).

For implementation of calculations we break a sheet section by height into a set of elementary strips: M – number of elementary strips in 1 mm; N – quantity of elementary strips by section height; Δh – height of an elementary strip (a step of splitting section of a sheet).

For each elementary strip we determine y_k coordinate, width b_k and radius ρ_k. We calculate tension σ_{p1} and effort P_{p1} of preliminary stretching. We define the intense-deformed state (IDS) of a sheet after preliminary stretching σ_{p1}, we calculate deformations of a bend $\varepsilon_и$ and the sheet IDS at a bend after stretching $\varepsilon_{p1и}$ and $\sigma_{p1и.}$

Using a bisection method we find the radius of R0 and the position of a neutral layer H0. We calculate the moment of inertia of J0 relating to neutral axis. We define the IDS of a closing stage of the process of P.

S1-B-S2 – the calibrating stretching after a sheet bend with stretching – $\varepsilon_{p1ир2}$ and $\sigma_{p1ир2}$. We calculate the bending moment of M_z and the calibrating effort of P_{p2}. We find change of the layer curvature passing through the center of gravity $\Delta\chi$ct, we determine residual tension σ_{ost} after unloading and the moment of residual tension relating to the center of masses Mz_{ost}. We calculate a layer curvature χ_{ct} passing through the center of gravity after unloading and then we get detail radius after unloading of Rnar [11].

In fig. 5 the algorithm of definition of a detail form after tightening is presented.

The algorithm in fig. 5 is the solution of a problem of definition of terminating position of procurement – detail form. However, if the detail form the complicated (non-technological) then to get a detail without deviations, without completion due to change of the loading scheme only, is not always possible. In such cases it is possible to increase accuracy of manufacture of a detail for the account of a punch correction. Searching for the anticipated form of a punch is the solution of the inverse task presented in fig. 5. The unit of the program of calculation of a punch form correction enters the mathematical module of searching for optimum parameters of technological process of tightening [12–15].

Formulas of determination of resultant tension

Scheme	Calculated formulas
B-S	Zone of the stretched fibers
	$\sigma_{и\text{-}р} = K_п \cdot (\varepsilon_{и\text{-}р})^n$ $\varepsilon_{и\text{-}р} = \varepsilon_и + \varepsilon_{раст};\ \varepsilon_и = \dfrac{\rho_i - R_{нс}}{R_{нс}}$
	Zone of the compressed fibers
	$\sigma_{и\text{-}р} = \begin{cases} E_п \cdot \varepsilon_{акт}, \text{ if } \varepsilon_{акт} \le \varepsilon_п, \\ K_п \cdot (\varepsilon_{акт})^n, \text{ if } \varepsilon_{акт} > \varepsilon_п, \end{cases} \quad \varepsilon_{акт} = \varepsilon_{раст} + \varepsilon_{пас};\ \varepsilon_{пас} = \dfrac{\sigma_и}{E_п}$ $\sigma_и = \begin{cases} E_п \cdot \varepsilon_и, \text{ if } \lvert\varepsilon_и\rvert \le \varepsilon_п \\ -K_п \cdot \lvert\varepsilon_и\rvert^n, \text{ if } \lvert\varepsilon_и\rvert > \varepsilon_п \end{cases}$
S-B	Zone of the stretched fibers
	$\sigma_{р\text{-}и} = \begin{cases} E_п \cdot \varepsilon_{р\text{-}и}, \text{ if } \varepsilon_{р\text{-}и} \le \varepsilon_п, \\ K_п \cdot (\varepsilon_{р\text{-}и})^n, \text{ if } \varepsilon_{р\text{-}и} > \varepsilon_п, \end{cases} \quad \varepsilon_{р\text{-}и} = \varepsilon_{раст} + \varepsilon_и$
	Zone of the compressed fibers
	$\sigma_{р\text{-}и} = \begin{cases} \sigma_р + E_п \cdot \varepsilon_и, \text{ if } \lvert\varepsilon_и\rvert \le \varepsilon_{пас} + \varepsilon_п, \\ -K_п \cdot (\lvert\varepsilon_и\rvert - \varepsilon_{пас})^n, \text{ if } \lvert\varepsilon_и\rvert > \varepsilon_{пас} + \varepsilon_п, \end{cases}$ $\sigma_р = \begin{cases} E_п \cdot \varepsilon_{раст}, \text{ if } \varepsilon_{раст} \le \varepsilon_п, \\ K_п \cdot (\varepsilon_{раст})^n, \text{ if } \varepsilon_{раст} > \varepsilon_п, \end{cases} \quad \varepsilon_{пас} = \dfrac{\sigma_р}{E_п}$

End table

Scheme	Calculated formulas
S1-B-S2	Zone of the stretched fibers
	$\sigma_{\text{р1-и-р2}} = K_{\text{п}} \cdot \left(\varepsilon_{\text{р1-и-р2}}\right)^{n}$; $\varepsilon_{\text{р1-и-р2}} = \varepsilon_{\text{раст1}} + \varepsilon_{\text{и}} + \varepsilon_{\text{раст2}}$
	Zone of the compressed fibers
	$\sigma_{\text{р1-и-р2}} = \begin{cases} \begin{cases} \sigma_{\text{р1}} + E_{\text{п}} \cdot \left(\varepsilon_{\text{и}} - \varepsilon_{\text{раст2}}\right), \text{ if } \varepsilon_{\text{раст2}} \le \lvert\varepsilon_{\text{и}}\rvert, \\ K_{\text{п}} \cdot \left(\varepsilon_{\text{р1-и-р2}}\right)^{n}, \text{ if } \varepsilon_{\text{раст2}} > \lvert\varepsilon_{\text{и}}\rvert, \end{cases} \text{at } \lvert\varepsilon_{\text{и}}\rvert \le \varepsilon_{\text{пас1}} + \varepsilon_{\text{п}} \\ \begin{cases} E_{\text{п}} \cdot \varepsilon_{\text{акт}}, \text{ if } \varepsilon_{\text{акт}} \le \varepsilon_{\text{п}}, \\ K_{\text{п}} \cdot \left(\varepsilon_{\text{акт}}\right)^{n}, \text{ if } \varepsilon_{\text{акт}} > \varepsilon_{\text{п}}, \end{cases} \text{at } \lvert\varepsilon_{\text{и}}\rvert > \varepsilon_{\text{пас1}} + \varepsilon_{\text{п}} \end{cases}$ $\sigma_{\text{р1}} = \begin{cases} E_{\text{п}} \cdot \varepsilon_{\text{раст1}}, \text{ if } \varepsilon_{\text{раст1}} \le \varepsilon_{\text{п}}, \\ K_{\text{п}} \cdot \left(\varepsilon_{\text{раст1}}\right)^{n}, \text{ if } \varepsilon_{\text{раст1}} > \varepsilon_{\text{п}}, \end{cases}$ $\varepsilon_{\text{пас1}} = \dfrac{\sigma_{\text{р1}}}{E_{\text{п}}}$; $\varepsilon_{\text{акт}} = \varepsilon_{\text{раст2}} + \dfrac{\sigma_{\text{р1-и}}}{E_{\text{п}}}$ $\sigma_{\text{р1-и}} = \begin{cases} \sigma_{\text{р1}} + E_{\text{п}} \cdot \varepsilon_{\text{и}}, \text{ if } \lvert\varepsilon_{\text{и}}\rvert \le \varepsilon_{\text{пас1}} + \varepsilon_{\text{п}}, \\ -K_{\text{п}} \cdot \left(\lvert\varepsilon_{\text{и}}\rvert - \varepsilon_{\text{пас1}}\right)^{n}, \text{ if } \lvert\varepsilon_{\text{и}}\rvert > \varepsilon_{\text{пас1}} + \varepsilon_{\text{п}}, \end{cases}$ $\varepsilon_{\text{р1-и}} = \varepsilon_{\text{раст1}} + \varepsilon_{\text{и}}$

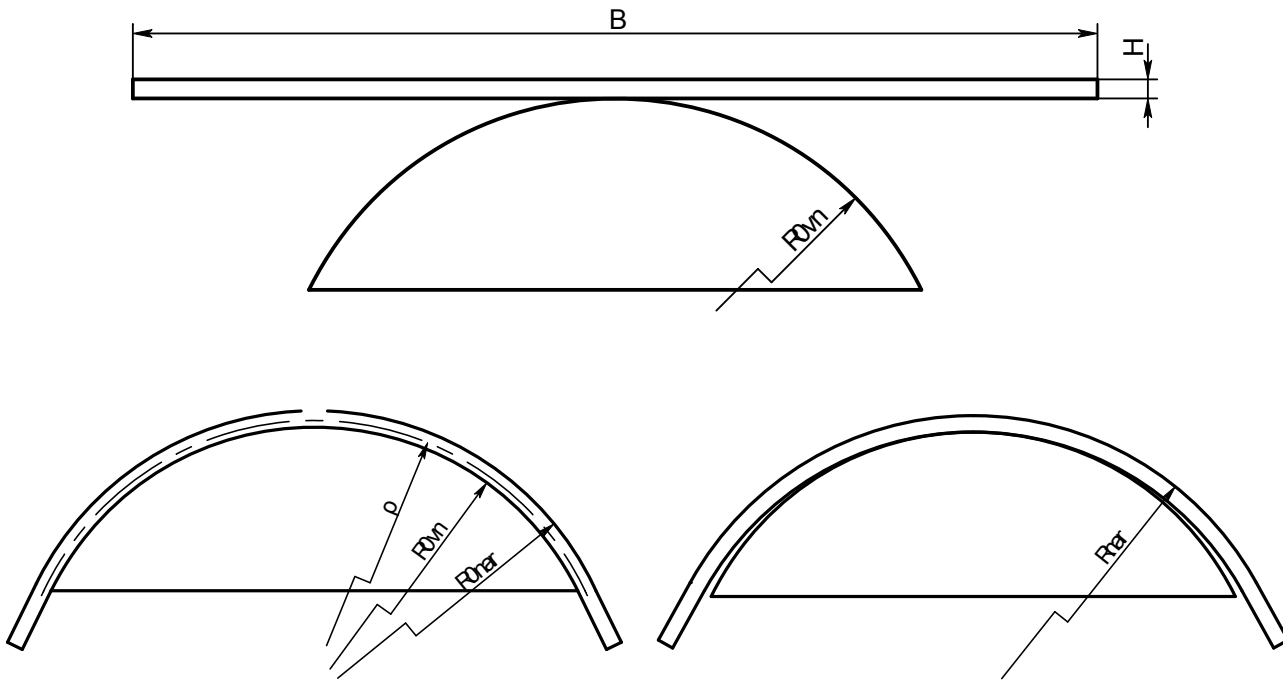


Fig. 4. The position of procurement in the process of tightening

Рис. 4. Положение заготовки в процессе обтяжки

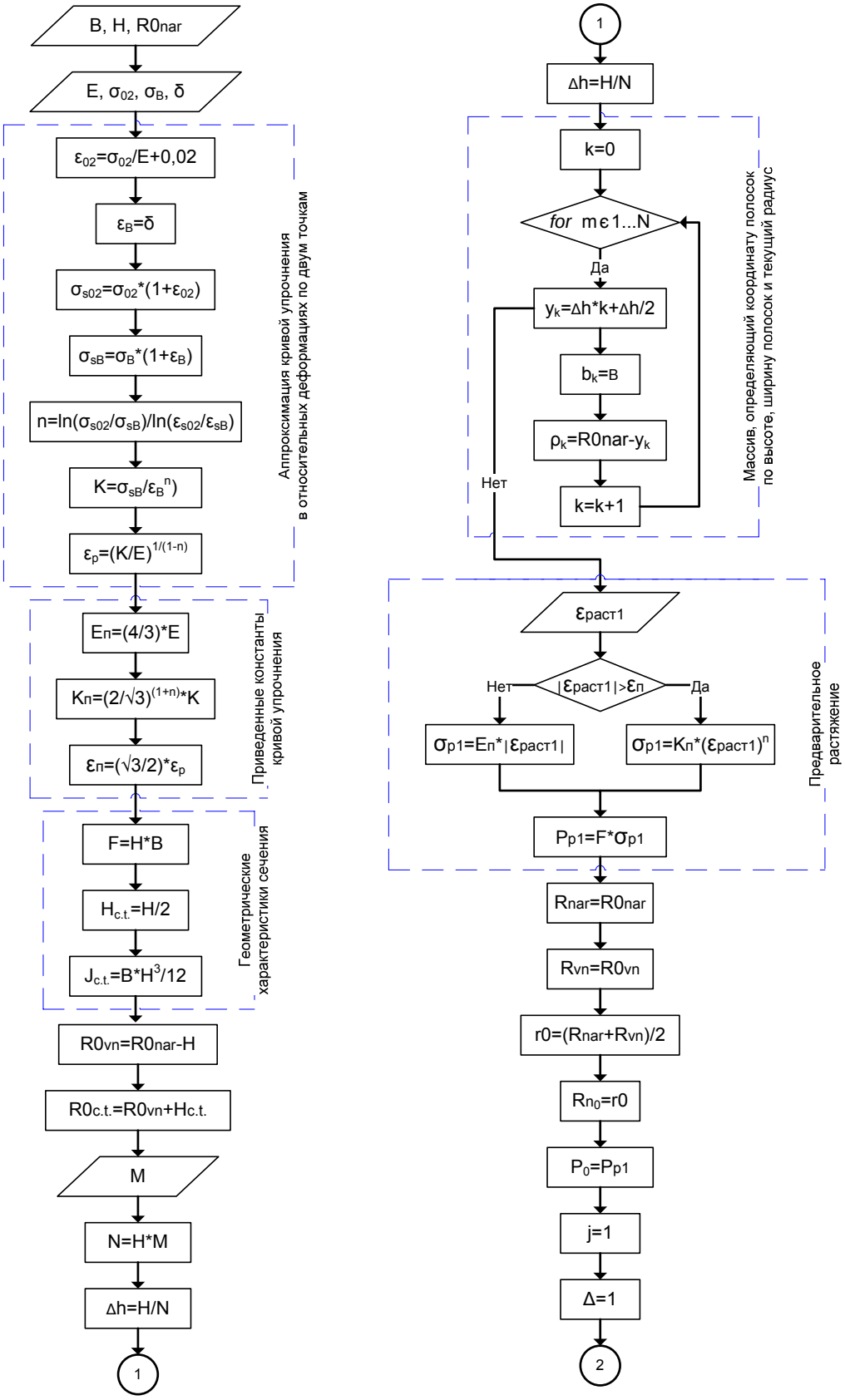


Fig. 5. An algorithm of definition of a detail after tightening (beginning)

Рис. 5. Алгоритм определения формы детали после обтяжки (начало)

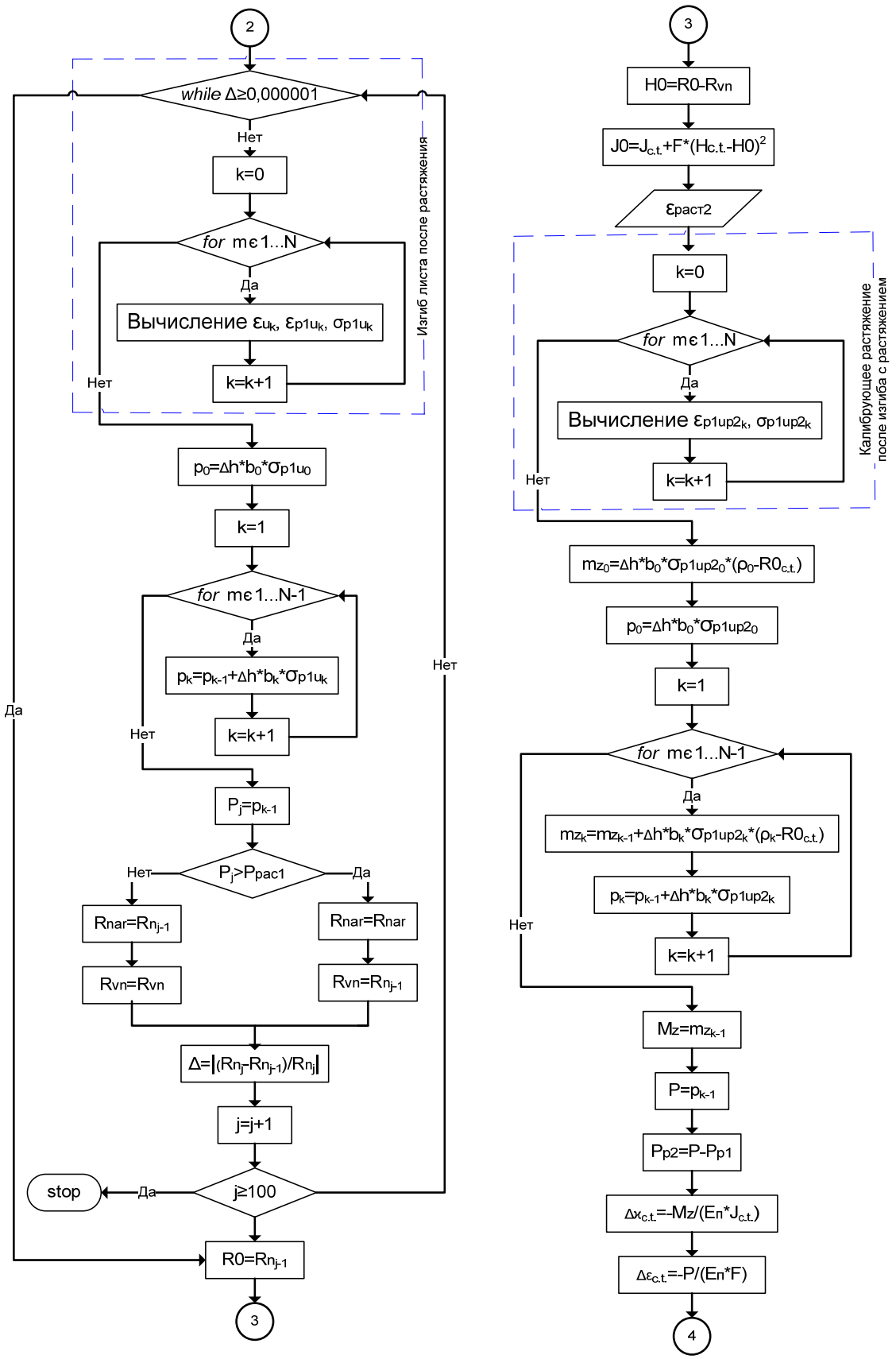


Fig. 5. An algorithm of definition of a detail form after tightening (continuation)

Рис. 5. Алгоритм определения формы детали после обтяжки (продолжение)

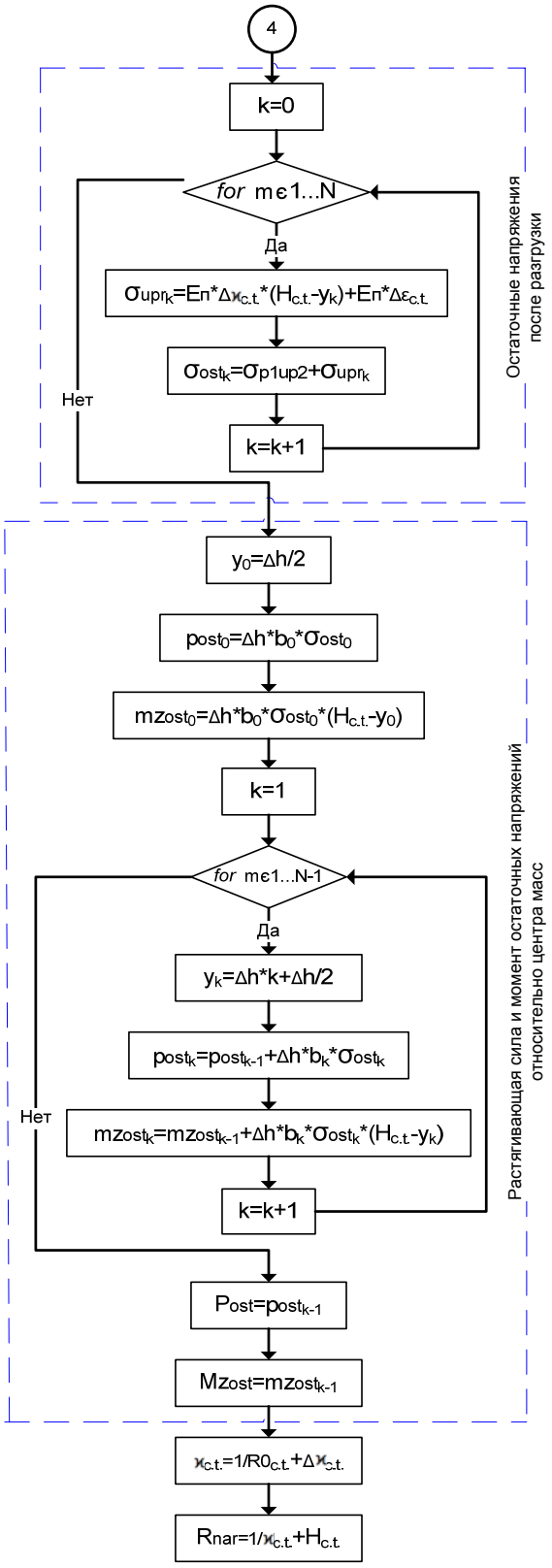


Fig. 5. An algorithm of definition of a detail form after tightening (end)

Рис. 5. Алгоритм определения формы детали после обтяжки (окончание)

Conclusion. The offered method of creating control programs is universal for tensioning presses of aviation assignment. The difference are the KM presses by means of which calculated parameters of process of tightening are transformed to values of controlling coordinates of a press which are reflected in a control program. Creating

such control programs allows to make details of high accuracy in an automated mode and also to exclude or minimize the amount of finishing work.

References

1. Feoktistov S. I. *Avtomatizatsiya proektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov i osnastki zagotovitel'noshtampovochnogo proizvodstva aviatsionnoy promyshlennosti* [Automation of the design of technological processes and equipment for blanking and stamping production of the aviation industry]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2001, 183 p.

2. Pogartseva M. M., Feoktistov S. I. [Development of a mathematical model of the machine for longitudinal tightening FEL 2x500]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya "Fundamental'nye issledovaniya v oblasti sozdaniya innovatsionnykh tekhnologiy i novykh materialov, napravlennykh na razvitie aviatsionnykh i kosmicheskikh kompleksov. Dostizheniya fundamental'noy nauki i obrazovaniya – v innovatsionnye tekhnologii"* [Intern. Scientific-techn. Conf. "Fundamental research in the field of creating innovative technologies and new materials aimed at the development of aviation and space complexes. Achievements of fundamental science and education – in innovative technologies"]. Komsomolsk-on-Amur, 2015, P. 135–136 (In Russ.).

3. Ivanov Yu. L., Makarov K. A., Maryin B. N. et al. *Matematicheskoe modelirovanie tekhnologicheskih processov izgotovleniya detalej letatel'nyh apparatov* [Mathematical modeling of technological processes for the manufacture of aircraft parts]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2000, 115 p.

4. Belyh S. V., Feoktistov S. I., Stankevich A. V., Pogartseva M. M., Mironenko V. V. [Analysis of the design and technology of manufacturing aircraft parts from sheet material using software]. *Aviacionnaya promyshlennost'*. 2015, No. 1, P. 55–59 (In Russ.).

5. Lysov M. I. *Teoriya i raschet protsessov izgotovleniya detaley metodami gibki* [Theory and calculation of the processes of manufacturing parts by bending methods]. Moscow, Mashinostroenie Pabl., 1966, 236 p.

6. Lysov M. I., Zakirov I. M. *Plasticheskoe formoobrazovanie tonkostennykh detaley aviatekhniki* [Plastic Formation of Thin-Walled Parts of Aviation Equipment]. Moscow, Mashinostroenie Pabl., 1983, 176 p.

7. Pogartseva M. M. [Determination of the shape of the billet taking into account the elastic recovery of the material after shaping and removal of the material during the subsequent milling]. *Tret'ya nauchno-prakticheskaya konferenciya "Molodezh'. Proekty. Idei"* [The third scientific-practical. Conf. "Molodyozh. Projects. Ideas"]. Irkutsk, 2013, P. 72–76 (In Russ.).

8. Pogartseva M. M. [Determination of the value of the spring of a sheet billet under bending with stretching and subsequent milling]. *XVI kraevoy konkurs molodyh uchenyh i aspirantov* [XVI regional competition of young scientists and graduate students]. Khabarovsk, 2014, P. 341–346 (In Russ.).

9. Feoktistov S. I., Belykh S. V., Pogartseva M. M. [Determination of the geometric parameters of the technological process for obtaining parts of aircraft from extruded profiles by bending with subsequent milling]. *Uchenye zapiski KnaASTU.* 2013, No. I-1 (13), P. 4–11 (In Russ.).

10. Tianjiao Liua, Yongjun Wanga, Jianjun Wu etc Springback analysis of Z & T-section 2196-T8511 and 2099-T83 Al-Lialloys extrusions in displacement controlled cold stretch bending. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015, No. 225, P. 295–309.

11. Bratukhin A. G. *Mezhdunarodnaya ehnciklopediya CALS. Aviacionno-kosmicheskoe mashinostroenie* [International Encyclopedia CALS. Aerospace Mechanical Engineering]. Moscow, JSC "SIC ASK", 2015, 608 p.

12. Pogartseva M. M., Belykh S. V. [A technique for optimizing the control programs of the FET type press machine]. *IV Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferenciya "Aviamashinostroenie i transport Sibiri"* [IV Vseros. Scientific-practical. Conf. "Aviamashinostroenie i transporta Sibiri"]. Irkutsk, 2014, P. 15–20 (In Russ.).

13. Pogartseva M. M. [Technique of optimization of the process of forming parts of complex geometry from sheet by the method of longitudinal tightening on equipment equipped with CNC]. *Konkurs nauchno-issledovatel'skih rabot aspirantov i molodyh uchenyh KnAGTU "Nauka molodyh – osnova budushchego Rossii"* [Competition of research works of graduate students and young scientists KnAGTU "The science of young people is the basis of the future of Russia"]. Komsomolsk-on-Amur, 2014, P. 28–33 (In Russ.).

14. Pogartseva M. M. [Technique of optimization of the process of forming details of complex geometry from sheet by the method of longitudinal tightening on equipment equipped with CNC]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya "Fundamental'nye issledovaniya v oblasti sozdaniya innovatsionnykh tekhnologiy i novykh materialov, napravlennykh na razvitie aviatsionnykh i kosmicheskikh kompleksov. Dostizheniya fundamental'noy nauki i obrazovaniya – v innovatsionnye tekhnologii"* [Intern. Scientific-techn. Conf. "Fundamental research in the field of creating innovative technologies and new materials aimed at the development of aviation and space complexes. Achievements of fundamental science and education – in innovative technologies"]. Komsomolsk-on-Amur, 2015, P. 132–134 (In Russ.).

15. Pogartseva M. M., Feoktistov S. I. [A technique for optimizing the process of forming details of complex geometry from sheet by the method of longitudinal tightening on equipment equipped with CNC] *III i IV nauchno-prakticheskaya konferenciya "Molodezh' XXI veka"* [III and IV Scientific-practical. Conf. "Youth of the XXI century"]. Vladivostok, 2015, P. 393–396 (In Russ.).

Библиографические ссылки

1. Феоктистов С. И. Автоматизация проектирования технологических процессов и оснастки заготовительно-штамповочного производства авиационной промышленности : монография. Владивосток : Дальнаука, 2001. 183 с.

2. Погарцева М. М., Феоктистов С.И. Разработка математической модели станка для продольной обтяжки FEL 2x500 // Фундаментальные исследования в области создания инновационных технологий и новых

материалов, направленных на развитие авиационных и космических комплексов. Достижения фундаментальной науки и образования – в инновационные технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. и Междунар. молодёжной школы-семинара (12–16 мая 2015, г. Комсомольск-на-Амуре). Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2015. С. 135–136.

3. Математическое моделирование технологических процессов изготовления деталей летательных аппаратов / Ю. Л. Иванов [и др.]. Владивосток : Дальнаука, 2000. 115 с.

4. Анализ конструкции и технологии изготовления деталей летательного аппарата из листового материала с использованием программного обеспечения / С. В. Белых [и др.] // Авиационная промышленность. 2015. № 1. С. 55–59.

5. Лысов М. И. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки. М. : Машиностроение, 1966. 236 с.

6. Лысов М. И., Закиров И. М. Пластическое формообразование тонкостенных деталей авиатехники. М. : Машиностроение, 1983. 176 с.

7. Погарцева М. М. Определение формы заготовки с учетом упругого восстановления материала после формообразования и удаления материала в процессе последующего фрезерования // Молодежь. Проекты. Идеи : сб. статей III науч.-практ. конф. (9–11 октября 2013, г. Иркутск). Иркутск : Иркут, 2014. С. 72–76.

8. Погарцева М. М. Определение величины пружинения листовой заготовки при изгибе с растяжением и последующем фрезеровании // Молодые ученые – Хабаровскому краю : материалы XVI краевого конкурса молодых ученых и аспирантов (17–24 января 2014, г. Хабаровск). Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2014. С. 341–346.

9. Феоктистов С. И., Белых С. В., Погарцева М. М. Определение геометрических параметров технологического процесса получения деталей летательных аппаратов из прессованных профилей методом изгиба с последующим фрезерованием // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. 2013. № I-1(13). С. 4–11.

10. Tianjiao Liua, Yongjun Wanga, Jianjun Wu Springback analysis of Z & T-section 2196-T8511 and 2099-T83 Al–Lialloys extrusions in displacement controlled cold stretch bending // Journal of Materials Processing Technology. 2015. № 225. P. 295–309.

11. Международная энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение / под ред. А. Г. Братухина. М. : ОАО «НИЦ АСК», 2015. 608 с.

12. Погарцева М. М., Белых С. В. Методика оптимизации управляющих программ обтяжного пресса типа FET // Авиамашиностроение и транспорт Сибири : сб. статей IV Всерос. науч.-практ. конф. (10–11 апреля 2014 г. Иркутск). Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2014. С. 15–20.

13. Погарцева М. М. Методика оптимизации процесса формообразования деталей сложной геометрии из листа методом продольной обтяжки на оборудовании, оснащенном ЧПУ // Наука молодых – основа будущего России : материалы докладов конкурса научно-исследовательских работ аспирантов и молодых ученых Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2014. С. 28–33.

14. Погарцева М. М. Методика оптимизации процесса формообразования деталей сложной геометрии из листа методом продольной обтяжки на прессе FEL // Фундаментальные исследования в области создания инновационных технологий и новых материалов, направленных на развитие авиационных и космических комплексов. Достижения фундаментальной науки и образования – в инновационные технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. и Междунар. молодёжной школы-семинара (12–16 мая 2015. г. Комсомольск-на-Амуре). Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2015. С. 132–134.

15. Погарцева М. М., Феоктистов С. И. Методика оптимизации процесса формообразования деталей сложной геометрии из листа методом продольной обтяжки на оборудовании, оснащенном ЧПУ // Молодежь XXI века : III и IV науч.-практ. конф. : сб. тр. Владивосток : Изд-во Дальневост. ун-та, 2015. С. 393–396.

© Pogartseva M. M., 2017

UDC 519.6:532.517+621.7+669.17

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 415–422

NUMERICAL SIMULATION OF MODIFYING MATERIAL DISTRIBUTION DURING THE IMPULSE INDUCTION HEATING OF METAL SURFACE

V. N. Popov

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS
4/1, Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation
E-mail: popov@itam.nsc.ru

Method of improvement of operational properties of surfaces is considered. Under study is the applicability of high-frequency electromagnetic field for metal heating and melting with a view to its subsequent modification. 2D numerical modeling of the processes during the modification of the substrate surface metal layer is carried out. The substrate surface is covered with a layer of specially prepared nano-size particles of refractory compounds, which are active crystallization centers after the penetration into the melt. The distribution of the electromagnetic energy in the metal is described by empirical formulas. The proposed mathematical model is used to consider the processes including heating, phase transition and heat transfer in the molten metal, the nucleation and growth of the solid phase in the presence of a modifier material in the melt. Melting of the metal is considered at the Stephan's approximation, and during solidification all nano-size particles are assumed to be centers of volume-consecutive crystallization. The flow in the liquid is described by the Navier-Stokes equations in the Boussinesq approximation. The movement of the markers models the distribution of nano-size particles in the melt. According to the results of numerical experiments, the flow structure in the melt was evaluated versus the characteristics of induction heating and the amount of surface-active impurities in the metal. The modes of the induction-pulse action are detected: they promote creating the flows for the homogeneous distribution of modifying particles in the melt. Found that the application of high frequency electromagnetic field for heating and melting of metals allows to modify the metal deeper in comparison with the use of a laser.

Keywords: numerical simulation, metal modification, impulse induction heating, heat transfer, nano-size refractory particles.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 415–422

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ЧАСТИЦ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ МЕТАЛЛА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ

В. Н. Попов

Институт теоретической и прикладной механики имени С. А. Христиановича СО РАН
Российская Федерация, 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1
E-mail: popov@itam.nsc.ru

Рассматривается способ улучшения эксплуатационных свойств поверхности деталей. Исследуется возможность применения высокочастотного электромагнитного поля для разогрева и плавления металла с целью его последующего модифицирования. Проведено численное моделирование процессов при модифицировании поверхностного слоя металла в подложке. Поверхность подложки покрыта слоем специально подготовленных наноразмерных частиц тугоплавкого соединения, которые после проникновения в расплав служат активными центрами кристаллизации. Распределение электромагнитной энергии в металле описывается эмпирическими формулами. С помощью предлагаемой математической модели, описывающей термо- и гидродинамические явления, рассматриваются процессы, включающие разогрев металла, его плавление, конвективный теплоперенос в расплаве и затвердевание после окончания импульса. Плавление металла рассматривается в приближении Стефана, а при затвердевании предполагается, что все наночастицы являются центрами объемно-последовательной кристаллизации. Течение в жидкости описывается уравнениями Навье–Стокса в приближении Буссинеска. Перемещение маркеров моделирует распределение наночастиц в расплаве. По результатам численных экспериментов оценивалась структура течения в расплаве в зависимости от характеристик индукционного нагрева и количества поверхностно-активной примеси в металле. Определены режимы импульсного индукционного воздействия, способствующие формированию течений для гомогенного распределения частиц модифицирующего вещества. Установлено, что применение импульсов высокочастотного электромагнитного поля для разогрева и плавления металла позволяет модифицировать металл глубже по сравнению с использованием лазера.

Ключевые слова: численное моделирование, модифицирование металла, импульсный индукционный нагрев, теплоперенос, наноразмерные тугоплавкие частицы.

Introduction. The use of constructions and their components operated in extreme conditions excluding repair or replacement makes urgent the increase in their properties such as thermo – and wear-resistance, plasticity, durability etc. A perspective way of improvement of details operational properties is modifying of the melt at laser processing of their surfaces by the prepared nano-size particles of refractory compounds (carbides, nitrides, carbonitrides and etc.) that allows to increase the number of the centers of crystallization and to crush structural components of the solid metal, increasing its uniformity [1; 2]. At the same time along with the wide use of the laser during modifying and alloying of metal surface, the use of energy of the high-frequency induction field [3; 4] is also possible. However nowadays possibilities of such technology are insufficiently studied especially regarding the use of nano-size modifiers for material structure improvement [4].

As part of the study of the processes going on in a metal surface affected by a laser impulse it is defined that one of the main factors influencing the efficiency of modifying is thermocapillary convection which under certain conditions can promote homogeneous distribution of the insertion materials which penetrate during submelting into melt [5; 6]. In [7; 8] the influence of surface-active substance dissolved in the melt on the nature of convection is considered and defined that the structure of flows in molten metal depends on composition and amount of the present impurities in it. In this regard possible changes in technology of modifying of a surface make necessary a detailed research of the happening processes taking into account perhaps more influencing factors.

In this work with the use of numerical modifying the impact of an impulse of high-frequency electromagnetic field on the distribution of the modifying material penetrating into a substrate from its surface in the presence of surface-active substance in metal is considered. As an object of research iron alloy (Fe) + 0.42 % on carbon weight (C) + 0.001–0.02 % sulfur (S) is used. This system is chosen in view of the existence in literature [9; 10] the thermophysical parameters and physical constants necessary for calculations and analysis of the happening processes. By means of the offered mathematical model describing thermo – and hydrodynamic phenomena, the non-stationary processes including metal heating, its melting, convective heat transfer in the melt and further after the termination of an impulse its solidification are considered. According to the results of numerical experiments the modes of impulse impact on a substrate connected with an amount of surface-active substance in metal and promoting homogeneous distribution of the modifying nano-size particles in the melt are defined.

Mathematical model and algorithm of realization. The impact of an impulse of the high-frequency electromagnetic field on a metal substrate is considered. The scheme of the process is illustrated in fig. 1. Duration of impulse t_H . The cylindrical head of the electromagnetic field inductor is located over the flat surface of an iron alloy sheet. Induction influence is carried out through r_0 radius spot. The distribution of electromagnetic energy in metal is described by the empirical formulas used in engineering thermal calculations of induction heaters [11]. The surface of a substrate is covered with a layer of specially prepared modifying nano-size particles of refractory compounds which serve as active centers of crystallization after penetration into the melt [2]. Affected by energy metal is heated and melted. Phase transition happens at a substrate material melting temperature T_m. In the fluid cavity formed and increasing over time the convection under the influence of capillary and thermogravitational forces develops. The moistened particles under the influence of convective flows penetrate into the melt depth. On the border of a phase transition sticking conditions are satisfied. After completion of an impulse due to heat exchange to the environment and heat removal in not warmed material of a substrate the cooling of the melt and its volume-consecutive crystallization occurs in the assumption that all penetrated modifying particles are its centers.

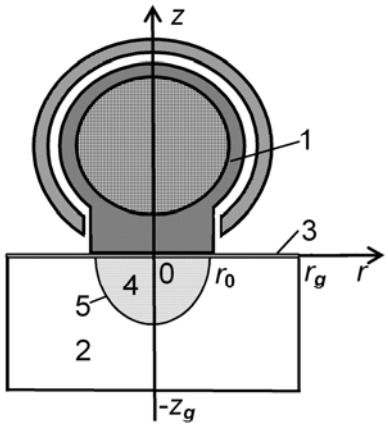


Fig. 1. Scheme of an inductive impulse influence: 1 – an inductor with the covering ferrite magneto-screen; 2 – a metal substrate and particles of the modifying material (3) on a surface; 4 – the melt; 5 – border of the melted zone; z_g and r_g – depth and radius of the considered area in a substrate

Рис. 1. Схема воздействия индукционного импульса: 1 – индуктор с охватывающим ферритовым магнитоэкраном; 2 – металлическая подложка и частицы модифицирующего материала (3) на поверхности; 4 – расплав; 5 – граница проплавленной зоны; z_g и r_g – глубина и радиус рассматриваемой области в подложке

For simplification of the task it is considered that thermal characteristics of fluid, solid and two-phase mediums are identical and do not depend on temperature. The mass particles m_p content penetrating into the melt is not enough ($m_p \leq 0.05$ %), their diameter d_p is much less than reference size of the fluid cavity and influence of inclusions on physical parameters of the melt can be neglected. The quantity of the dissolved components in the melt is not considerable so it is possible not to consider their influence on phase transition temperature supposing $T_m = \text{const}$. Melting of metal is considered at the Stefan's approximation with the use of efficient thermal capacity [12]. It is supposed that at the considered

heating modes small rates of convective speeds cause flatness of the free surface of liquid [13]. Borders r_g, z_g of the considered area are chosen so that their position does not affect the studied processes.

Distribution of a temperature profile in solid and fluid material of a substrate is described by the equations of convective heat transfer in a cylindrical coordinate frame (r, z) which have the following form for the dimensionless variables:

$$c_{ef}[\theta_t + (\nabla \cdot \mathbf{u})\theta] = \frac{1}{\Pr}\Delta\theta + \frac{Ki}{\Pr}\chi(r,z), \quad 0 \le r \le r_g,\ -z_g \le z \le 0,\ 0 \le t \le t_H, \tag{1}$$

at influence of an inductor;

$$\theta_t + (\nabla \cdot \mathbf{u})\theta = \frac{1}{\Pr}\Delta\theta + St(f_s)_t, \quad 0 \le r \le r_g,\ -z_g \le z \le 0,\ t > t_H, \tag{2}$$

after completion of warming up. Here θ – temperature; t – time; $\Pr = \nu / a$ – Prandtl's number, ν – kinematic viscosity of the melt, a – thermal diffusivity; $\mathbf{u}$ – a speed vector in molten metal with components u, w in radial (r) and vertical (z) directions respectively (in solid metal $u \equiv 0$, $w \equiv 0$); $St = \kappa / \left(c_p T_m\right)$ – the Stefan's number, κ – specific heat of melting; c_p – specific thermal capacity; f_s – a part of a solid phase in material $\left(0 \le f_s \le 1\right)$; $Ki = (p_0 r_0)/(\lambda T_m)$ – Kirpichyov's number, λ – a thermal conductivity, p_0 – the specific capacity absorbed by unit of a surface of the heated body. The efficient thermal capacity considering the latent heat of a phase transition of κ is described by a ratio $c_{ef} = 1 + \delta(\theta)St$ where $\delta(\theta) = 1$ at $\theta \in [1 - \Delta\theta/2, 1 + \Delta\theta/2]$ and $\delta(\theta) = 0$ if $\theta \notin [1 - \Delta\theta/2, 1 + \Delta\theta/2]$, $\Delta\theta$ – a temperature band where the phase boundary "is smeared". The dimensionless parameters are defined with the help of the reference size r_0, speed $v_0 = \nu / r_0$, time $t_0 = r_0 / v_0$ and temperature T_m: $r = r / r_0$, $z = z / r_0$, $u = u / v_0$, $w = w / v_0$, $t = t / t_0$, $\theta = T / T_m$.

At impact of a high-frequency electromagnetic field on a substrate an apparent density of internal sources of heat w_0 according to [11] is described by a ratio

$$w_0(r,z) = \frac{p_0}{r_0}\chi(r,z).$$

Here $\chi(r,z)$ – the dimensionless function depending only on coordinates, r_0 – the reference size, in our case the radius of a spot of inductive impact on a substrate surface, p_0 – the specific power absorbed by a unit of a heating body surface.

Assuming that the central point of "the spot" of inductive influence of radius r_0 is located in a point $(0,0)$. In this case the distribution of energy release over the sheet thickness can be described with the dependence:

$$\chi(r,z) = e^{z/\Delta_1}, \quad r \le r_0, \quad z \le 0,$$

where Δ_1 – current penetration depth in material (m), i. e. skin layer thickness, $\Delta_1 = 503\sqrt{\rho_{e1} / (\mu_1 f)}$, ρ_{e1} – specific electrical resistance, μ_1 – the relative magnetic conductivity when warming up of metal is lower than the temperature of magnetic transformations (Curie point), f – working frequency of the generator of the field, Hz. At the achievement of magnetic transformations temperature the relative magnetic conductivity decreases to value $\mu_2 = 1$ and specific electrical resistance increases up to size ρ_{e2}, consequently the current depth of penetration in material becomes $\Delta_2 = 503\sqrt{\rho_{e2} / (\mu_2 f)}$ and energy distribution over the depth of a substrate is described by expressions

$$\chi(r,z) = \begin{cases} e^{z/\Delta_2}, & -z_K(r) \le z \le 0, \\ e^{-z_K/\Delta_2} e^{(z+z_K)/\Delta_1}, & z < -z_K(r), \end{cases} \qquad r \le r_0,$$

where $z_K(r)$ – distance from a substrate surface to a point with a temperature of magnetic transformations ($T = T_K$).

At transition to the dimensionless variables we get

$$\chi(r,z) = e^{z/\Delta_1}, \quad \theta(r,0) \le \theta_K, \quad r \le 1, \quad z \le 0;$$

$$\chi(r,z) = \begin{cases} e^{z/\Delta_2}, & -z_K(r) \le z \le 0, \\ e^{-z_K/\Delta_2} e^{(z+z_K)/\Delta_1}, & z < -z_K(r), \end{cases}$$

$$\theta(r,0) > \theta_K, \quad r \le 1;$$

where $\Delta_1 = \Delta_1 / r_0$, $\Delta_2 = \Delta_2 / r_0$, $z_K = z_K / r_0$, $\theta_K = T_K / T_m$.

Boundary conditions for the equations (1), (2) are the following. On an axis of symmetry

$$\frac{\partial\theta}{\partial r} = 0, \quad r = 0, \ -z_g \le z \le 0. \tag{3}$$

On the external side border of calculated area

$$\frac{\partial\theta}{\partial r} = 0, \quad r = r_g, \ -z_g \le z \le 0. \tag{4}$$

On the upper bound ($z = 0$). When heating from a source $t \le t_H$

$$\frac{\partial\theta}{\partial z} = \alpha(\theta_c - \theta), \quad 1 < r \le r_g. \tag{5}$$

After completion of an impulse ($t > t_H$)

$$\frac{\partial\theta}{\partial z} = \alpha\left(\theta_c - \theta\right), \quad 0 \le r \le r_g. \tag{5a}$$

On the lower bound of calculated area

$$\frac{\partial\theta}{\partial z} = 0, \quad 0 \le r \le r_g, \ z = -z_g. \tag{6}$$

Here $\alpha = \alpha_0 r_0 / \lambda$, $\alpha_0 = \varepsilon\sigma_0\left(T^2 + T_c^2\right)\left(T + T_c\right)$, σ_0 – a Stefan–Boltzmann constant, ε – degree of blackness

of material of a substrate, T_c – environment temperature $\left(\theta_c = T_c / T_m\right)$.

When melting material speed $v_{\mathbf{n}}$ for each point of the border "melt – solid phase" $\zeta(r,z,t)$ is defined by a condition

$$\Pr St\, v_n = \partial\theta/\partial\mathbf{n}\big|_{\theta=1-} - \partial\theta/\partial\mathbf{n}\big|_{\theta=1+},$$

where $\mathbf{n}$ – a unit vector of a normal.

During solidification it is supposed that all nano-size particles are crystallization centers, then the portion of a solid phase f_s in the two-phase melt zone is defined according to [14] of a ratio $f_s = 1 - \exp\left\{-\Omega N_p\right\}$ where

$$\Omega(r,z,t-\xi) = \frac{4\pi}{3}\left[r_p + K_\nu \int_\xi^t (T_m - T)d\zeta\right]^3$$

the volume of the growing nucleus which arose in an instant $t = \xi$, N_p – number of nanoparticles in the unit of melt volume, $r_p = d_p / 2$, K_ν – an empirical constant. $f_s = 0.95$ corresponds to the end of solidification.

When melting metal in the area $\theta > 1$ with the border "melt – solid phase" $\zeta(r,z,t)$ the flow in liquid is described by the Navier–Stokes equations in the Boussinesq approximation

$$\mathbf{u}_t + (\nabla\cdot\mathbf{u})\mathbf{u} = -\nabla p + \nabla^2\mathbf{u} + \mathbf{k}Gr(\theta - 1), \qquad \nabla\cdot\mathbf{u} = 0. \tag{7}$$

Here p – pressure $\left(p = p / P_0,\ P_0 = \rho\nu_0^2\right.$, ρ – substrate material density), $Gr = \beta_\rho g r_0^3 T_m / \nu^2$ – Grasgof's number, g – a free fall acceleration, β_ρ – coefficient of a cubic thermal expansion of a melt, $\mathbf{k}$ – unit vector along a coordinate axis of z.

Boundary conditions for the equations (7) are the following. On the surface "melt – solid phase" $\zeta(r,z,t)$

$$u = 0, \quad w = 0. \tag{8}$$

On an axis of symmetry $r = 0$, $-z_f(t) \le z \le 0$ ($-z_f(t)$ – coordinate of the border of phase transition)

$$u = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial r} = 0, \tag{9}$$

On the surface of liquid $z = 0$, $0 \le r < r_f(t)$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{Mn}{\Pr}\frac{\partial\theta}{\partial r}\eta, \quad w = 0, \tag{10}$$

where $r_f(t)$ – radius of the cavity of molten metal on the free surface. In the presence of surface-active substance in the melt, for the description of the interfacial tension the empirical formula [9] is used

$$\sigma = \sigma_0 - k_\sigma\left(T - T_m\right) - TR\Gamma_s \ln\left(1 + KC_s\right),$$

$$K = S_l \exp\left[-\Delta H^0 / (RT)\right],$$

where σ_0 – the interfacial tension in clear metal at melting point; $k_\sigma = -\partial\sigma / \partial T$ – for clear metal; R – universal gas constant; C_s – concentration of surface-active substance impurity on a melt surface; S_l – the constant corresponding to an entropy of segregation; ΔH^0 – standard absorption heat; Γ_s – excess of impurity in the surface layer per unit area, then

$$\frac{\partial\sigma}{\partial T} = -k_\sigma - R\Gamma_s \ln(1 + KC_s) - \frac{KC_s}{1 + KC_s}\frac{\Gamma_s \Delta H^0}{T}, \tag{11}$$

from where are defined $Mn = -k_\sigma T_m r_0 / (\rho\nu a)$ – Marangoni's number and η

$$\eta = 1 + R\Gamma_s \ln(1 + KC_s) / k_\sigma + \frac{KC_s}{1 + KC_s}\frac{\Gamma_s \Delta H^0}{Tk_\sigma}.$$

Initial conditions for the heat transfer equation (1)

$$\theta = \theta_0, \tag{12}$$

for (7) in just melted metal

$$u = 0, \ w = 0. \tag{13}$$

It is supposed that well moistened modifying nano-size particles under the influence of convective flows penetrate into the depth of the melted cavity. Movement and distribution of nanoparticles in the melt was estimated by means of M markers which initial position is described by coordinates $\left(r_m^0, z_m^0\right)$, $0 \le r_m^0 \le 1$, $z_m^0 = -r_p$, $m = 1, \ldots, M$.

Markers move according to locally average speeds in the closest vicinity of everyone.

At realization of model (1)–(13) which includes the equations of Navier–Stokes and convective heat transfer the finite-difference algorithm was applied. Discretization of dimentional calculated domain was carried out on $I \times K$ cells. Step τ along a temporary variable is constant. Distribution of temperature was described by values in grid clusters. Systems of difference equation were under construction by means of implicit approximation of the balance ratios received by an integration of the equations (1), (2), (7) taking into account the corresponding boundary conditions. At approximation (7) in the field of the melted material, by analogy with MAC and SIMPLE methods [15; 16], components of velocity u, w, were defined in the middle of lateral faces of cells, and pressure p – in the centers of cells.

The algorithm of each temporary step has the following operations procedure. Initially the temperature profile in a substrate at influence of energy of a high-frequency electromagnetic field was calculated. After occurrence of the fluid cavity on each temporary step the border of phase transition was established. Substitution of the found values of temperature in momentum equations made possible the determination of the field of velocities components. Further, with the use of a method of simulated compressibility [17] pressure was culculated. Several iterations were performed to coordinate found pressure

distribution and speeds before realization of inequality $\max|\nabla \cdot \mathbf{u}| \le \gamma$ where γ – the given small number. The solution of the algebraic systems received at approximation of motion equations and a heatmass transfer was carried out by iterative methods.

By means of ratios $r_m^n = r_m^{n-1} + u_m^n \tau$, $z_m^n = z_m^{n-1} + v_m^n \tau$, $m = 1, ..., M$, new coordinates of markers r_m^n, z_m^n on a n-temporary step were calculated. Here u_m^n, v_m^n – speeds of particles movement, defined according to locally average speeds in the nearest neighborhood of each of them.

Calculations were carried out on spatial grids $I \times K$ from 120×150 to 240×300. Value of a temporary step $\tau = 10^{-4}$, $\gamma = 10^{-4}$, $\Delta\theta = 0.001$, $M = 25$.

After completion of an impulse the solution of a task proceeded until disappearance of overheat in molten metal of a substrate. Convective redistribution of markers occurred only in the melt, and in the solid area the last calculated coordinates were fixed.

Results of numerical experiments. Numerical researches were conducted at the following parameters: $r_0 = 0.001$ м, $z_g = 0.0012$ м, $r_g = 0.0015$ м; $t_H = 70$ мс; $T_c = 300$ K; $T_0 = 300$ K; $p_0 = (6.5–7.0)\cdot 10^8$ Вт/м^2; $f = 1200$ кГц; $K_v = 2.5\cdot 10^{-5}$ м/(с·K); $d_p = 5\cdot 10^{-8}$ м; $N_p = 2.0\cdot 10^{15}$ 1/м^3. Properties of metal [9–11]: $\rho = 7065$ кг/м^3, $c_p = 787$ Дж/(кг·K), $\lambda = 27$ Вт/(м·K), $\kappa = 2.77\cdot 10^5$ Дж/кг, $\nu = 8.5\cdot 10^{-7}$ м^2/с, $k_\sigma = 4.3\cdot 10^{-4}$ Н/(м·K), $\beta_\rho = 1.18\cdot 10^{-4}$ 1/K, $R = 8314.3$ Дж/(моль·K), $S_l = 3.18 \times \times 10^{-3}$, $\Gamma_s = 1.3\cdot 10^{-8}$ моль/м^2, $\Delta H^0 = -1.88\cdot 10^8$ Дж/моль, $T_m = 1775$ K, $\varepsilon = 0.7$, $\sigma_0 = 5.7\cdot 10^{-8}$ Вт/(м^2·K^4), $T_K = 1141$ K, $\mu_1 = 14$, $\rho_{e1} = 5.2\cdot 10^{-7}$ Ом·м, $\mu_2 = 1$, $\rho_{e2} = 1.0\cdot 10^{-6}$ Ом·м. The considered sulphur load in iron is $C_s = 0.001–0.04$ % of weight.

In fig. 2, 4 regarding calculated area adjacent to a zone of molten metal in the dimensionless coordinates, the structure of flows, trajectories of movement and distribution of the modifying particles at surface-active substance in the melt 0.002 % of weight for various characteristics of an impulse are displayed. Arrows in drawings specify the direction, and their length characterizes intensity of a flow.

Fig. 2 shows the results received at $p_0 = 6.5\cdot 10^8$ W/sq.m, $t_H = 70$ ms. Fig. 2, *a* illustrates the field of speeds in the melt at the time of completion of inductive influence. From the submitted data it appears that by the time of the impulse termination a big whirlwind with the direction of a flow near the free surface of liquid from border of a phase transition to the center of the cavity with the strong downflow in this area is formed. The similar structure of a flow exists from the moment of emergence of the melt to the completion of an impulse on condition of a small overheat of its surface regarding phase transition temperature. It leads to the fact that the modifying particles penetrate into the central part of the cavity in the considerable depth, and then are evenly distributed by the dispersing flow on all melt volume (fig. 2, *b*). A small local whirlwind in the central part of the cavity at the free surface does not have any influence on markers movement. The depth of melt penetration is about 450 microns that is 2-3 times more than at laser processing by a beam with the close values of radius and power [7]. It should be noted that slight overheat of a surface of molten metal promotes preservation of its flatness and allows to avoid the subsequent after-treatment. After completion of an impulse the melt cools down and solidifies that is promoted by heat removal from its surface and in not warmed material. Movement of nano-size particles happens as long as the molten metal exists.

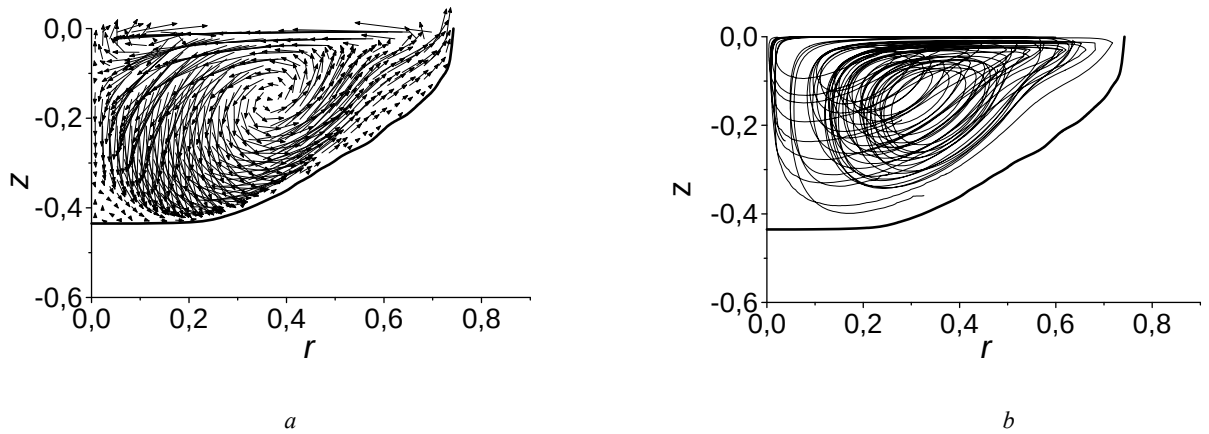


Fig. 2. The field of speeds (*a*), trajectories and distribution of markers (*b*) in the melt at $q_0 = 6.5\cdot 10^8$ W/sq.m , $t_H = 70$ мs

Рис. 2. Поле скоростей (*а*), траектории и распределение маркеров (*б*) в расплаве при $q_0 = 6.5\cdot 10^8$ Вт/м^2, $t_H = 70$ мс

Fig. 3 illustrates distribution of the dimensionless temperature and the χ function over substrate thickness from its surface in a point of the maximal warming up ($r = 0$). It follows from the presented results that the depth of penetration of current does not exceed the thickness of the considered sheet, and the main energy release occurs in the metal layer heated higher than the temperature of magnetic transformations of $z = -0.65$. As a result, the temperature accepts maximal values on the processed surface and monotonically decreases in the process of removal from it, and the substrate warming up through all thickness does not occur.

Fig. 4 shows the results received at $p_0 = 7.0 \cdot 10^8$ W/sq.m, $t_H = 70$ ms, that is at higher specific power absorbed by a surface unit of the heated body. It follows from the submitted data that by the time of the termination of a laser impulse in the melt two toroidal-shaped whirlwinds determined by the parameter $\partial\sigma / \partial T$ which accepts both positive, and negative values are formed. That is a surface temperature increase changes the structure of molten metal. Near the free surface a flow from the border of a phase transition to the center of the cavity occurs (fig. 4, *a*) promoting that the modifying particles do not penetrate into the depth of the melt on its periphery (fig. 4, *b*). Also near the surface a flow dispersing from the center which appears at collision with the counter flow, an intensive downflow is formed. As a result chaotic movement of the particles which got into molten metal in the field of intensive whirlwinds appears. In the central part of the cavity the modifying additives penetrate into the considerable depth only at the beginning of melting, and further when the considerable overheat of the melt is formed, upward movement of liquid obstructs it. In general it turns out that particles are not distributed in all volume of molten metal, are absent in the central part and on peripheries of the melt and the considered processing mode of the surface layer is impossible to be called efficient.

On completion of an impulse temperature gradients in liquid decrease, intensity of a convection decreases, metal cools down and solidifies (13–15 ms) that is promoted by the low initial temperature of material. After overheat decrease in the melt there takes place a volume-consecutive crystallization in the direction to a substrate surface. By results of numerical calculations it is defined that homogeneous nucleation of crystals in the presence of highly activated nano-size particles in the melt does not happen and does not affect crystallization kinetics as at the existing cooling rates conditions necessary for this are not reached.

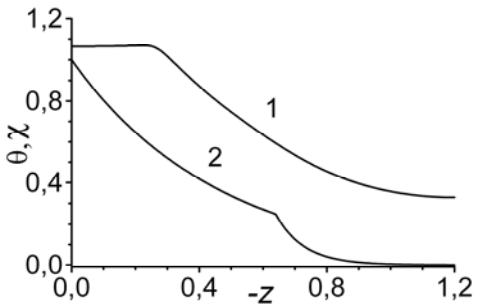


Fig. 3. Change of temperature θ (1) and χ (2) function in a substrate at $r = 0$ for $q_0 = 6.5 \cdot 10^8$ W/sq.m, $t_H = 70$ ms

Рис. 3. Изменение температуры θ (1) и функции χ (2) в подложке при $r = 0$ для $q_0 = 6.5 \cdot 10^8$ Вт/м^2, $t_H = 70$ мс

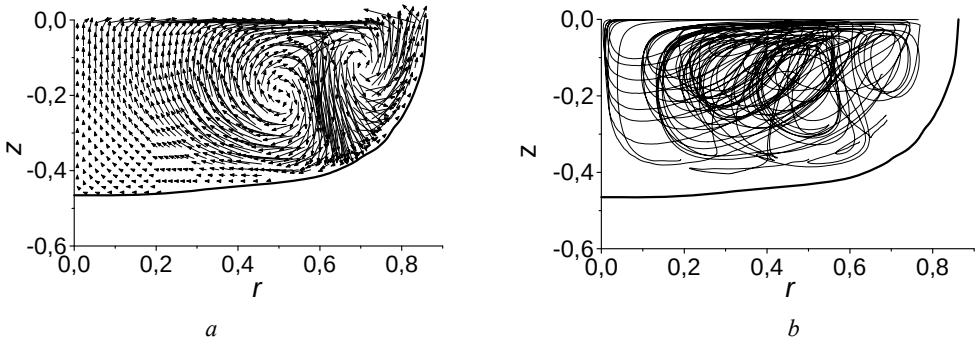


Fig. 4. The field of speeds (*a*), trajectories and distribution of markers (*b*) in the melt at $q_0 = 7.0 \cdot 10^8$ W/sq.m, $t_H = 70$ ms

Рис. 4. Поле скоростей (*а*), траектории и распределение маркеров (*б*) в расплаве при $q_0 = 7.0 \cdot 10^8$ Вт/м^2, $t_H = 70$ мс

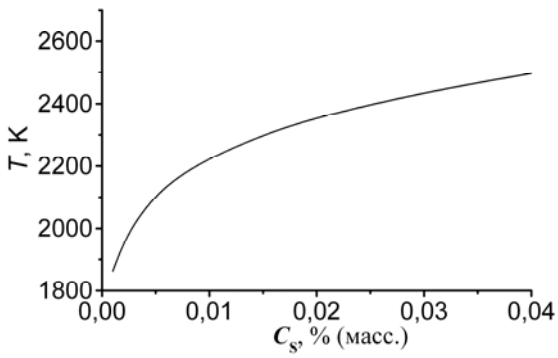


Fig. 5. The maximal values of melting temperatures at various concentration surface-active substance in metal for receiving homogeneous distribution of the modifying particles

Рис. 5. Максимальные значения температур расплава при различных концентрациях ПАВ в металле для получения гомогенного распределения модифицирующих частиц

By results of the analysis of a formula (11) and numerical experiments for various concentration surface-active substance in metal (0.001 % < $C_S \leq$ 0.04 %) maximum temperatures of warming up of the free surface of the melt are determined (fig. 5) at which the steady flow near it is formed with the direction from border of phase transition to the center of the cavity similar to the presented in fig. 2, *a*.

Conclusion. By results of numerical modeling the possibility of the use of inductive processing for modification of molten metal by the nano-size particles of refractory compounds allowing to improve its structural components when solidifying is determined. The results of calculations show that the existence of surface-active substance in the melt significantly influences physical processes during modifying and in particular the flow in the melt. To improve the processing quality of the metal layer surface it is necessary to take into consideration its structure and accounting it to choose the modes of an impulse of a high-frequency inductive field. The use of optimum modes can promote the homogeneous distribution of the modifying particles in full volume.

References

1. Montealegre M. A., Castro G., Rey P., Arias J. L., Vázquez P., González M. Surface treatments by laser technology. *Contemporary Materials*. 2010, Vol. 1, P. 19–30. DOI: 10.5767/anurs.cmat.100101.en.019M.

2. Saburov V. P., Cherepanov A. N., Zhukov M. F. et al. *Plazmokhemicheskiy sintez ultradispersnykh poroshkov i ikh primenenie dlya modifitzirovaniya metallov i splavov* [Plasma chemical synthesis of ultra-dispersed powders and its application for metal and alloys modification]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1996, 312 p. (In Russ.).

3. Marusin V. V. [High-frequency pulse quenching details]. *Obrabotka metallov*. 2004, No. 2, P. 14–15 (In Russ.).

4. Solonenko O. P., Cherepanov A. N., Marusin V. V., Poluboyarov V. A. [Combined technologies of obtaining promising powder materials, coating and hardening of the surface layers with controlled nano - and microstructure]. *Tyazheloe mashinostroenie*. 2007, No. 10, P. 10–13 (In Russ.).

5. He X., Fuerschbach P. W., DebRoy T. Heat transfer and fluid flow during laser spot welding of 304 stainless steel. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2003, Vol. 36, P. 1388–1398. DOI: 10.1088/0022-3727/36/12/306.

6. Ribic B., Tsukamoto S., Rai R., DebRoy T. Role of surface active elements during keyhole mode laser welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2011, Vol. 44(48), article № 485203. DOI:10.1088/0022-3727/44/48/485203.

7. Cherepanov A. N., Popov V. N. Numerical analysis of the influence of surface-active substance in the melt on the distribution of modifying particles and crystallization at the treatment of metal surface by a laser pulse. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2014, Vol. 21, No. 3, P. 355–363. DOI: 10.1134/S0869864314030093.

8. Donghua Dai, Dongdong Gu. Influence of thermodynamics within molten pool on migration and distribution state of reinforcement during selective laser melting of AlN/AlSi10Mg composites. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2016, Vol. 100, P. 14–24. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2015.10.004.

9. Sahoo P., DebRoy T., McNallan M.J. Surface tension of binary metal-surface active solute systems under conditions relevant to welding metallurgy. *Metall. Trans. B*. 1988, Vol. 19B, P. 483–491. DOI: 10.1007/BF02657748.

10. Ehlen G., Ludwig A., Sahm P. R. Simulation of Time-Dependent Pool Shape during Laser Spot Welding: Transient Effects. *Metall. Mater. Trans. A*. 2003, Vol. 34A, P. 2947–2961. DOI: 10.1007/s11661-003-0194-x.

11. Pavlov N. A. *Inzhenernye teplovye raschety indukzionnykh nagrevateley* [Engineering thermal calculations of induction heaters]. Moscow, Energiya Publ., 1978, 120 p.

12. Budak B. M., Solov'eva E. N., Uspenskii A. B. A difference method with coefficient smoothing for the solution of Stefan problems. *USSR Comput. Math. Math. Phys*. 1965, Vol. 5, No. 5, P. 59–76.

13. Höche D., Müller S., Rapin G. et al. Marangoni Convection during Free Electron Laser Nitriding of Titanium. *Metall. Mater. Trans. B*. 2009, Vol. 40, No. 4, P. 497–507. DOI: 10.1007/s11663-009-9243-1.

14. Baladin G. F. *Osnovy teoryi formirovaniya slitka* [Fundamentals of the theory of ingot formation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979, 335 p.

15. Harlow F. H., Welch J. E. Numerical calculation of time-depend viscous incompressible flow of fluid with free surface. *Phys. Fluids*. 1965, Vol. 8, P. 2182–2189.

16. Patankar S. V., Spalding D. B. A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows. *Int. J. Heat Mass Trans*. 1972, Vol. 15, P. 1787–1806.

17. Chorin A. J. A numerical method for solving incompressible viscous flow problems. *J. Comput. Phys.* 1967, Vol. 2, P. 12–26.

Библиографические ссылки

1. Surface treatments by laser technology / M. A. Montealegre [et al.] // Contemporary Materials. 2010. Vol. 1. P. 19–30.

2. Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их применение для модифицирования металлов и сплавов / В. П. Сабуров [и др.]. Новосибирск : Наука, 1996. 312 с.

3. Марусин В. В. Высокочастотная импульсная закалка (ВИЗ) деталей // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2004. № 2. С. 14–15.

4. Комбинированные технологии получения перспективных порошковых материалов, нанесения покрытий и упрочнения поверхностных слоев с регулируемой нано- и микроструктурой / О. П. Солоненко [и др.] // Тяжелое машиностроение. 2007. № 10. С. 10–13.

5. He X., Fuerschbach P. W., DebRoy T. Heat transfer and fluid flow during laser spot welding of 304 stainless steel // J. Phys. D: Appl. Phys. 2003. Vol. 36. P. 1388–1398.

6. Role of surface active elements during keyhole mode laser welding / B. Ribic [et al.] // Journal of Physics D: Applied Physics. 2011. Vol. 44(48), article № 485203.

7. Черепанов А. Н., Попов В. Н. Численный анализ влияния поверхностно-активного вещества в расплаве на распределение модифицирующих частиц и кристаллизацию при обработке поверхности металла лазерным импульсом // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 3. С. 273–281.

8. Donghua Dai, Dongdong Gu. Influence of thermodynamics within molten pool on migration and distribution state of reinforcement during selective laser melting of AlN/AlSi10Mg composites // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2016. V. 100. P. 14–24.

9. Sahoo P., DebRoy T., McNallan M. J. Surface tension of binary metal-surface active solute systems under conditions relevant to welding metallurgy // Metall. Trans. B. 1988. Vol. 19B. P. 483–491.

10. Ehlen G., Ludwig A., Sahm P. R. Simulation of Time-Dependent Pool Shape during Laser Spot Welding: Transient Effects // Metall. Mater. Trans. A. 2003. Vol. 34A. P. 2947–2961.

11. Павлов Н. А. Инженерные тепловые расчёты индукционных нагревателей. М. : Энергия, 1978. 120 с.

12. Будак Б. М., Соловьева Е. Н., Успенский А. Б. Разностный метод со сглаживанием коэффициентов для решения задач Стефана // Журн. вычисл. матем. и матем. физ. 1965. Т. 5, № 5. С. 828–840.

13. Marangoni Convection during Free Electron Laser Nitriding of Titanium / D. Höche [et al.] // Metall. Mater. Trans. B. 2009. Vol. 40, No. 4. P. 497–507.

14. Баландин Г. Ф. Основы теории формирования слитка. М. : Машиностроение, 1979. 335 с.

15. Harlow F. H., Welch J. E. Numerical calculation of time-depend viscous incompressible flow of fluid with free surface // Phys. Fluids. 1965. Vol. 8. P. 2182–2189.

16. Patankar S. V., Spalding D. B. A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows // Int. J. Heat Mass Trans. 1972. Vol. 15. P. 1787–1806.

17. Chorin A. J. A numerical method for solving incompressible viscous flow problems // J. Comput. Phys. 1967. Vol. 2. P. 12–26.

© Popov V. N., 2017

УДК 621.3 (075.3)

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 423–432

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ПУЧКОВ ЭЛЕКТРОНОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ МОЩНОСТЬ

В. И. Трифанов, Л. И. Оборина, О. А. Суханова, И. В. Трифанов, Д. Р. Рыжов

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

Актуальным является преобразование энергии пучков электронов, выделяемых, например, из плазменного ядра продуктов сгорания топлива электрических ракетных двигателей (ЭРД), в электрическую мощность. Решение этой проблемы путем разработки генератора электрического тока на потоке плазмы может позволить повысить энергетическую эффективность ЭРД за счет использования энергии концентрированных пучков электронов, выделяемых из плазменного ядра продуктов сгорания топлива, для получения электрической энергии и напряжения электрического поля, которое, в свою очередь, может быть использовано для разгона ионизированного потока продуктов сгорания топлива. Полученную электроэнергию также целесообразно применять для выделения из плазменного ядра под действием электрического поля в поперечном магнитном поле пучков положительно заряженных ионов, которые позволят получить высокие скорости истекающей плазменной струи на срезе сопла. Такой подход дает возможность существенно повысить удельный импульс электрического ракетного двигателя, а также КПД космического летательного аппарата благодаря высокой скорости истечения рабочего тела, достигающего 10–300 км/с. Важную роль для эффективного преобразования энергии заряженных частиц плазмы в электрическую мощность играет развитие методов рекуперации энергии путем применения графеносодержащих композиционных материалов с высокой проводимостью, электрической емкостью, прочностью и низкой газопроницаемостью для изготовления токопроводящих электродов генератора электрического тока на потоке плазмы. Кроме того, для создания генераторов требуется повышение эксплуатационных характеристик электролитов суперионных проводников, которые широко могут применяться для производства емкостных накопителей электроэнергии и работать эффективно при температуре 150–300 ºС, в том числе в условиях воздействия космической среды. В качестве перспективных электролитов могут применяться полимерные твердые электролиты на основе лития, нитрида рубидия и др. Однако разработка генераторов электроэнергии для повышения энергетической эффективности ЭРД требует проведения научных исследований методов изготовления их индивидуальных компонентов, а также схем построения перспективных ЭРД с целью эффективной передачи электрической (электромагнитной) энергии в кинетическую энергию ускоряемого рабочего тела. Важным при этом является исследование возможности использования энергии как ионизированных продуктов сгорания топлива, так и энергии заряженных частиц околопланетной плазмы для получения электроэнергии с высоким КПД при помощи генераторов электрического тока на потоке плазмы с целью повышения энергетических характеристик ЭРД.

Ключевые слова: генератор электрического тока, поток плазмы, энергетическая эффективность ЭРД, электроэнергия, твердый электролит, ионистор, двойной электрический слой, графен, нанотрубки.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 423–432

THE CONVERSION OF ELECTRON BEAMS ENERGY IN ELECTRIC POWER

V. I. Trifanov, L. I. Oborina, O. A. Sukhanova, I. V. Trifanov, D. R. Ryzhov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: sibgau-uks@mail.ru

Nowadays on the front burner there a problem of the conversion of energy of electron beams emitted, for example, from the plasma core products of fuel combustion electric rocket engine (ERD) in the electric power. The solution to this problem by developing a generator of electric current in the plasma flow can improve the energy efficiency of the ERD at the expense of energy use concentrated beams of electrons emitted from the plasma core products of combustion of fuel to produce electrical energy and voltage electric field, which in turn can be used to disperse the ionized stream of products of combustion. The resulting electricity is also advisable to apply for allocation from the plasma core under the influence of an electric field in a transverse magnetic field, beams of positively charged ions, which allows obtaining high-speed flowing plasma jet at the nozzle exit. This approach gives the possibility to significantly increase the specific impulse of electric propulsion and also efficiency of the spacecraft due to the high velocity of the

working fluid reaching 10–300 km/s. The important role for the efficient energy conversion of charged particles in the plasma electric power plays the development of methods of energy recovery by applying Graffenstaden composite materials with high conductivity, electrical capacity, durability and low gas permeability for the manufacture of conductive electrodes of the generator of electric current in the plasma flow. In addition to creating generators improving the performance characteristics of the electrolytes, which are superionic conductors, is required that can be extensively applied for the production of capacitive energy storage devices to operate effectively at a temperature of 150–300 ºC, including in terms of exposure to the space environment. As promising electrolytes can be used a polymeric solid electrolytes based on lithium nitride rubidium and others. However, the development of power generators to increase energy efficiency ERD requires research methods of manufacturing individual components as well as schemes promising ERD for the effective transmission of electrical (electromagnetic) energy into kinetic energy of the accelerated working fluid. It is important to study the possibility of using energy as the ionized combustion products of fuel and energy of charged particles near the plasma to produce electricity with high efficiency by using generators of electric current in the plasma flow to increase the energy characteristics of the ERD.

Keywords: generator of electric current, plasma flow, energy efficiency ERD, electricity, solid electrolyte, supercapacitor, electric double layer, graphene, nanotubes.

Введение. Повышение энергетической эффективности многофункциональных электрических ракетных двигателей (ЭРД) [1; 2] требует разработки методов, обеспечивающих потребности в электрической энергии для восполнения большого расхода электрической мощности (10–100 кВт на 1 Н тяги) [3]. Способ и возможные технические решения электронной энергетики, преобразующие энергию электронных пучков в электроэнергию, рассмотрены в [4], перспективные методы такого преобразования представлены в [3]. Известно, что электростатические плазменные, созданные на эффекте Холла и другие ЭРД рассматриваются как перспективные в качестве основных двигателей космических летательных аппаратов. Из-за малой отбрасываемой массы рабочего тела с большой скоростью время непрерывной работы таких ЭРД будет измеряться месяцами и годами. Их использование вместо существующих химических ракетных двигателей позволит совершать полеты в дальнем космосе, если будут разработаны эффективные новые подходы для получения электрической мощности, используемой для создания электрореактивной тяги, например, путем преобразования в электрический ток энергии пучков электронов, выделяемых из плазменного ядра продуктов сгорания топлива [3; 4] в поперечном магнитном поле под действием напряжения электрического поля, при помощи усилителей-концентраторов пучков электронов и электронных генераторов тока.

Теоретическая часть. Задачей исследования является решение энергетической проблемы ЭРД путем преобразования энергии сконцентрированных пучков электронов в электрическую мощность. Одним из методов для получения и накопления статического электричества, а также получения электрического тока для питания аккумуляторов, систем ЭРД и агрегатов космического летательного аппарата (КЛА) является преобразование энергии концентрированных пучков электронов или ионов в электрическую мощность. Поставленная задача может быть решена при помощи генератора, содержащего заряжающий электрод, выполненный в виде аксиально-конического канала, стенка которого изготовлена из наномодифицированного углеродного материала и покрыта многослойной графеновой пленкой [5], толщиной 20–50 мкм. Заряжающий электрод при этом является рабочим электродом конденсатора ионисторного типа, содержащего электролит в двух кольцевых полостях, разделенных нетокопроводящей диафрагмой. На электродах ионисторного конденсатора может накапливаться электростатическое электричество, а в качестве электролита предполагается использовать твердый электролит, выполненный на основе лития или на основе наномодифицированного углеродного материала, также возможно применение жидкого электролита, изготовленного, например, на основе ионизированных растворов соли либо щелочи с добавлением наномодифицированного материала.

В ионисторных конденсаторах проявляет себя механизм образования двойного электрического слоя [6]. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ДЭС) известны под названием суперконденсаторов (Япония), ультраконденсаторов (Германия, США), электрохимических конденсаторов (Франция, Канада). Конкурентоспособность ионисторов, несмотря на низкое рабочее напряжение, определяется совокупностью следующих параметров: большая емкость, высокое сопротивление изоляции (низкие токи утечки), длительный срок службы, отсутствие необходимого контроля процесса зарядки, до нескольких тысяч циклов заряд/разряд [7], широкий интервал рабочих температур от –60 до 125 ºС [8], высокая стойкость к воздействию механических факторов, в том числе к ударам с ускорением до 50 тыс. g [8], высокая стойкость к воздействиям ионизирующих излучений [7]. Процесс зарядки/разрядки в ионисторах происходит в двойном слое ионов, сформированном на поверхности положительного и отрицательного электродов, выполненных, например, из активированного угля. Под действием приложенного напряжения анионы и катионы движутся к соответствующему электроду и накапливаются на поверхности электрода, образуя с зарядом электрода двойной электрический слой [9]. При приложении постоянного внешнего напряжения двойной электрический слой работает как изолирующий и не позволяет протекать сквозному току. Толщина двойного электрического слоя очень мала (5–10 нм) и сопоставима с размерами молекул. При определенном уровне напряжения и полярности за счет электрохимических процессов может начать протекать

ток. Величина этого напряжения называется напряжением разложения, или напряжением электрохимического распада электролита. В связи с этим при зарядке приложенное к ионистору напряжение ограничено напряжением разложения электролита, вследствие чего ионисторы могут соединяться последовательно. Величина прикладываемого напряжения зависит также и от состава электролита. Рекомендуемый диапазон работы ионисторов по напряжению от 2,3 до 5 В [7–9], при этом область образования двойного слоя на границе с электродом увеличивается при приложении более высокого напряжения, также повышается накапливаемый заряд.

В качестве электродов ионисторов может использоваться активированный уголь в виде мелкодисперсной фракции, изготовленной порошковой технологией [8], а также применяется органический электролит для работы ионистора. Электрод пропитывается электролитом путем его проникания между частицами активированного угля. Активированный уголь при этом представляет собой своеобразный электрод для малого конденсатора с емкостью, обусловленной двойным электрическим слоем. В связи с представленной структурой общую емкость ионистора можно представить как большое количество малых конденсаторов, где каждая частица активированного угля является электродом, поэтому общая емкость ионистора может быть описана выражением [7; 8]

$$C = \frac{F}{d}, \qquad (1)$$

где d – толщина двойного электрического слоя (5–10 нм); F – общая площадь поверхности электрода из активированного угля.

В действительности электрод ионистора представляет собой совокупность огромного количества частиц активированного угля с большой «развитой» площадью поверхности, примерно 2500–3000 см^2/г, что позволяет получить емкость до нескольких десятков фарад. В ионисторе между электродами расположен «сепаратор» с хорошим изоляционными свойствами для предотвращения короткого замыкания между электродами за счет проникновения ионов. Для ионистора может быть применена эквивалентная схема с использованием условных малых конденсаторов, так как двойной слой образован на поверхности активированного угля, находящегося в контакте с электролитом. Каждый малый конденсатор, созданный на основе структуры «частицы активированного угля – электролит», будет обладать емкостью двойного электрического слоя C_d. Значения сопротивления заряда R_{Fd} в процессе зарядки и сопротивления нескомпенсированных ионов R_{id} могут увеличиваться или уменьшаться в зависимости от расстояния между токоведущими электродами, скорости передвижения ионов, контактного сопротивления $R_{1\text{-}n}$ между частицами активированного угля и других параметров [7; 8]. Эквивалентная схема ионистора с учетом сопротивлений электродов и сепаратора представлена на рис. 1.

Зарядный ток i ионистора может быть рассчитан с использованием выражения:

$$i = \frac{V}{R} \cdot \exp\left(-\frac{t}{CR}\right), \qquad (2)$$

где V, t – напряжение и время зарядки; C – электростатическая емкость; R – сопротивление ионистора:

$$R = R_{e1} + R_{e2} + R_s, \qquad (3)$$

где R_{e1}, R_{e2} – сопротивления электродов; R_s – сопротивление сепаратора.

Зарядный ток i в пределах ионистора может быть представлен как сумма токов, протекающих через каждый из малых конденсаторов [8]. Зарядный ток согласно выражению (2) в реальности носит экспоненциальный характер. Значение постоянной времени CR оказывает влияние на время зарядки: чем меньше CR, тем меньше время зарядки и наоборот. Емкость ионистора C подобна эффективной емкости батареи, так как его можно представить в виде эквивалентной схемы из малых конденсаторов, имеющих различные значения сопротивления, а следовательно, разное время полной зарядки.

Емкость ионистора может быть оценена следующим выражением:

$$C = \frac{J \cdot t}{V_1 - V_2}, \qquad (4)$$

где C – электростатическая емкость, Ф; J – тестовый ток, А; t – время, с; V_1–V_2 – тестовый диапазон напряжений, В.

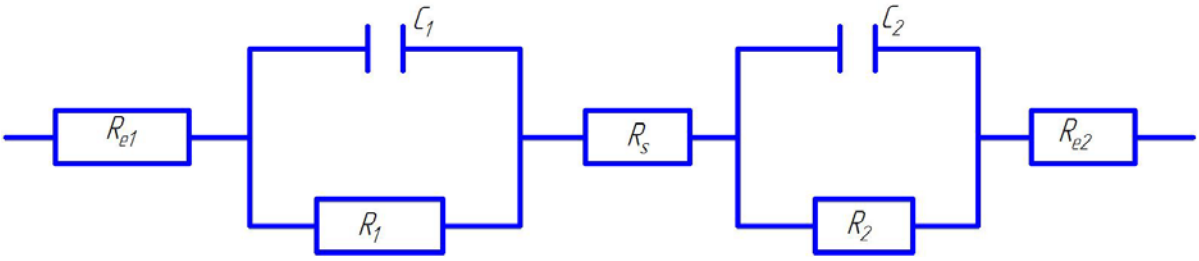


Рис. 1. Эквивалентная схема ионистора: C_1, C_2 – емкости двойного электрического слоя; R_{e1}, R_{e2} – сопротивление электродов; R_s – сопротивление сепаратора; R_1 и R_2 – сопротивление двойного электрического слоя

Fig. 1. Equivalent circuit of pseudocapacitor: C_1, C_2 – double-layer electric capacity; R_{e1}, R_{e2} – electrode resistance; R_s – flow-through rotor resistance; R_1 и R_2 – double-layer electric resistance

Емкость ионистора C зависит от тока, если ток заряда большой и конденсатор разряжался в течение длительного периода времени, то результирующая емкость будет мала, и наоборот. Для того, чтобы иметь воспроизводимые измерения, используют стандартный ток разряда 1 мА/Ф. В связи с тем, что схема ионистора состоит из большого количества малых конденсаторов с различными значениями внутреннего сопротивления, внутреннее сопротивление ионистора велико по сравнению с электрическими конденсаторами. Характеристика зарядки ионистора может быть представлена выражением [7; 8]

$$V = V_0\left[1-\exp\left(\frac{-t}{CR}\right)\right]. \quad (5)$$

Время разряда ионистора для постоянного тока можно определить по формуле

$$t = \frac{C\left(V_0 - V_1\right)}{J}. \quad (6)$$

Время разрядки ионистора для постоянного сопротивления при разряде приведено в виде выражения

$$t = -CR_{\text{н}}\ln\left(\frac{V_1}{V_0}\right), \quad (7)$$

где t – время; C – емкость; V_0 – внутреннее напряжение; V_1 – напряжение после t, с; J – ток нагрузки; $R_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки.

В общем случае характеристика саморазряда ионистора может быть представлена выражением

$$V = V_0\cdot\exp\left(\frac{-t}{CR_L}\right), \quad (8)$$

где R_L – сопротивление изоляции (сумма сопротивлений частиц активированного угля электродов).

Срок службы ионистора можно оценить с использованием выражения [7]

$$t_{\text{ри}} = \frac{CV}{i} = \frac{C\cdot\left(V_0 - iR - V_1\right)}{J + i_L}, \quad (9)$$

где $t_{\text{ри}}$ – время работы ионистора как резервного источника питания; C – емкость ионистора, Ф; i – ток в течение работы ионистора как источника, А; i_L – ток утечки, А; R – внутреннее сопротивление ионистора, Ом на 1 кГц; V_1 – напряжение, до которого разряжается ионистор, В.

Диапазон емкостей ионистора может составлять от 10^{-2} до 10^4 Ф [7; 8].

Предполагаемый срок эксплуатации ионистора $t_{\text{э}}$ зависит от произведения срока его службы, температурного фактора и напряжения:

$$t_{\text{э}} = t_{\text{ри}}\cdot T_{\text{ф}}\cdot U_{\text{ф}}. \quad (10)$$

Для ионисторов возможны быстрый заряд и большое количество циклов заряда/разряда (до нескольких десятков тысяч), так как в них не происходит никаких внутренних химических реакций [7]. Ионисторы с небольшими токами используются в схемах резервного питания, питания схем памяти, цифровых устройствах. Ионисторы с большими токами (например, HW-серия) используются в схемах управления электродвигателями, в автомобильной электронике и т. д. [7–9].

Накопление заряда электростатической энергии за счет преобразования энергии заряженного потока плазмы, например электронного луча в предложенном генераторе электрического тока на потоке плазмы (рис. 2) [5], описывается формулой

$$Q = C\frac{U^2}{2}, \quad (11)$$

где U – напряжение на электродах, В; C – емкость, Ф.

Особенностью конструкции многослойного заряжающего электродагенератора [5] (рис. 2), выполненного с сужающимся аксиально-коническим каналом, с диаметром на входе $d_{\text{вх}}$ = 2 мм, а на выходе – 0,2 мм (соотношение диаметров 0,1–0,3), является обеспечение герметичности ионистора при работе в вакууме. Это необходимо для сохранения электропроводности электролита в условиях работы в космической среде.

Герметичность многослойного заряжающего электрода может быть обеспечена за счет образования нескольких слоев графена, которые нанесены на заряжающий электрод. Известно, что графен обладает полной непроницаемостью для любых газов [10]. Кроме того, графен отличается высокой подвижностью электронов при комнатной температуре $2{,}5\cdot10^{-5}$ см^2·В$^{-1}$·с$^{-1}$ [11], теплопроводностью 3000 Вт·м$^{-1}$К$^{-1}$ [12], способностью поддерживать чрезвычайно высокую плотность тока (в несколько раз выше по сравнению с медью) [10; 13]. Графен обладает большим внутренним сопротивлением деформации (130 ГПа) [14; 15], может упруго растягиваться на 20 %, что позволяет наносить его на металлическую подложку. Графен также характеризуется высокой температурой плавления (3700–3900 ºС), которая была оценена по формуле [16; 17]

$$T_{b(S)} = \gamma\frac{Z_{b(S)}\cdot D_{b(S)}}{e\cdot K_B}, \quad (12)$$

где $T_{b(S)}$ – объемная поверхностная температура плавления; $D_{b(S)}$ – глубина потенциальной ямы в потенциале Морзе для объемной (поверхностной) двухатомной связи; $Z_{b(S)}$ – число ближайших соседей для объемного поверхностного атома; K_B – постоянная Больцмана; e – основание натурального логарифма; γ – масштабный множитель.

Все указанные эффективные физико-электрохимические свойства графена позволяют применить его при изготовлении многослойных электродов генератора, включая электроды ионисторного конденсатора.

Известно, что изготовление электродов из графена может увеличить емкость ионисторного конденсатора в 5 раз, емкость электродного материала при этом может составлять 150–210 Ф/г в зависимости от величины тока зарядки. Разработаны методы изготовления графеновых пленок толщиной 50–500 нм для получения электродов, например, из графеносодержащих композитов [18].

Высокая температура плавления графена позволяет использовать его для изготовления трубчатых электродов генератора электрического тока на потоке

плазмы при рекуперации энергии потоков ионизированных частиц в электростатическое электричество, при этом температура процесса рекуперации энергии может быть ограничена только температурным режимом эксплуатации электролита ионисторного конденсатора. Трубчатые электроды генератора электрического тока на потоке плазмы могут быть изготовлены также из гибрида графена и углеродных нанотрубок, что позволит повысить их прочность без существенного изменения электрофизических свойств.

Техническим результатом работы генератора электрического тока на потоке плазмы [5] является накопление статического заряда за счет преобразования энергии пучков заряженных частиц (электронов или катионов) плазмы в энергию электростатического заряда путем электрического торможения и сжатия потока электронов, обеспечение стабильности электрического тока и напряжения для зарядки аккумуляторов электрических систем, а также простота конструкции устройства, что позволяет ускорить период аккумуляции электроэнергии, повысив тем самым КПД аккумулятора.

Генератор электрического тока на потоке плазмы (рис. 2) содержит корпус *1* в виде полой трубки, на центральной оси которой размещено сопло *10* с аксиально-коническим каналом *12*, причем диаметры входного $d_{вх}$ и выходного $d_{вых}$ отверстий канала связаны зависимостью $d_{вых}/d_{вх}$ = 0, 1–0,3 (такое соотношение обеспечивает максимальное торможение и сжатие потока, что подтверждено экспериментальным путем). Полая трубка *2* контактирует с внутренней поверхностью корпуса *1* и образует основную кольцевую цилиндрическую полость *4*. Полая трубка *2* выполнена из нанопористого гибридного углеродного материала, на ее внутреннюю поверхность нанесена графеновая пленка *3* толщиной 10–30 мкм. В основной кольцевой цилиндрической полости *4* корпуса *1* установлена дополнительная полая трубка *5* из диэлектрика с образованием дополнительной кольцевой полости *8*, ограниченной наружной поверхностью сопла *10*. На внешней и внутренней поверхностях дополнительной трубки *5* нанесены графеновые пленки, соответственно *6* и *7*. Сопло *10* выполнено из нанопористого углеродного материала, его наружная поверхность покрыта графеновой пленкой *9* толщиной 10–30 мкм, а внутренняя коническая поверхность канала – графеновой пленкой *11* толщиной 40–50 мкм. Основная кольцевая цилиндрическая полость *4* и дополнительная кольцевая цилиндрическая полость *8* в зависимости от рабочей температуры заряженного потока плазмы заполнены твердым или жидким электролитом *13* и являются кольцевыми проводниками. Торцы генератора герметично закрыты диэлектрическими крышками *20*. Дополнительная полая трубка *5* выступает за торцевые крышки генератора и с одной стороны контактирует с электродом-мишенью *15*, защищенным от температурного и эрозионного воздействия со стороны заряженных частиц плазмы графеновой пленкой *14* толщиной 50 мкм, а с другой стороны примыкает к источнику заряженных частиц плазмы и служит направляющей для подачи последних в конфузор *21*, установленный на одной оси с соплом *10*.

Генератор имеет выводные электроды – отрицательный *16* и положительный *17*, управляющий электрод *18*, аксиальный анод электронной пушки *19* и вакуумную камеру *22* для испытаний в лабораторных условиях. В условиях космической среды генератор электрического тока на потоке плазмы может работать без вакуумной камеры.

Рассмотрим принцип работы генератора, управляемого программируемым логическим контроллером ПЛК-150 *32*, на примере электрической схемы, используемой в земных условиях для зарядки аккумулятора (рис. 3).

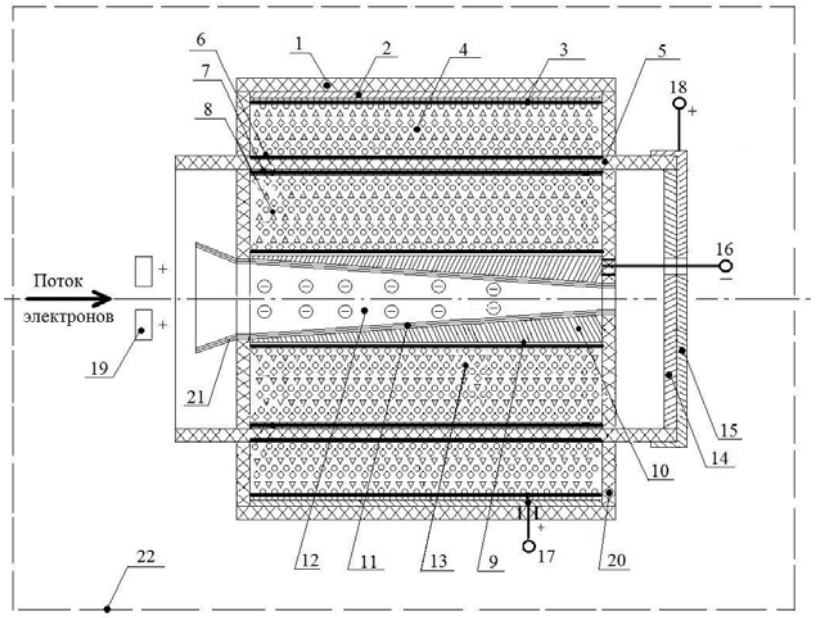


Рис. 2. Генератор электрического тока на потоке плазмы

Fig. 2. Electric generator to the plasma flow

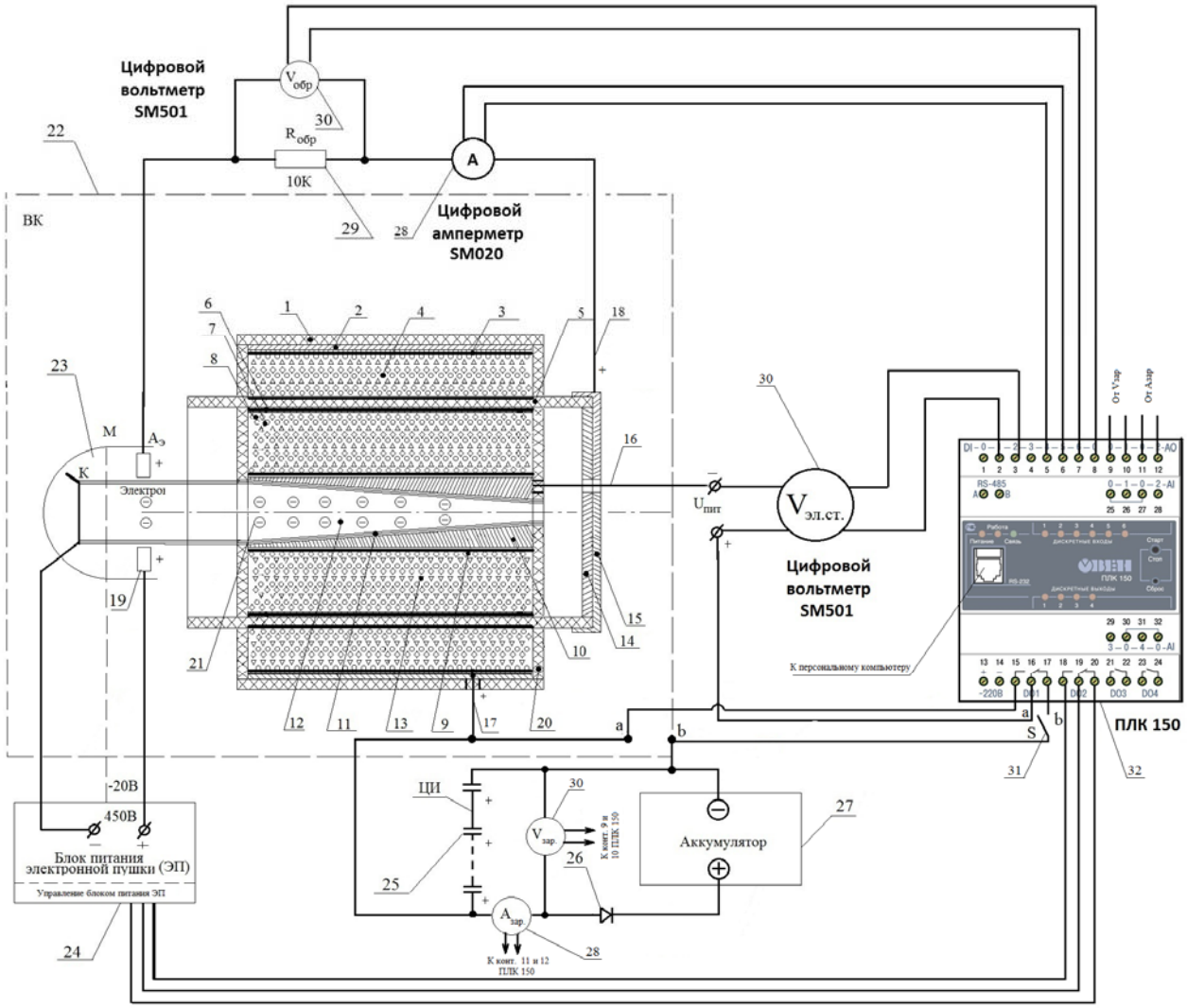


Рис. 3. Схема управления генератором электрического тока на потоке плазмы

Fig. 3. Scheme of electric generator management to the plasma flow

На катод и аксиальный анод *19* электронно-лучевой пушки *23*, а также на управляющий электрод *18* мишени *15* подают напряжение 450 В от блока питания *24*, на модулятор тока М – 20 В. Поток электронов через конфузор *21* направляется в аксиально-конический канал *12* сопла *10*, где происходит сжатие и торможение потока за счет конической формы канала, которая позволяет затормозить поток электронов и часть его энергии преобразовать в электрический ток и обеспечить увеличение плотности отрицательного заряда. При выполнении условия изготовления конического канала сопла $d_{вых}/d_{вх}$ = 0,1–0,3 обеспечивается наиболее высокая плотность электрического заряда.

При движении потока плазмы в аксиально-коническом канале и торможении его происходит повышение плотности заряда, а также и температуры. Углеродный материал может выдерживать температуру 3000 °С, графен – 3700 °С, что позволяет использовать данный материал для создания генераторов электроэнергии на потоке заряженных частиц плазмы, например, в плазменно-реактивном двигателе.

Известно, что при энергии электрона 1 кэВ энергия поглощения графеном составляет всего 0,5 % от первоначальной энергии электрона. В связи с этим разогрева и деформации графена не происходит, так же как и многослойного заряжающего электрода генератора тока на потоке плазмы. При энергии электрона 0,44–0,6 кэВ коэффициент прохождения через графен толщиной 6 слоев составляет от 0,8 до 1,25, а отношение падающей энергии к выходной $E_{пад}/E_{вых}$ равно 0,6 при $E_{пад}$ = 440 эВ и 0,8 при $E_{пад}$ = 600 эВ. При определенных условиях энергия падающих электронов на слой графена может быть увеличена за счет энергии электронов, содержащихся в графене [19].

Графеновая пленка *11* толщиной 40–50 мкм, нанесенная на внутреннюю поверхность аксиально-конического канала сопла генератора, способствует проникновению электронов во внутреннюю структуру пористого сопла *10* (электрода) и защите стенок аксиально-конического канала от физического и температурного воздействия потока плазмы [20]. Графеновая пленка может быть создана на основе нанотрубок длиной 0,2–10 мкм, диаметром 1,0–7,0 мм, с числом графеновых слоев от 1 до 5, с удельной поверхностью 400–800 м^2/г.

Электроны проникают через нанопоры многослойной графеновой пленки *11*, а затем уже в поры углеродного материала сопла *10* и графеновой пленки *9*, заряжая последнюю отрицательно. Прохождение электронов в слой дополнительной кольцевой цилиндрической полости 8 с твердым электролитом вызывает перемещение положительно заряженных ионов к границе между соплом *10* с графеновой пленкой *9* и дополнительной кольцевой цилиндрической полостью *8* (кольцевого проводника). Таким образом, создается первый двойной электрический слой.

Заряд накапливается в двойном электрическом слое, находящемся на границе двух сред (электролита и электрода), как у электрохимического конденсатора – ионистора, где также ионы участвуют в формировании заряда [21]. Однако в ионисторах накопление энергии происходит за счет приложения постоянного напряжения на его внешние выводы. Вся энергия в предлагаемом генераторе аккумулируется в виде статического электрозаряда, а накопление энергии идет за счет преобразования энергии электронного луча или может происходить за счет катионного потока, при этом потоки должны быть предварительно разделены [22].

Второй двойной электрический слой образуется на границе кольцевого слоя графеновой пленки *7* на внутренней поверхности дополнительной трубки *5* при взаимодействии с твердым электролитом дополнительной кольцевой полости *8*. При этом на графеновой пленке *7* на внутренней поверхности диэлектрической трубки 5 будет создаваться отрицательный потенциал, за счет которого на наружной поверхности диэлектрической трубки *5*, покрытой графеновой пленкой *6*, будет накапливаться положительный заряд, за счет которого отрицательно заряженные ионы от границы полой трубки будут перемещаться к наружной границе диэлектрической трубки *5*, покрытой графеном, что приведет к положительной зарядке полой трубки *2*, изготовленной из углеродного нанопористого материала.

Таким образом, между полой трубкой *2* и соплом *10*, являющимися кольцевыми проводниками, возникнет разность потенциалов статического заряда до 2–3 В, в зависимости от режима зарядки. Накопленная электростатическая энергия используется для зарядки аккумулятора *27* посредством повышения напряжения до 12 В, путем последовательного соединения генераторов электрического тока на потоке плазмы *25* с учетом того, что суммарное напряжение, вырабатываемое последовательно соединенными генераторами, должно быть $U_{ген} \geq U_{ном}$ аккумулятора. При этом ток проходит через диод *26*. Ток замеряется при помощи цифровых амперметров *28*, а напряжение – при помощи цифровых вольтметров *30* SM501 и образцового сопротивления *29*, с которых сигнал подается на контроллер ПЛК-150 *32*, который управляет режимами работы генератора тока на потоке плазмы.

По типу используемых в качестве электролитов материалов их делят на следующие группы: жидкостные, твердотельные, полимерные, на основе биологических объектов. По своим характеристикам электролиты могут работать при определенных температурах. Полимерные электролиты представляют собой растворы солей в полимере. На макроскопическом уровне такие вещества ведут себя как твердые тела, что обеспечивается контактными взаимодействиями макромолекул полимера, а на микроскопическом уровне они демонстрируют черты поведения жидкостей. В настоящее время наиболее часто используются полимерные твердые электролиты, образующиеся при смешивании окиси полиэтилена и таких солей, как $LiClO_4$, $LiCF_3SO_3$ и др. В качестве электролита также могут быть использованы растворы 30 % KOH–NiOOH или 38 % водного раствора H_2SO_4, 30 % NaCl и угольный порошок. В качестве твердого электролита используют $RbAg_4J_5$ (суперионный проводник), который широко применяется для создания суперконденсаторов. Разработан также твердый электролит на основе нитрида рубидия, позволяющий работать при температуре 150–220 ºС [18].

Для увеличения площади твердого электролита и, соответственно, площади основного и дополнительного кольцевых проводников, а следовательно, повышения запаса электрической энергии, в качестве твердого электролита могут применяться нанопористые углеродные материалы, смешанные с ионизированным химическим веществом на основе щелочи или раствора соли. В качестве твердого электролита может быть использован электролит на основе углеродного материала, наномодифицированного активным металлом, например железом (работает при температуре 20–110 °С). В качестве жидкого электролита может быть использован электролит, например, на основе раствора NaCl с добавлением углеродного материала, наномодифицированного активным металлом (железом и др.), работающий при температуре 20–65 °С.

Твердый электролит в виде наномодифицированного углеродного материала имеет высокую электропроводность положительно и отрицательно заряженных ионов и возможность перемещения заряженных наночастиц с высокой скоростью под действием электрического потенциала. Твердый электролит на основе лития может работать при температуре 20–300 °С, поэтому его более предпочтительно использовать в данном генераторе для работы плазменно-реактивного двигателя или в условиях космоса.

Известен карбидный уголь, который имеет площадь пористости поверхности от 400 до 2000 $м^2/г$, что позволяет использовать его в качестве электродов для получения более высокой емкости [8; 23].

Для электродинамического управления процессом получения электростатического заряда (тока на выводных проводах генератора) на электрод-мишень может подаваться положительный или отрицательный потенциал в зависимости от заряда потока частиц плазмы.

Накопление заряда электрической энергии за счет преобразования энергии заряженного потока плазмы, например электронного луча в генераторе, рассчитывалось по формуле (11), а емкость – по формуле (4).

В процессе работы генератора напряжение между электродами *16* и *17* генератора, также как и сила тока управляющего электрода *18*, контролируется цифровым вольтметром SM501, соединенным с контроллером *32*.

В положении «а» переключателя S *31* контроллера ПЛК-150 происходит замер напряжения на электродах генератора, в положении «б» происходит заряд аккумулятора *27* от цепи последовательно соединенных генераторов *25*. Переключатель *31* контроллера *32* в положении «а» обеспечивает зарядку генератора от электронного пучка, в положении «б» он обеспечивает дополнительную зарядку генератора током электронного пучка, снимаемого с электрода-мишени *15*, в режиме прерывания подачи потенциала (+) напряжением 450 В.

Следует отметить, что электрические заряды положительно и отрицательно заряженных ионов твердого электролита заполняют обе кольцевые цилиндрические полости *4* и *8* и присутствуют в порах кольцевых электродов (сопла *10* и полой трубки *2*), и в том числе порах графеновой пленки *3*, *6*, *7*, *9*, *11*. Внутри двух полостей (основной *4* и дополнительной *8*) генератора размещены электрические проводники, электрически связанные с твердым электролитом.

Заряд накапливается в двойном электрическом слое, находящемся на границе двух сред (электролита и электрода), как у электрохимического конденсатора – ионистора. Однако в ионисторах накопление энергии происходит за счет приложения постоянного напряжения на его внешние выводы (суперконденсаторы) [8].

Таким образом, генератор на потоке плазмы в совокупности представляет собой конденсатор с несколькими ДЭС, созданными на основе наноуглеродных материалов, графеновых пленок и электролита, снабженный соплом с аксиально-коническим каналом для прохождения потока заряженной плазмы, где происходит торможение и сжатие заряженных частиц и переход их заряда в пористую структуру электродов.

Поток электронов в аксиально-конический канал генератора может подаваться импульсно. В момент паузы генератор будет заряжать аккумуляторы. Для создания высокого напряжения тока несколько генераторов могут соединяться в последовательную цепь. Совокупность всех указанных существенных признаков генератора электрического тока на потоке заряженных частиц плазмы позволяет ему вырабатывать постоянную электрическую энергию для зарядки аккумуляторов.

Для подтверждения работоспособности были проведены испытания лабораторных образцов генератора на потоке плазмы на твердом электролите (табл. 1) и на жидком электролите (табл. 2).

Электроды (полая трубка *2* и сопло *10*) были изготовлены из нанопористого углеродного материала и покрыты многослойной графеновой пленкой толщиной 20–50 мкм, в качестве электролита применяли наномодифицированный цинком углеродный материал с добавлением ионизированного химического вещества 30 % KOH–NiOOH.

Входной диаметр аксиально-конического канала $d_{вх}$ = 2,0 мм, а выходной диаметр $d_{вых}$ = 0,2 мм.

Генератор испытывался с применением вакуумной установки УВН-71 П-3. Для измерения вакуума $P = 1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. использовались вакуумметры: ионизационно-термопарный ВИТ-2 и электромагнитный ВЭМБ-1. Для создания электронного луча применялся блок осциллографа ЛО-247, состыкованный с аксиально-коническим каналом. Ток катода электронной пушки измерялся цифровым амперметром SM020, кл. точн. 1. Ток заряда генератора измерялся также цифровым амперметром SM020, кл. точн. 1. В качестве образцового сопротивления использовался резистор Р 331, источник питания для подачи напряжения – блок осциллографа Б5-50. Для измерения напряжения на электродах генератора применялся вольтметр цифровой SM501, класс точности 1,5. Результаты замеров были обработаны с использованием формул (4)–(11) и представлены в табл. 1.

В качестве жидкого электролита использовали электролит на основе модифицированного железом нанопористого углеродного материала и ионизированного раствора соли 30 % NaCl.

Для создания электронного луча использовали лабораторный генератор напряжением 1000 В, применяемый для обработки материалов. Входной диаметр аксиально-конического канала $d_{вх}$ = 3,0 мм, а выходной $d_{вых}$ = 0,9 мм. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Таблица 1

Электрические характеристики генератора

№ п/п	Ток заряда генератора *i*, мА	Время замера *t*, с	Напряжение на электроде-мишени *V*, В	Напряжение на электродах генератора *V*, В	Емкость генератора *C*, мФ	Энергия поля генератора, мДж
1	1,65	300	250	0,665	744,36	317
2	1,65	300	250	0,702	705,13	336
3	1,65	300	250	0,863	573,58	413
4	1,65	300	250	1,33	372,18	638
5	1,65	300	250	1,433	345,43	686
6	1,65	300	250	1,88	263,3	902

Таблица 2

Электрические характеристики генератора с жидким электролитом

№ п/п	Ток заряда генератора *i*, мА	Время зарядки *t*, с	Напряжение на электроде-мишени *V*, В	Напряжение на электродах генератора *V*, мВ	Емкость генератора *C*, Ф
1	100	120	100	65	185
2	150	150	100	90	250
3	200	300	100	105	600

Заключение. В результате выполненных исследований подтверждена возможность получения постоянного тока путем преобразования заряда потока плазмы (электронного луча) в электростатический заряд при помощи предложенного генератора электрического тока на потоке плазмы [5]. Накопленный электростатический заряд преобразовывался в электрическую мощность для зарядки аккумулятора с требуемым напряжением тока. Развитие методов преобразования энергии заряженных частиц плазмы в электроэнергию с использованием предложенных принципов построения генератора электрического тока может повысить энергетическую эффективность ЭРД, а также обеспечить рекуперацию энергии заряженных частиц на срезе сопла с последующей их нейтрализацией.

Библиографические ссылки

1. Гришин С. Д., Лесков Л. В., Козлов Н. П. Электрические ракетные двигатели. М. : Энергия, 1975. 272 с.
2. Повышение эффективности многофункциональных электрических ракетных двигателей / И. В. Трифанов [и др.] // Вестник СибГАУ. Т. 17, № 3. С. 729–737.
3. Принципы построения электроэнергетических и электродинамических технологий космических аппаратов : монография / И. В. Трифанов [и др.] ; под общ. ред. И. В. Трифанова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2015. 182 с.
4. Пат. 2567896 Российская Федерация, МПК F 03 H 1/00. Способ создания электрореактивной тяги / Казьмин Б. Н., Трифанов И. В., Оборина Л. И., Рыжов Д. Р., Дубова Е. Д. № 2013125958/06 ; заявл. 05.06.2013 ; опубл. 10.11.2015, Бюл. № 31.
5. Пат. 2597205 Российская Федерация, МПК H01J 25-68 (2006.01). Генератор электрического тока на потоке плазмы / Трифанов И. В., Казьмин Б. Н., Оборина Л. И. Трифанов В. И. № 2015115048/07 ; заявл. 21.04.2015; опубл. 10.09.2016, Бюл. № 25.
6. Conway B. E. Electrochemicals Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications. New York : Kuwer-Plenum Publ. Co., 1999. 736 p.
7. Панкрашкин А. Ионисторы Panasonic: физика, принцип работы, параметры [Электронный ресурс] // Компоненты и технологии. 2006. № 9. URL: http://ecworld.ru/ (дата обращения: 10.02.2017).
8. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): разработка и производство / В. Кузнецов [и др.] // Компоненты и технологии. 2005. № 6. 5 с.
9. Исследование свойств ионисторов и эффективности их применения в системах электропитания космических аппаратов / А. И. Галушко [и др.] // Вопросы электромеханики. 2013. Т. 133. С. 15–18.
10. Moser J., Barreiro A., Bachtold A. Current-induced cleaning of grapheme // Applied Physics Letters. 2007. 91. P. 163513.
11. Micrometer-scale ballistic transport in encapsulated graphene at room temperature / A. S. Mayorov [et al.] // Nano Lett. 2011. № 11. P. 2396–2399.
12. Balandin A. A. Thermal properties of graphene and nanostructured carbon materials // Nature Mater. 2011. № 10. P. 569–581.
13. Поверенная М. С. Графеновый бум: итоги. Нанометр [Электронный ресурс] // Нанотехническое сообщество. 2012. URL: http://www.nanometer.ru/2012/10/26/13512365078102_298275.html.
14. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer grapheme / C. Lee [et al.] // Science. 2008. № 321. P. 385–388.
15. Liu F., Ming P. M. & Li J. Ab initio calculation of ideal strength and phonon instability of graphene under tension // Phys. Rev. 2007. B 76, P. 064120.
16. Орехов Н. Д., Стегайлов В. В. Молекулярно-динамическое моделирование плавления графита // ТВТ. 2014. Т. 52, № 2. С. 220–228.
17. Давыдов С. Ю. Об оценках температуры плавления графеноподобных соединений // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49, № 12. С. 1683–1688.
18. Уваров Н. Ф. Разработка методов изготовления электродов для суперконденсаторов с использованием углеродных материалов на основе графена [Электронный ресурс]. URL: https://4science.ru/conference 2015/theses/14.604.21.0013 (дата обращения: 10.02.2017).
19. Кулешов А. Г. Исследование физических явлений в структурах приборов вакуумной электроники на основе автоэмиссии и вторичной эмиссии электронов из алмазных пленок : дис. … канд. техн. наук. М., 2014.
20. Графен в электронике: сегодня и завтра [Электронный ресурс]. URL: http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/doc/59336/ (дата обращения: 18.12.2016).
21. Шихатов А. И. // Журнал Мастер 12 вольт. 2003. № 50. С. 40–45.
22. Пат. 2117398 Российская Федерация, МПК H 04 B1 3/00. Способ передачи энергии в вакууме / Аликаев В. В., Егоров А. Н., Семашко Н. Н., Латышев Л. А. № 97103964/09 ; заявл. 13.03.1997 ; опубл. 10.08.1998.
23. Graphene-based electrochemical supercapacitors / S. R. C. Vivekchand [et al.] / Journal of Chemical Sciences. 2008. Vol. 120. No. 1.

References

1. Grishin S. D., Leskov L. V., Kozlov N. P. *Elektricheskie raketnye dvigateli.* [Electric rocket engines]. Moscow, Energiya Publ., 1975, 272 p.
2. Trifanov I. V., Kaz'min B. N., Oborina L. I., Trifanov V. I., Savel'eva M. V. [Improving the efficiency of multifunctional electric rocket engines]. *Vestnik SibGAU.* 2016, Vol. 17, No. 3, P. 729–737 (In Russ.).
3. Trifanov I. V., Kaz'min B. N., Ryzhov D. R., Khomenko I. I. *Printsipy postroeniya elektroenergeticheskikh i elektrodinamicheskikh tekhnologiy kosmicheskikh apparatov* [Principles of electric and electro-spacecraft technologies]. Krasnoyarsk, 2015, 182 p.
4. Kaz'min B. N., Trifanov I. V., Oborina L. I., Ryzhov D. R., Dubova E. D. *Sposob sozdaniya elektroreaktivnoy tyagi* [The process of creating electro jet thrust]. Patent RF, No. 2567896, 2015.
5. Trifanov I. V., Kaz'min B. N., Oborina L. I. Trifanov V. I. *Generator elektricheskogo toka na potoke*

plazmy [A power generator to the plasma flow]. Patent RF, No. 2597205, 2016.

6. Conway B. E. Electrochemicals Supercapacitors: *Scientific Fundamentals and Technological Applications.* Kuwer-Plenum Publ. Co., New York, 1999, 736 p.

7. Pankrashkin A. [Supercaps Panasonic: physics, principle of operation, parameters]. *Ionistory Panasonic: fizika, printsip raboty, parametry. Komponenty i tekhnologii,* 2006, No. 9. Available at: http://ecworld.ru/.

8. Kuznetsov V., Pan'kin O. [Capacitors with a double electric layer (supercapacitor): the development and production]. *Komponenty i tekhnologii.* 2005, No. 6, 5 p. (In Russ.).

9. Galushko A. I., Grom Yu. I., Lazarev A. N., Salikhov R. S. [The study of the properties of supercapacitors and the effectiveness of their application in power supply systems of space vehicles]. *Voprosy elektromekhaniki*. 2013, Vol. 133, P. 15–18 (In Russ.).

10. Moser J., Barreiro A., Bachtold A. Current-induced cleaning of grapheme. *Applied Physics Letters* 91, 163513 (2007).

11. Mayorov, A. S. et al. Micrometer-scale ballistic transport in encapsulated graphene at room temperature. *Nano Lett.* 2011, No. 11, P. 2396–2399.

12. Balandin A. A. Thermal properties of graphene and nanostructured carbon materials. *Nature Mater.* 2011, No. 10, P. 569–581.

13. Poverennaya M. S. [Graphene boom: results] *Grafenovyy bum: itogi. Nanometr. Nanotekhnicheskoe soobshchestvo*, 2012. Available at: http://www.nanometer.ru/2012/10/26/13512365078102_298275.html. (accessed 18.02.2017).

14. Lee C., Wei X. D., Kysar J. W.& Hone, J. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *Science.* 2008, No. 321, P. 385–388.

15. Liu F., Ming P. M., Li J. Ab initio calculation of ideal strength and phonon instability of graphene under tension. *Phys. Rev.* 2007, Vol. B 76, P. 064120.

16. Orekhov N. D., Stegailov V. V. Molecular dynamics simulation of graphite melting. *High Temperature,* 2014, Vol. 52, Iss. 2, P. 198–204. Doi:10.1134/S0018151X14020187.

17. Davydov S. Y. On estimations of the melting temperature of graphene-like compounds. *SEMICONDUCTORS,* 2015, Vol. 49, No. 12, P. 1634–1639. Doi: 10.1134/s1063782615120076.

18. Uvarov N. F. *Razrabotka metodov izgotovleniya elektrodov dlya superkondensatorov s ispol'zovaniem uglerodnykh materialov na osnove grafena.* [Development of methods for fabrication of electrodes for supercapacitors using carbon materials based on graphene] (In Russ.) Available at: https://4science.ru/conference2015/theses/14.604.21.0013 (accessed 10.02.2017).

19. Kuleshov A. G. *Issledovanie fizicheskikh yavleniy v strukturakh priborov vakuumnoy elektroniki na osnove avtoemissii i vtorichnoy emissii elektronov iz almaznykh plenok. Kand. Diss.* [Study of physical phenomena in the structures of the devices of vacuum electronics based on autoemission and secondary electron emission from diamond films. Can. Diss.]. 2014.

20. *Grafen v elektronike: segodnya i zavtra.* Available at: http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/doc/59336/ (accessed 18.01.2017).

21. Shikhatov A. I. *Zhurnal Master 12 vol't,* 2003, No50, S. 40–45 (In Russ.).

22. Alikaev V. V., Egorov A. N., Semashko N. N., Latyshev L. A. *Sposob peredachi energii v vakuume* [Power transmission method in a vacuum]. Patent RF, No 2117398, 1998.

23. Vivekchand S. R. C., Rout Chandra Sekhar, Subrahmanyam K. S., Govindaraj A., Rao C. N. R. Graphene-based electrochemical supercapacitors. *Journal of Chemical Sciences.* 2008, Vol. 120, No. 1.

© Трифанов В. И., Оборина Л. И., Суханова О. А., Трифанов И. В., Рыжов Д. Р., 2017

УДК 539.21:537.86

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 433–440

ВЛИЯНИЕ АНИОННОГО ЗАМЕЩЕНИЯ НА МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫЕ СВОЙСТВА ХАЛЬКОГЕНИДОВ МАРГАНЦА

А. М. Харьков, М. Н. Ситников, А. Н. Масюгин

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

Описаны материалы на основе твердых растворов $Gd_xMn_{1-x}S$ и $Gd_xMn_{1-x}Se$ с концентрацией x = 0,2, которые в перспективе могут использоваться в качестве сенсоров, датчиков, устройств записи-считывания информации. Проведены исследования магниторезистивных свойств твердых растворов $Gd_{0,2}Mn_{0,8}S$ и $Gd_{0,2}Mn_{0,8}Se$ в нулевом и магнитном поле 13 кЭ в интервале температур 80–500 К.

В сульфидах марганца $Gd_xMn_{1-x}S$ наблюдается смена знака магнитосопротивления с положительного на отрицательный и его максимум в области перехода в магнитоупорядоченное состояние. Найден минимум при T = 325 К, в магнитном поле сопротивление также возрастает, а минимум в его температурной зависимости смещается в сторону высоких температур до T = 380 К. Магнитосопротивление меняет знак с ростом температуры с положительного на отрицательный при T = 320 К и исчезает при T = 475 К.

В сульфидах марганца $Gd_xMn_{1-x}Se$ наблюдается отрицательное магнитосопротивление ниже комнатных температур и гистерезис вольт-амперных характеристик. В магнитном поле гистерезис уменьшается. Установлена смена знака магнитосопротивления с ростом температуры. Магнитосопротивление $\delta = (\rho(H) - \rho(0)) / \rho(0)$ в $Gd_xMn_{1-x}Se$ с концентрацией замещения x = 0,2 меняет знак с ростом температуры при T = 320 К. При этой температуре наблюдается широкий гистерезис вольт-амперной характеристики.

Синтез новых халькогенидных соединений при катионном замещении марганца гадолинием в системах MnS и MnSe позволит выяснить влияние анионной системы в результате исследования его магниторезистивных свойств с концентрацией в области протекания ионов гадолиния по решетке x = 0,2.

Экспериментальные данные объясняются в модели орбитального упорядочения и спин-орбитального взаимодействия.

Ключевые слова: твердые растворы, электросопротивление, магнитосопротивление, вольт-амперные характеристики, магниторезистивный эффект.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 433–440

INFLUENCE OF ANIONIC SUBSTITUTION ON THE MAGNETIC-RESISTANCE PROPERTIES OF THE MANGANESE CHALKOGENIDES

A. M. Kharkov, M. N. Sitnikov, A. N. Masyugin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: khark.anton@mail.ru

The paper describes the materials on the basis of solid solutions $Gd_xMn_{1-x}S$ u $Gd_xMn_{1-x}Se$ with concentration x = 0.2, which could potentially be used as sensors, sensor devices, read-write information. The magnetoresistive properties of $Gd_{0.2}Mn_{0.8}S$ and $Gd_{0.2}Mn_{0.8}Se$ solid solutions in a zero and magnetic field of 13 kOe in the temperature range 80–500 K were studied.

In manganese sulphides $Gd_xMn_{1-x}S$, the sign of the magnetoresistance changes from positive to negative and its maximum in the region of transition to the magnetically ordered state. The minimum is found at T = 325 K, and in the magnetic field the resistance also increases, and the minimum in its temperature dependence shifts toward high temperatures to T = 380 K. The magnetoresistance changes sigh with increasing temperature from positive to negative at T = 320 K and disappears at T = 475 K.

In manganese sulfides $Gd_xMn_{1-x}Se$, a negative magnetoresistance is observed below room temperature and a hysteresis of the current-voltage characteristics. In a magnetic field the hysteresis decreases. The change of the sign magnetoresistance with increasing temperature is established. The magnetoresistance $\delta = (\rho(H) - \rho(0)) / \rho(0)$ in $Gd_xMn_{1-x}Se$ with replacement concentration x = 0.2 changes sigh with increasing temperature at T = 320 K. At this temperature, a wide hysteresis of the current-voltage characteristic is observed.

The synthesis of new chalcogenide compounds in the cationic substitution of manganese by gadolinium in the MnS and MnSe systems will make it possible to clarify the effect of the anion system, as a result of studying its magnetoresistive properties with a concentration in the gadolinium ion flux region along the x = 0.2 lattice.

The experimental data are explained in the model of the orbital ordering and spin-orbit interaction.

Keywords: solid solutions, electrical resistivity, magnetoresistance, current-voltage characteristics, magnetoresistive effect.

Введение. В качестве перспективных материалов для элементной базы микроэлектроники и спинтроники могут быть использованы твердые растворы на основе сульфидов и селенидов марганца, замещенных редкоземельными элементами из группы лантаноидов, таких как гадолиний (Gd). В результате это приведет к повышению эксплуатационных характеристик изделий и расширению спектра их функционального назначения в аэрокосмической отрасли.

Материалы на основе твердых растворов $Gd_xMn_{1-x}S$ и $Gd_xMn_{1-x}Se$ (x = 0,2) в перспективе могут использоваться в качестве сенсоров, датчиков, устройств записи-считывания информации [1].

Принцип работы спинтронных устройств основан на эффекте магнитосопротивления. Халькогениды переходных металлов и их твердые растворы оказались хорошими модельными объектами для изучения этого эффекта. Исследования моносульфида марганца и синтезированных на его основе твердых растворов с катионым замещением 3*d*-элементами (Fe, Cr, Co и т. д.) [2] и 4*f*-элементами (Gd, Yb, Sm и т. д.) [3] обнаружили эффект магнитосопротивления и переход «металл–диэлектрик» при изменении концентрации замещения, магнитного поля и температуры.

Магнитосопротивление твердых растворов $Gd_xMn_{1-x}S$ и $Gd_xMn_{1-x}Se$ (x = 0,2) в парамагнитной области может быть обусловлено наличием вырожденных орбитальных состояний электрона и сильных электронных корреляций. В зависимости от степени заполнения орбиталей могут индуцироваться различные типы орбитальных состояний электронов, включая несоразмерные состояния. Орбитальный порядок может сопровождаться искажением решетки, ян-теллеровским искажением, вызванными связью между электронами и решеткой [4].

На основе спин-зависимого электронного транспорта создаются устройства в спинтронике. Магнитное поле действует на магнитное состояние многослойной наноструктуры и управляет током в результате магниторезистивного эффекта. Особое внимание исследователей уделяется манганитам [5] в связи с возможностью образования в них разного типа неоднородных зарядовых и спиновых состояний, таких как решеточные и магнитные поляроны, капельные и страйповые структуры и т. д. Аналогичные явления характерны для многих сильно коррелированных систем. Фазовое расслоение, возникающее при легировании, может привести к аномалиям кинетических свойств в результате изменения вокруг такой области локального электронного окружения отдельными носителями заряда. При этом подобным областям выгодно находиться как можно дальше друг от друга для минимизации кулоновской энергии [6].

Магнитосопротивление в парамагнитной области может быть обусловлено существованием вырожденных орбитальных состояний электрона и сильных электронных корреляций. Особенно вблизи полного заполнения орбитальное вырождение может индуцировать дальний орбитальный порядок, для которого вероятность найти электрон на одной из орбиталей зависит от типа решетки и орбитали. Орбитальный порядок может сопровождаться искажением решетки, ян-теллеровским искажением, вызванным взаимодействием между электронами и решеткой. Вместе с тем орбитально упорядоченное состояние может быть энергетически выгодным и без искажения решетки [4].

При высоком уровне допирования может возникнуть орбитально неупорядоченное состояние, которое энергетически выгодно по сравнению с антиферроорбитальным упорядочением из-за понижения кинетической энергии. Аналогично неупорядоченным спиновым системам, когда в парамагнитной области существуют ферромагнитные поляроны в области высоких температур, вклад в кинетические свойства таких систем дают орбитальные поляроны. Форма орбитальных поляронов зависит от конфигурации электронных орбиталей. Они могут принимать форму диска или цепочки в зависимости от соотношения обменного взаимодействия между псевдоорбитальными моментами и интегралами перескока [7]. В магнитном поле при учете фазы электрона энергия орбитального полярона в форме диска будет иметь меньшее значение, чем в случае цепочки. При наличии орбитального магнитного момента, например у электронов в t_{2g}-состояниях, орбитальные поляроны обладают магнитным моментом. В этом случае энергия орбитального полярона зависит от направления и величины внешнего магнитного поля. В результате возможен магниторезистивный эффект в отсутствие статических деформаций решетки.

В сульфиде марганца (MnS) орбитальное вырождение может возникнуть при электронном допировании в результате замещения двухвалентного иона марганца трехвалентными редкоземельными 4*f*-элементами, например ионами гадолиния в металлическом соединении GdS [8] с кристаллической и магнитной структурами, аналогичными MnS. Из-за сильных электронных корреляций в MnS существует щель с энергией 2,5 эВ. Взаимодействие электронов в 5*d*-зоне с 4*f*-электронами при определенных параметрах уменьшает кинетическую энергию электрона и способствует формированию орбитального упорядочения на ионах гадолиния в t_{2g}-подсистеме. Внутриатомное и междуатомное спин-орбитальное взаимодействие, которое может усиливаться электрон-фононным взаимодействием, индуцирует расщепление спектра электронных возбуждений по спину.

В сульфидах марганца $Gd_xMn_{1-x}S$ найдена смена знака магнитосопротивления с положительного на отрицательный и его максимум в области перехода в магнитоупорядоченное состояние для двух составов вблизи концентрации протекания x_c = 0,16. Установлен рост диэлектрической проницаемости, а также магнитоемкостный эффект. В селениде марганца при анионном замещении обнаружено отрицательное магнитосопротивление выше температуры Нееля до комнатных температур. В связи с этим синтез нового халькогенидного соединения при катионном замещении марганца гадолинием в системе MnSe позволит выяснить влияние анионной системы в результате исследования его магниторезистивных свойств с концентрацией в области протекания ионов гадолиния по решетке x = 0,2 [9].

Исходный моноселенид марганца является антиферромагнитным полупроводником *p*-типа, имеет структуру ГЦК-решетки с кубической элементарной ячейкой. Результаты комплексных исследований электрических и оптических свойств показали, что для MnSe ширина запрещенной зоны может иметь величину E_g = 2,3 эВ. При охлаждении и нагревании MnSe в температурном поведении сопротивления наблюдается гистерезис в температурном интервале 125 К < T < 260 К, обусловленный сосуществованием кубической и гексагональной модификаций. Температура магнитного фазового перехода, определенная по данным нейтронографических исследований, для MnSe в кубической модификации равна T_N = 135 К, а в гексагональной фазе NiAs она совпадает с температурой структурного перехода T_c = 272 К. В MnSe сопротивление падает с ростом внешнего магнитного поля [10].

Селенид гадолиния – перспективный и широкоприменяемый материал в производстве радиоизотопных источников энергии. Соединение GdSe обнаруживает металлический тип проводимости, при низких температурах (50 К) переходит в магнитоупорядоченное состояние антиферромагнитного типа [11], кристаллизуется в кубической структуре типа NaCl с параметром элементарной ячейки 0,5775 нм. Замещение катионов марганца ионами редкоземельных элементов приводит к электронному допированию и образованию дополнительных обменных ферромагнитных взаимодействий между ионами марганца в результате кинетического *s-d*-взаимодействия. Ожидаются изменения магнитной структуры и усиление ферромагнитных свойств, изменение типа проводимости, носителей тока и обнаружение магниторезистивного эффекта.

Цель данной работы – выяснить влияние анионного замещения на магниторезистивные свойства халькогенидов марганца $Gd_xMn_{1-x}S$ и $Gd_xMn_{1-x}Se$ (x = 0,2).

Экспериментальные результаты и их обсуждение для $Gd_{0,2}Mn_{0,8}S$. Синтез твердых растворов $Gd_xMn_{1-x}S$ и их рентгеноструктурный анализ подробно описаны в работе [12]. Путем магнитных и калориметрических измерений [13] установлено уменьшение температуры магнитного фазового перехода от T = 150 К до $T(x = 0,2)$ = 120 К и определена критическая концентрация, при которой исчезает дальний магнитный порядок и образуется спиновое стекло (x_c = 0,23). Измерение сопротивления было проведено четырехзондовым методом в магнитном поле H = 8 кЭ, направленном перпендикулярно направлению тока, для состава с x = 0,2 в области температур 100 К < T < 550 К.

Если в интервале температур 100 К < T < 500 К концентрация ионов гадолиния превышает концентрацию протекания x_c = 0,16, в твердом растворе $Gd_xMn_{1-x}S$ сопротивление меняется в пределах одного порядка и имеет минимум при T = 325 К (рис. 1). В магнитном поле сопротивление также возрастает, а минимум в его температурной зависимости смещается в сторону высоких температур до T = 380 К. Магнитосопротивление, приведенное на рис. 1, *б*, меняет знак с ростом температуры с положительного на отрицательный при T = 320 К и исчезает при T = 475 К. Аномалия в температурной зависимости магнитосопротивления наблюдается вблизи концентрации протекания при T ~ 210 К.

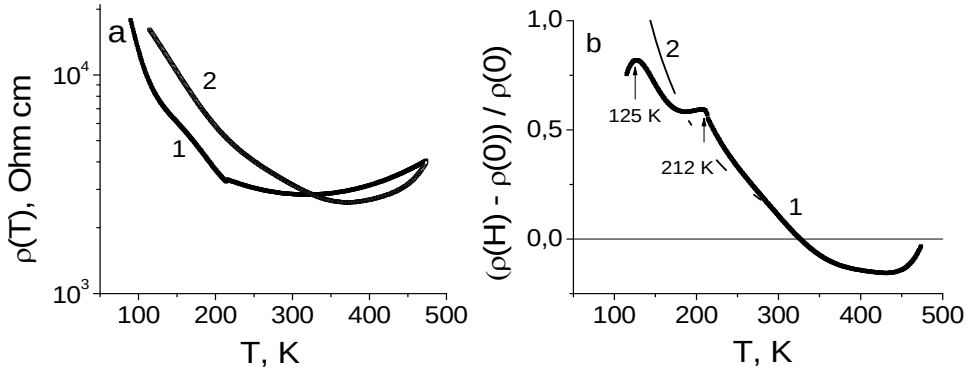


Рис. 1. Удельное электросопротивление $Gd_{0,2}Mn_{0,8}S$ (*а*): *1* – без магнитного поля; *2* – в поле H = 8 кЭ. Температурные зависимости сопротивления (ρ(H) – ρ(0)) / ρ(0) в магнитном поле (*б*): *1* – эксперимент; *2* – теоретические расчеты функции (1) с параметрами T_c = 500 К, $T_{c,Mn}$ = 420 К, $T_{c,Gd}$ = 320 К

Fig. 1. (*a*) – Electrical resistivity $Gd_{0,2}Mn_{0,8}S$ without geomagnetic field (*1*) and in the field H = 8 кЭ (*2*). (*b*) – temperature dependence of resistance (ρ(H) – ρ(0)) / ρ(0) in the geomagnetic field: (*1*) – experimental procedure, (*2*) – theoretical evaluation of functional relation (1) with parameters T_c = 500 К, $T_{c,Mn}$ = 420 К, $T_{c,Gd}$ = 320 К

Ниже 250 К решетка начинает сжиматься, и сопротивление увеличивается. Возможно, это связано со структурными искажениями кристаллической решетки. Максимум магнитосопротивления наблюдается в области перехода в магнитоупорядоченное состояние и асимптотически исчезает при понижении температуры. Одна из возможных причин этого максимума связана с фазовым расслоением и образованием ферронов в антиферромагнитной матрице, что объясняет рост магнитной восприимчивости при понижении температуры. Магнитосопротивление обнаруживается также и на вольт-амперных характеристиках, измеренных при комнатной температуре без поля и в магнитном поле H = 8 кЭ (рис. 2). С ростом тока магнитосопротивление проходит через максимум и при токе в 1 мА и электрическом напряжении около 1 В резко уменьшается.

Для объяснения экспериментальных результатов предположим, что электрон с иона гадолиния туннелирует в 3*d*-зону ближайших ионов марганца и на ионах марганца и гадолиния возникает орбитальное упорядочение. Спин-орбитальное взаимодействие в марганцевой подсистеме обусловлено электронным допированием и снятием вырождения в t_{2g}-подзоне за счет внутриатомного взаимодействия. Изменение симметрии электронной плотности на катионе модифицирует фононные моды колебаний октаэдра, расщепление которых вблизи границы зоны Бриллюэна приводит к изменению величин диэлектрической проницаемости и к поляризации областей в окрестности интерфейса ионов Mn–Gd.

При x = 0,2 ионы гадолиния протекают по решетке. В этом случае можно выделить две подсистемы марганца и гадолиния, которые в области интерфейса Mn–Gd имеют поляризационные заряды с векторами поляризаций P_1, P_2, связанными между собой через орбитальные степени свободы электрона, $M_L[P_1, P_2]$. В результате существуют две вырожденные спирали с правым и левым вращением с направлениями орбитального момента, отличающимися по знаку. Магнитное поле снимает вырождение по направлению вектора поляризации ($M_L[P_1, P_2]$ и $-M_L[P_2, P_1]$) и увеличивает результирующее электрическое поле в образце. В итоге дно зоны проводимости смещается относительно химпотенциала. Таким образом, изменение сопротивления в магнитном поле можно записать в виде

$$\frac{(\rho(H)-\rho(0))}{\rho(0)} = \exp\left(\frac{M_L[P_1,P_2]}{M_{0L}P_0^2}\frac{\Delta E}{k_B T}\right)-1 =$$

$$= \exp\left[\left(1-\frac{T}{T_c}\right)^{0,3} PP\frac{\Delta E}{k_B T}\right]-1,$$

$$PP = (1 - T/T_{c,\mathrm{Mn}})^{0,3}, \qquad (1)$$

где M_L – орбитальная намагниченность; P_0 – вектор поляризации; $T_{c,\mathrm{Mn}}$, $T_{c,\mathrm{Gd}}$ – критические температуры исчезновения поляризации в марганцевой и гадолиниевой подсистемах; T_c – критическая температура образования орбитального порядка. Экспериментальные данные по магнитосопротивлению, приведенные на рис. 1, удовлетворительно описываются уравнением (1) со следующими параметрами: T_c = 500 К, $T_{c,\mathrm{Mn}}$ = 420 К, $T_{c,\mathrm{Gd}}$ = 320 К, ΔE = 13 мэВ.

В рамках данной модели также можно описать зависимость магнитосопротивления от напряженности электрического поля, которое стремится повернуть векторы поляризации по полю, а эффективное взаимодействие с орбитальным моментом этому противодействует. В больших полях направления векторов поляризаций совпадают, и связь магнитной и электрической подсистем исчезает. Это можно проиллюстрировать на простой модели с энергией $AM_L[P_1, P_2] + E(P_1 + P_2)$. Для ортогональной конфигурации полей ($H \perp E$) выражение $AM_L(P_{ix}P_{2y} - P_{1y}P_{2x}) + E(P_{1y} + P_{2y})$ имеет минимум при

$$\sin\varphi = -\frac{E}{4M_L P_0 A} + \sqrt{\frac{E^2}{16M_L^2 P_0^2 A^2}+1}. \qquad (2)$$

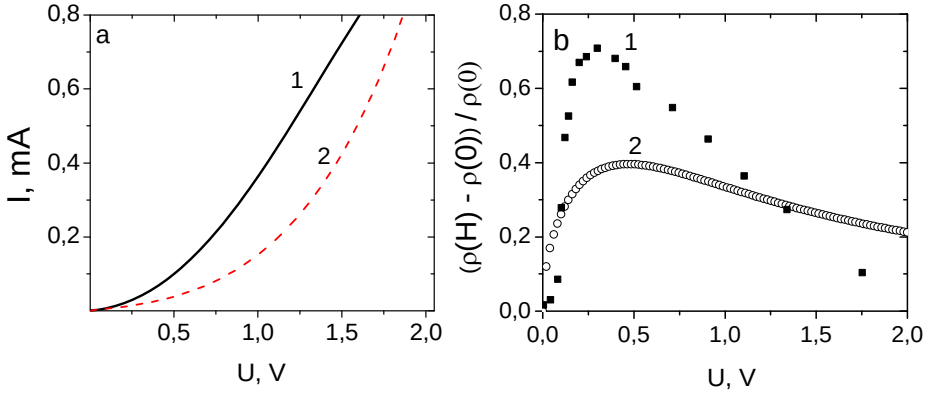


Рис. 2. Зависимость тока от напряжения в магнитных полях H = 8 кЭ (*1*) и H = 0 (*2*) (*а*); экспериментальная зависимость электросопротивления в магнитном поле H = 8 кЭ от электрического напряжения при комнатной температуре для x = 0,2 (1) и теоретические расчеты по формуле (2) с параметрами m_L = 0,06 А/м, P_0 = 0,02 Кл/м^2, A = 1000 м^3/(Кл·А) (*2*) (*б*)

Fig.2. (*a*) – Current dependence from voltage pattern in the geomagnetic fields H; (*b*) – Experimental dependence of electrical resistence in the geomagnetic field H = 8 kЭ from electrical voltage at room temperature for x = 0.2 (1) and theoretical predictions by formula (*2*) with parametric variables m_L = = 0.06 А/м, P_0 = 0.02 Кл/м2, A = 1000 м3/(Кл·А) (*2*)

Зависимость магнитосопротивления от напряженности электрического поля определяется углом φ:

$$\frac{\left(\rho(H)-\rho(0)\right)}{\rho(0)}=\exp\left(\sin\varphi\sqrt{1-\sin^2\varphi}\,\frac{\Delta E}{k_B T}\right). \qquad (3)$$

В формуле (2) A – параметр взаимодействия между орбитальным моментом и вектором поляризации, $E = U/d$ – напряженность электрического поля. Скос подрешеток векторов поляризации уменьшается с ростом электрического поля. При угле π/2 магнитосопротивление достигает максимума. При дальнейшем повороте векторов по электрическому полю связь между орбитальным моментом и электрическим диполем уменьшается. Соответственно, падает и магнитосопротивление. Теоретически вычисленная полевая зависимость магнитосопротивления, приведенная на рис. 2, качественно согласуется с экспериментальной.

Экспериментальные результаты и их обсуждение для $Gd_{0,2}Mn_{0,8}Se$. Твердые растворы $Gd_xMn_{1-x}Se$ (x = 0,2) получены методом твердофазной реакции, описанной в работе [14], из порошков исходных соединений в вакуумированных кварцевых ампулах в однозонной печи сопротивления.

Определение фазового состава и кристаллической структуры образцов $Gd_xMn_{1-x}Se$ проведено при 300 К на рентгеновской установке ДРОН-3 с использованием CuK_α-излучения. Данные рентгеноструктурного анализа показали, что синтезированные соединения обладают гранецентрированной кубической (ГЦК) структурой типа NaCl, типичной для моноселенида марганца. С увеличением степени катионного замещения (x) параметр элементарной ячейки a увеличивается от a = 0,544 нм для MnSe до a = 0,552 нм для $Gd_{0,2}Mn_{0,8}Se$ в соответствии с возрастанием ионного радиуса замещающего элемента (r = 0,83 Å для Mn, r = 0,94 Å для Gd). Исследуемые соединения с концентрацией замещения x = 0,2 являются антиферромагнетиками с температурой Нееля (T_N) = 80 К и парамагнитной температурой Θ, имеющей отрицательное значение и убывающей по абсолютной величине относительно исходного соединения (–350 К для x = 0 до –86 К для x = 0,2), что свидетельствует об увеличении ферромагнитных корреляций с ростом концентрации гадолиния [14]. Усиление ферромагнитных корреляций подтверждается изменениями в поведении удельного электросопротивления и магнитосопротивления.

Измерение удельного электросопротивления было проведено четырехзондовым методом в нулевом и магнитном поле 13 кЭ, направленным перпендикулярно току. Результаты электрических измерений представлены на рис. 3. Поведение температурной зависимости удельного электросопротивления для образца $Gd_{0,2}Mn_{0,8}Se$ указывает на полупроводниковый характер проводимости, аналогично MnSe [10]. По наклону прямолинейной части зависимости $\log\rho(1/T)$ определена ширина запрещенной зоны ΔE, которая составляет ~0,3 эВ и в магнитном поле не меняется. Сопротивление образца уменьшается по сравнению с электросопротивлением моноселенида марганца, также как и в MnS ионами гадолиния. Следует отметить, что при T < 250 К удельное электросопротивление практически не зависит от температуры. При дальнейшем увеличении температуры наблюдается экспоненциальное уменьшение сопротивления. Магнитосопротивление $\delta = (\rho(H) - \rho(0)) / \rho(0)$ в $Gd_xMn_{1-x}Se$ с концентрацией замещения x = 0,2 меняет знак с ростом температуры при T = 320 К. При этой температуре наблюдается широкий гистерезис вольт-амперной характеристики.

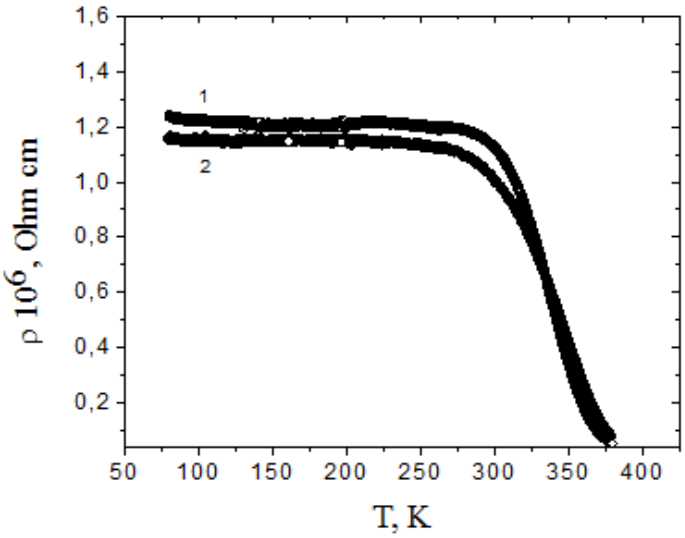


Рис. 3. Температурные зависимости электросопротивления в нулевом магнитном поле (*1*) и поле 13 кЭ (*2*) системы $Gd_xMn_{1-x}Se$ с x = 0,2

Fig. 3. Temperature dependence of electrical resistivity in zero geomagnetic field (*1)* and in field 13 кЭ (*2*) of the system $Gd_xMn_{1-x}Se$ с x = 0.2

Наличие отрицательного магнитосопротивления подтверждается вольт-амперными характеристики (ВАХ) (рис. 4) поликристаллического образца $Gd_{0,2}Mn_{0,8}Se$ в магнитных полях $H = 0$ и $H = 13$ кЭ. В магнитном поле гистерезис уменьшается. Замещение двухвалентного иона марганца трехвалентным ионом гадолиния приводит к перераспределению электронной плотности между t_{2g}-состояниями Mn^{2+} и Gd^{3+} и e_g-состояниями. В результате сильных электронных корреляций на ближайших ионах марганца и на ионах гадолиния возникает орбитальное упорядочение. Ионы гадолиния протекают по решетке и имеют орбитальное упорядочение ферромагнитного типа, которое разбивается на домены. На интерфейсе Mn–Gd существует сильное спин-орбитальное взаимодействие типа Рашбы [15]. В гадолиниевой подсистеме орбитальный магнитный момент ($<L^z>$) на ионе поляризует электроны проводимости по спину, что приводит к расщеплению спектра электронных возбуждений на интерфейсе на величину $2\lambda < L^z > \sigma$, где λ – параметр спин-орбитального взаимодействия 5*d*-электронов, σ – спин электрона проводимости. В магнитном поле домены с ориентацией орбитального момента против поля исчезают, и плотность доменов с угловыми моментами по полю растет. Это приводит к усилению тока проводимости $U_{\delta max} = 40$ В, $U(dI/dU = \max) = 50$ В для $T = 80$ К. Внешнее электрическое поле за счет кулоновского взаимодействия приводит к изменению импульса электрона, повороту вектора магнитного момента и к слиянию доменов. Этим процессом обусловлен гистерезис ВАХ.

Магнитосопротивление $\delta = (\rho(H) - \rho(0)) / \rho(0)$ зависит от внешнего электрического поля, и наблюдается максимум по абсолютной величине до 200 К. Для некоторых температур $\delta(H)$ представлено на рис. 5. Значения напряжений, при которых магнитосопротивление и производная dI/dU достигают максимумов, близки по значению. Так, $U_{\delta max} = 40$ В, $U(dI/dU = \max) = 50$ В для $T = 80$ К, $U_{\delta max} = 88$ В, $U(dI/dU = \max) = 74$ В для $T = 160$ К, $U_{\delta max} = 184$ В, $U(dI/dU = \max) = 184$ В для $T = 200$ К. Максимальные значения достигаются при изменении доменной структуры. В магнитоупорядоченной области уменьшение сопротивления в магнитном поле достигает 30–40 %. Это связано с образованием ферромагнитных областей (ферронов) в антиферромагнитной матрице. В магнитном поле размер феррона увеличивается, ширина потенциального барьера между ферронами уменьшается и подвижность носителей тока растет.

Смена знака магнитосопротивления вызвана снятием вырождения по направлению импульса электрона и его спина, т. е. величина расщепления в электронном спектре возбуждений по спину в модели Рашбы порядка тепловой энергии kT. Рост сопротивления в магнитном поле связан с уменьшением подвижности носителей тока в подсистеме ионов гадолиния в результате орбитального упорядочения электронов [4].

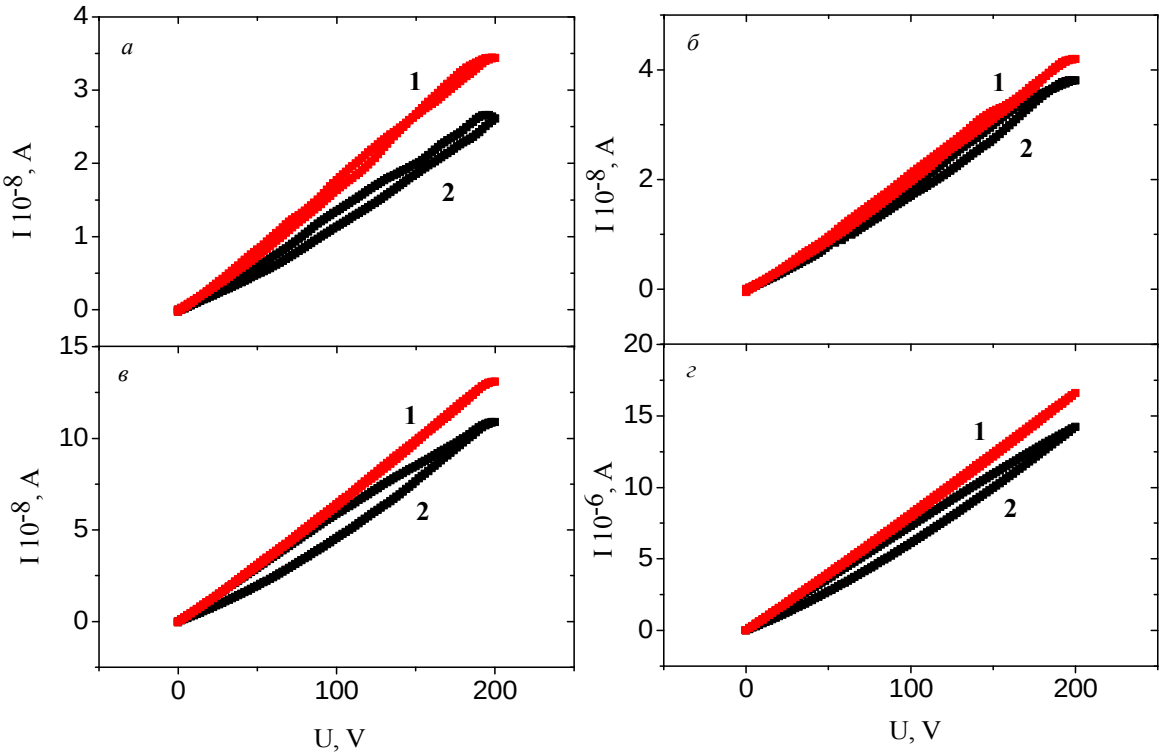


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики, измеренные в магнитном поле $H = 13$ кЭ (*1*) и нулевом поле $H = 0$ (*2*) образца $Gd_{0,2}Mn_{0,8}Se$ при $T = 80$ К (*а*), 160 К (*б*), 200 К (*в*), 280 К (*г*)

Fig. 4. Volt-ampere characteristics measured in geomagnetic field $H = 13$ кЭ (*1*) and zero geomagnetic field $H = 0$ (*2*) of the sample $Gd_{0.2}Mn_{0.8}Se$ under $T = 80$ К (*a*), 160 К (*b*), 200 К (*c*), 280 К (*d*)

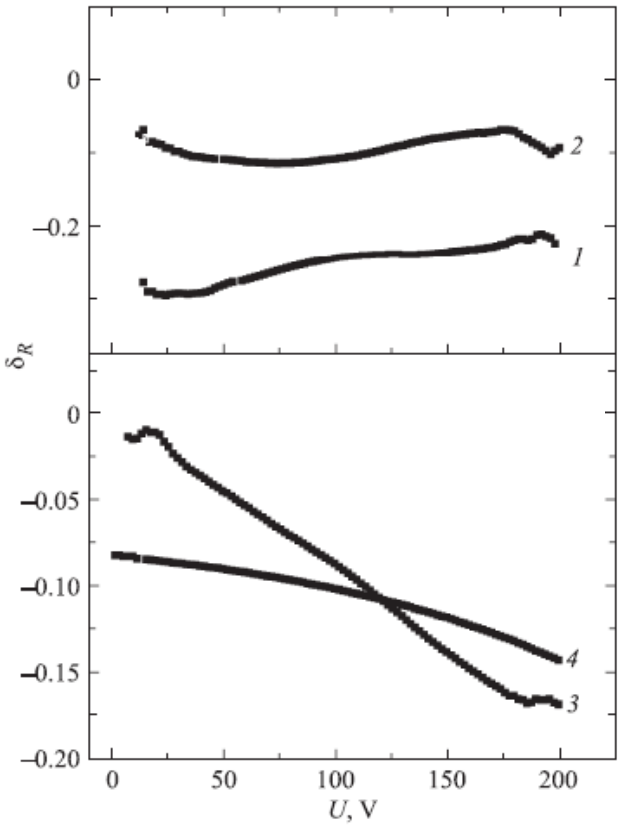


Рис. 5. Зависимость магнитосопротивления от напряжения, измеренная при T = 80 К (*1*), T = 160 К (*2*), T = 200 К (*3*), T = 280 К (*4*) для образца $Gd_{0,2}Mn_{0,8}Se$

Fig. 5. Magnetoresistance dependence from voltage pattern measured under T = 80 K (*1*), T = 160 K (*2*), T = 200 K (*3*), T = 280 K (*4*) for the sample $Gd_{0.2}Mn_{0.8}Se$

Заключение. В настоящей работе в твердых растворах $Gd_xMn_{1-x}S$ для состава с x = 0,2 найдено магнитосопротивление при температурах, в несколько раз превышающих температуру перехода в магнитоупорядоченное состояние. Также обнаружен полупроводниковый тип проводимости с небольшим минимумом в области высоких температур. Рост сопротивления и увеличение энергии активации в магнитном поле обусловлены увеличением в нем корреляций орбитальных магнитных моментов. Взаимодействие орбитально упорядоченных электронов с модами колебаний октаэдров приводит к электрической поляризации и к зависимости магнитосопротивления от внешнего электрического поля. Из вольт-амперной характеристики найден максимум магнитосопротивления как по току, так и по напряжению.

В твердых растворах $Gd_xMn_{1-x}Se$ с x = 0,2 на основе селенида марганца обнаружено уменьшение сопротивления в магнитном поле ниже T = 320 К. При высоких температурах сопротивление растет в магнитном поле. Экспериментальные данные объясняются образованием орбитального упорядочения и спин-орбитальным взаимодействием в модели Рашбы на интерфейсе ионов гадолиния и марганца. Обнаружен гистерезис в вольт-амперной характеристике, причиной которого является наличие орбитальных магнитных доменов и зависимость импульса электрона от спиновой поляризации.

Библиографические ссылки

1. Аплеснин С. С. Основы спинтроники. СПб. : Лань, 2010. 283 с.

2. The interrelation of magnetic and dielectric properties of $Co_xMn_{1-x}S$ solid solutions / S. S. Aplesnin [et al.] // J. Phys.: Condens. Matter. 2010. Vol. 22. P. 226006.

3. Metal-semiconductor transition in $Sm_xMn_{1-x}S$ solid solutions / S. S. Aplesnin [et al.] // J. Phys. Status Solidi (b). 2012. Vol. 249. P. 812.

4. Peters R., Kawakami N. Orbital order, metal-insulator transition, and magnetoresistance effect in the two-orbital Hubbard model // Phys. Rev. B. 2011. Vol. 83. P. 125110.

5. Волков Н. В. Спинтроника: магнитные туннельные структуры на основе манганитов // УФН. 2012. Vol. 182. P. 263.

6. Resistivity and 1/f noise in non-metallic phase separated manganites / A. L. Rakhmanov [et al.] // Phys. Rev. B. 2001. Vol. 63. P. 174424.

7. Doped orbitally ordered systems: Possible mechanism for phase separation / K. I. Kugel [et al.] // Phys. Rev. B. 2008. Vol. 78. P. 155113.

8. Gadolinium doped europium sulfide / S. Kar [et al.] // Am. Chem. Soc. 2010. Vol. 132. P. 13960.

9. Аплеснин С. С., Ситников М. Н. Магнитотранспортные эффекты в парамагнитном состоянии в $Gd_xMn_{1-x}S$ // ЖЭТФ. 2014. Т. 100. С. 104–110.

10. Магниторезистивные свойства твердых растворов $MnSe_{1-x}Te_x$ / С. С. Аплеснин [и др.] // ФТТ. 2007. Vol. 49. P. 1984.

11. Физические свойства халькогенидов редкоземельных элементов / А. В. Голубков [и др.]. Л. : Наука, 1973. 304 с.

12. Magnetic Properties and the Metal-insulator transition in $Gd_xMn_{1-x}S$ solid solutions / O. B. Romanova [et al.] // Sol. State Comm. 2010. Vol. 150. P. 602.

13. Magnetic and thermophysical properties of $Gd_xMn_{1-x}S$ solid solutions / S. S. Aplesnin [et al.] // J. Phys.: Cond. Matt. 2013. Vol. 25. P. 025802.

14. Crystal Structure and Magnetic Properties of $Mn_{1-x}Gd_xSe$ Solid Solutions / S. S. Aplesnin [et al.] // Acta physica polonica A. 2015. Vol. 127. P. 371.

15. Рашба Э. И. Свойства полупроводников с петлей экстремумов // ФТТ. 1960. Vol. 2. P. 1224.

References

1. Aplesnin S. S. *Osnovy spintroniki* [Basics of spintronics]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2010, 283 p.

2. Aplesnin S. S., Bandurina O. N., Romanova O. B., Ryabinkina L. I., Balaev A. D., Eremin E. V. The interrelation of magnetic and dielectric properties of $Co_xMn_{1-x}S$ solid solutions. *J. Phys.: Condens. Matter.* 2010, Vol. 22, P. 226006.

3. Aplesnin S. S., Romanova O. B., Kharkov A. M., Balaev D. A., Gorev M. V., Vorotinov A. M., Sokolov V. V., Pichugin A. Yu. Metal-semiconductor transition in $Sm_xMn_{1-x}S$ solid solutions. *J. Phys. Status Solidi (b).* 2012, Vol. 249, P. 812.

4. Peters R., Kawakami N. Orbital order, metal-insulator transition, and magnetoresistance effect in the two-orbital Hubbard model. *Phys. Rev. B*. 2011, Vol. 83, P. 125110.

5. Volkov N. V. [Spintronics: magnetic tunnel structures based on manganites]. *UFN*, 2012, Vol. 182, P. 263 (In Russ).

6. Rakhmanov A. L., Kugel K. I., Blanter Ya. M., Kagan M. Yu. Resistivity and 1/f noise in non-metallic phase separated manganites. *Phys. Rev. B.* 2001, Vol. 63, P. 174424.

7. Kugel K. I., Rakhmanov A. L., Sboychakov A. O., Khomskii D. I. Doped orbitally ordered systems: Possible mechanism for phase separation. *Phys. Rev. B.* 2008, Vol. 78, P. 155113.

8. Kar S., Boncher W. L., Olszewski D., Dollahon N., Ash R. Stoll S. Gadolinium doped europium sulfide. *Am. Chem. Soc.* 2010, Vol. 132, P. 13960.

9. Aplesnin S. S., Sitnikov M. N. [Magnetotransport effects in the ferromagnetic state in $Gd_xMn_{1-x}S$]. *ZhETF.* 2014, Vol. 100, P. 104–110 (In Russ.).

10. Aplesnin S. S., Ryabinkina L. I., Romanova O. B., Balaev A. D., Demidenko O. F., Yanushkevich K. I., Miroshnichenko [Magnetoresistance properties of solid solutions $MnSe_{1-x}Te_x$]. *FTT.* 2007, Vol. 49, P. 1984 (In Russ.).

11. Golubkov A. V., Goncharova E. V., Zhuze V. P., Loginov G. M., Sergeeva V. M., Smirnov I. A. [Physical properties of rare earth chalcogenides]. Leningrad, Nauka Publ., 1973, 304 p. (In Russ.).

12. Romanova O. B., Ryabinkina L. I., Sokolov V. V., Pichugin A. Yu., Velikanov D. A., Balaev D. A., Galyas A. I., Demidenko O. F., Makovetskii G. I., Yanushkevich K. I. Magnetic Properties and the Metal-insulator transition in $Gd_xMn_{1-x}S$ solid solutions. *Sol. State Comm.* 2010, Vol. 150, P. 602.

13. Aplesnin S. S., Romanova O. B., Gorev M. V., Velikanov D. A., Gamzatov A. G., Aliev A. M. Magnetic and thermophysical properties of $Gd_xMn_{1-x}S$ solid solutions. *J. Phys.: Cond. Matt.* 2013, Vol. 25, P. 025802.

14. Aplesnin S. S., Galyas A. I., Demidenko O. F., Makovetskii G. I., Panasevich A., Yanushkevich K. I. Crystal Structure and Magnetic Properties of Mn1-xGdxSe Solid Solutions. *Acta physica polonica A.* 2015, Vol. 127, P. 371.

15. Rashba E. I. [Properties of semiconductors with a loop of extremums]. *FTT.* 1960, Vol. 2, P. 1224 (In Russ.).

© Харьков А. М., Ситников М. Н.,
Масюгин А. Н., 2017

Раздел
Part
4

ЭКОНОМИКА

ECONOMICS AEROSPACE INDUSTRY

UDK 332.146.2

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 442–451

METHODS AND FORMS OF STATE SUPPORT OF INNOVATIVE ACTIVITIES IN THE REGION (ON THE EXAMPLE OF KRASNOYARSK REGION)

N. T. Avramchikova*, D. O. Volkov, L. N. Zakharova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: avr-777@yandex.ru

The article is devoted to the problem of state support for innovative activities in the region. The authors considered the direct and indirect methods of the state support for the innovative activities at the regional level and their implementation. The article identifies the background of the state innovation policy and the direction of their manifestations – social and financial. The authors conduct the assessment of innovative development of Krasnoyarsk region, the main causes of low innovative activities and underdevelopment of the innovation sector in Krasnoyarsk region and define measures of state support to enterprises and organizations of the regional state administration. The article represents the analysis of the structure of budget expenditures of Krasnoyarsk region, aimed at the state support of the innovative activity in 2016.

The work emphasizes on the project implementation of children's Technopark, implemented in the framework of the Federal target program of education development for 2016–2020 and focused on priority directions of technological development of Krasnoyarsk region, taking into account the implementation in the region of the National Technology Initiative (NTI). The authors noted that to solve the problem of qualified personnel training in Krasnoyarsk region Flagship University was created, which is the basis for technology entrepreneurs aimed at creating shots for advanced technologies. At the conclusion of the study, the authors draw attention to the deterrent factors of innovative development of enterprises in Krasnoyarsk region and concluded that to ensure the competitiveness and efficiency of the regional economy it is necessary to develop the mechanism of interaction of state regulation of innovation activities at both the regional and Federal levels.

Keywords: innovation activity by of region (лучше regional innovation activity), state support, forms and methods of state support, expenses of the regional budget for state support of innovation activities.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 442–451

МЕТОДЫ И ФОРМЫ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПОДДЕРЖКИ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В РЕГИОНЕ (НА ПРИМЕРЕ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ)

Н. Т. Аврамчикова*, Д. О. Волков, Л. Н. Захарова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: avr-777@yandex.ru

Представлена актуальная проблема – государственная поддержка инновационной деятельности в регионе. Рассмотрены прямые и косвенные методы государственной поддержки инновационной деятельности на региональном уровне и формы их реализации. Определены предпосылки формирования государственной инновационной политики и направления их проявления – общественные и финансовые. Сделана оценка уровня инновационного развития Красноярского края, выделены основные причины низкой инновационной активности и слаборазвитости инновационной сферы в Красноярском крае и определены меры государственной поддержки, оказываемые предприятиям и организациям краевыми органами государственного управления. Проведен анализ структуры расходов бюджета Красноярского края, направленных на государственную поддержку инновационной деятельности в крае в 2016 году. Подчеркнута необходимость реализации проекта детского технопарка, реализуемого в рамках Федеральной целевой программы развития образования на 2016–2020 годы и ориентированного на приоритетные направления технологического развития Красноярского края с учетом реализации в регионе Национальной технологической инициативы. Отмечено, что для решения проблемы подготовки высококвалифицированных кадров в Красноярском крае создан опорный университет, который является базой для развития технологического предпринимательства, ориентированной на создание кадров для передовых технологий. В заключение исследования указаны сдерживающие факторы инновационного развития предприятий в Красноярском крае и сделан вывод о том, что для обеспечения конкурентоспособности и повышения

эффективности экономики региона необходимо выработать механизм взаимодействия государственного регулирования инновационной деятельности как на региональном, так и на федеральном уровнях.

Ключевые слова: инновационная деятельность региона, государственная поддержка, формы и методы государственной поддержки, расходы бюджета края на государственную поддержку инновационной деятельности региона.

Introduction. Turning innovation into the dominant factor of world economic development takes place in a wide range of national economic systems and has reflected in the formation of the specific country's innovative mechanisms. Differences in national innovation systems involve different roles the state regulation of innovative processes [1].

A characteristic feature of the Russian economy is a significant gap between the sectors in the technological development and its potential in terms of innovation, which leads to the necessity for the state to support innovative activity, including the regional level. It is possible to identify a few numbers of features that make up the specifications of state support models and state regulation of innovation:

– a combination of direct and indirect methods;

– inclusion of innovation programs in the General economic strategy or development of special projects;

– the formation of specialized state structures;

– the degree of independence of economic entities in questions of innovative development;

– the degree of departmental "concentrations" of solutions for the development and implementation of the state innovation policy and others.

High level of development of innovative activity of the region determines the level of its socio-economic development which is the main factor of competitiveness that demonstrates effective using of human potential, which is the basis for the development of the "new economy".

Now the priority direction which economic develop of regions of Russia is to increase the efficiency of innovation sphere [2]. Krasnoyarsk Territory, as the party of the Russian Federation is positioned as a resource area, which is considered to be a fast payback of an investment in the diversified economy of the region that enables the development of innovative technologies in many sectors.

Theoretical approaches to definition of the methods and forms of state support at the regional level. Under the state support of innovative activity as an economic category means the the coordination of economic processes as a set of measures emanating from the state institutes and determined at the formation and development of innovation activities [1; 2].

In the broader sense, government support can be understood as a specific form of state activity to maintain a proper level of development of a business entity, developing a certain social institution. Innovation depends on the knowledge, skills and creativity of the working people. The government plays an important role in creating better conditions for innovation, and developing a significant range of public goods that are necessary for a dynamic and innovative knowledge-based economy, including a strong science, engineering and technology base, incentives for knowledge transfer and high educational standards.

The role of the state in innovation is manifested in its functions, aiming at the regulation of all processes which taken a place in the innovation sphere [3]. You should distinguish between "methods" and "forms" of government support, as the first is characterized by a set of measures and actions, and the second is their process. Research conducted in the sphere of state regulation of innovative activities at the regional level have helped to clarify and complement concepts of form and method of state support of innovative development of the region.

The method of state support for innovative activity is a set of methods, operations and actions focused at creating favorable conditions for innovative development of priority industries in the regional economy. Distinguished methods of direct and indirect state support. Methods of *direct state support* are:

– financing and co-financing Research and development working and innovation projects from the budget;

– protection of the rights of the subjects of innovative activity;

– creation of unified standards of evaluation of innovative projects at the Federal level;

– creation and development of innovative infrastructure;

– development of insurance facilities in the innovation sphere (IS);

– formation of the innovative market;

– creation and development of innovative-technological centers (ITC);

– creation and development of innovative-industrial complexes (IIC);

– elaboration of instruments for moral support;

– preparation of the innovative staff.

Currently in seven economic regions of Russia there are 11 main educational institutions for the training of relevant professionals. They have a modern scientific-methodical support of educational process and is necessary for training highly qualified specialists, material and technical base.

The value of indirect methods of state support for innovation is determined by the lower budget than direct financing, they can cover a much greater range of innovation agents. Methods of *indirect state support* are:

– preferential taxation of subjects of innovative activities;

– concessional lending;

– state support of financial leasing;

– state support of franchising;

– support of small and medium innovative entrepreneurship;

– state insurance risk (venture) business.

– increasing the investment attractiveness for private investors.

A form of state support for innovative activity is the system means the organizing of method and its implementation by which the state ensures the development of priority industries in the regional economy.

In the nearest the main task will be the transition from a mobilization to an innovative type of society, i. e. a society with attitudes to change, development, improvement and empowerment of human influence on social and economic processes. In the future for Russia seems inevitable combination of active (generating) the type of innovative development based on the production and sales in the world markets its own innovative developments, and simulation based on the development and adaptation of foreign innovations, their progressive integration into the own innovation system [4].

Innovation policy is the development of strategy of innovating, the selecting of directions, forming of state support targeted at all stages of the innovation process, linking the various areas of public policy. Background the active state innovative policy are manifested in two areas – public and financial background.

Public premises are the combination of interests of state and business. Enterprises have a desire to have a stable extraction of super-profits due to the monopoly possession of scientific and technological achievements. Government intervention to prevent the desire of economic entities to be in conflict with the interests of society and state intervention in the sphere of innovation avoids the use of R&d undertaken by enterprises of different ownership forms. There is a need for the state scale, balanced innovation policy in all sectors of the economy. Narrow interference promotes the "shift" in the formation of the sectoral structure of the economy.

The financial conditions include the financing of the non-commercial sector. A research activity may not generate income and carried out on a commercial basis. Is the implementation of innovations in non-commercial sector of the economy: basic research, innovative update of the state management, defence and law enforcement and environmental projects. Neither the population nor businesses are unable to fully take the update of this sector, because private businesses are not able to accumulate sufficient funds to implement large-scale innovation.

The reason is that the innovation process is becoming increasingly capital-intensive and R & d is becoming costlier. To entrust the business with full responsibility for the development of innovations that determine competitiveness, efficiency and security of the entire national economy and the country as a whole, it would be reckless and dangerous. Furthermore, innovative activities involve different types of risks. Therefore, entrepreneurs require significant external incentives to encourage the implementation of innovative project that is offered by the state through various methods of support [5].

The increasing cost of innovative products and services makes them inaccessible to the mass consumer. The absence of external support, effective demand for innovative products can slow and even stop the growth of innovation. The important role played by protectionist policies, and established transfer mechanism of scientific and technical developments created in the public sector, including the military-industrial complex, the private sector. International scientific and technical cooperation, effective and mutually beneficial, is possible only with the help of the state. Mandatory state support of small innovative companies with limited access to credit.

The rating of innovative development of economy of Krasnoyarsk Territory. According to the results of annual evaluations carried out by the experts of the leading Russian organizations that use an integrated approach to the assessment of innovative development of regions of the Russian Federation (the Association of innovative regions of Russia, national research University "Higher school of Economics" (NRU "HSE"), etc.), Krasnoyarsk Territory over the past two years significantly strengthened its position in the rankings. The rating of innovative development of economy of regions of the Russian Federation, carried out by the experts and the analysts HSE is based on indicators that characterize the socio-economic conditions of innovative activity in the region, scientific-technical potential of the region and the level of innovation activity of enterprises. The formation of the ratings is taken into account the quality of regional innovation policy. According to the rating of constituent entities of the Russian Federation on the value of the Russian regional innovation index (RII) Krasnoyarsk territory in 2013 was in the second group and took the 12th place among 83 regions, rising in the ranking in comparison with 2012 by 4 lines [6]. Improving the position of the region has been driven mainly by the increase of innovative activity of organizations and the increasing cost of technological innovation (24 979.5 million rubles in 2012 to 84 718.5 million rubles in 2014) and by increasing the quality of innovation policy. However, there was a significant weakening of the indicators of financial and human resources in science as compared to 2012, and relative to the average in the Russian Federation in 2013.

In 2014, Krasnoyarsk region has retained a strong position, and entrenched in 12th place in the rating of innovative development, showing equal development of all four thematic blocks RII and describing different aspects of complex innovation processes. Key factors in the development of the region in 2014 was the involvement of enterprises in innovative processes and scale of investment in technological innovation (about 72 % of investments attracted to the development of innovation, aimed at creating innovative technological processes).

Krasnoyarsk Territory in 2014 has significantly improved the level of development of scientific-technical potential. Positive dynamics is caused by growth of indicators as the capability of research and development, and their effectiveness (coefficient of publication activity, the number of advanced manufacturing technologies developed in the region, per million people economically active population of the region). However, the values of indicators that characterize the innovative activity and the effectiveness of innovative activity of the organizations has decreased in comparison with 2013, while remaining above the national average.

It should also be noted that in recent years, in the Krasnoyarsk Territory cost the regional budget on science and innovation increasing steadily, however the specific

weight of budget funds in total expenditure on technological innovation (in organizations of industrial production) are negligible (less than 0.1 %). In addition, the scheme of territorial planning of Krasnoyarsk Territory, the zones (areas) priority development of innovative activities does not envisage.

According to the rating of innovative regions, developed by the Association of innovative regions of Russia (AIRR) collaboratively with the Ministry of economic development of the Russian Federation with the participation of representatives of regional authorities and leading experts of the country in 2015, Krasnoyarsk region occupied the 19th position among other regions of Russia which belongs to the group of "strong medium innovators".

In 2016, the region climbed 11th position in the ranking and for the first time, the group moved to the "strong innovators" (8th place) [7]. Mainly to the significant strengthening of the position of the Krasnoyarsk Territory in 2016 was due to the increase in the specific weight of small enterprises engaged in technological innovation and the proportion of expenditure on technological innovations in total volume of shipped goods and performed works.

In addition, the region is among leaders according to the criteria of participation and winnings in competitions held by Federal Executive authorities and development institutions, conducting public innovative activities, the number of applications filed to international patent cooperation treaty.

The index of innovation development of the Krasnoyarsk Territory in 2016 exceeded 140 % of the national average level. All these factors indicate increased efficiency of regional policy and creating a favorable investment climate in the Krasnoyarsk Territory.

Analysis of methods and forms of state support of innovation activity in the Krasnoyarsk Territory. Against the background of positive dynamics in the development of innovative and competitive advantages noted by experts, the region now has a number of weaknesses, constraints on the development of innovative activity in the Krasnoyarsk Territory. The main reasons for low innovative activity and underdeveloped sector of innovation in the Krasnoyarsk region [8]:

– lack of demand for innovations and innovative products within the framework of implementation of state programs and investment projects, as well as in the framework of the implementation of the state order;

– lack of interest of large enterprises and entrepreneurs invest in innovation low innovative activity due to the resulting barriers to distribution in the economy of new technologies, industry regulation, certification procedures, customs and tax administration;

– lack of trained personnel for hi-tech sectors of the regional economy, reduction of employment in research and development, low level of involvement of youth in scientific-technical activities, the decline in the prestige of working professions;

– lack of incentives for development innovative activity, of the lack of sufficient level of competition, the desire of the business community to go for quick profits, the low level of interaction of business and government in the formation and implementation of innovation policy;

– reorientation of the regional economy on commodity markets, the very low level of receptivity of companies to new technological solutions, the dominance of backward technological structures in most industrial and agricultural enterprises, focusing on the search for technical solutions, not to create them, which causes technological dependence;

– an acute shortage of private investment in research and development (R & d), lack of involvement in the innovative development of the region, both large and small and medium-sized businesses, the lack of instruments of integration of R & d in the economic activity of enterprises, regional investment projects and programs;

– insufficient level of cooperation of scientific and educational complex and innovative system of the region.

These weak points significantly impede the development of the region and hinder the transition of economy to new technological methods.

The solution to this problem depends on the realization of the regional authorities, of effective policies, including the development of instruments of state support of innovation activities. Law of the Krasnoyarsk Territory of 01.12.2011 № 13-6629 "About scientific, scientific-technical and innovative activities in the Krasnoyarsk Territory" established the following basic forms of state support to innovative activities [9]:

– provision of privileges on payment of taxes;

– the provision of educational services;

– providing informational support;

– providing consulting support, assistance in developing project documentation;

– the formation of demand for innovative products;

– financial support (including subsidies, grants, credits, loans, guarantees, capital contributions);

– export support.

Basic measures of state support of subjects of scientific, scientific-technical and innovation activity provided by the regional legislation presented in tabl. 1.

State support of innovative activity in the region is carried out within the budgetary appropriations provided in the regional budget for the implementation of the long-term target programs (implementation of the long-term target programmes were implemented until 2014) and state programs of the Krasnoyarsk Territory (implemented from 2014 to the present).

Dynamics of public expenditures aimed at supporting and developing innovative activities in the total expenditures of the regional budget in 2013–2017 are presented in tabl. 2.

The conducted research shows the reduction in funds allocated from the regional budget to the innovative activity support in the region in 2016 in comparison to the forecasted value of 2017. Fig. 1 presents the costs of the regional budget on support and development of innovation dynamics.

Table 1

The main measures of state support for innovation activities in the Krasnoyarsk Region

The name of the subject – recipient of state support	Rendered measures of state support
Subjects of scientific, scientific-technical and innovative activities, in addition to associations: providing for the establishment and operation of technoparks, industrial (industrial) parks, engineering centers, business incubators, venture funds and seed funds	a) placement of orders for scientific-technical products, the results of innovative activities by the order of the legislation; b) the provision of business incubators, technoparks, industrial (industrial) parks, engineering centres in the use or lease of the premises in the prescribed manner; c) the provision of business incubators, technoparks, industrial (industrial) parks, engineering centers, entities of scientific-technical and innovation activities of information, consulting and methodological services in the manner prescribed by applicable law; d) subsidies from the regional budget: – for reimbursement of expenses related to the implementation of innovative projects, including to commercialization of scientific and technical developments, the acquisition (creation) of production equipment and (or) objects of real estate for production purposes; – reimbursement of expenses on vocational training and additional professional education in the field of innovation
Organization: providing for the establishment and operation of technoparks, industrial parks, engineering centers and business incubators	a) subsidies at the expense of the regional budget for reimbursement of expenses associated with the provision of Advisory, information, accounting, legal and other services and services for lease on favorable terms areas of scientific, scientific-technical and innovative activity, implementing innovative projects; b) budget investment in the creation, development and maintenance of activity of objects of innovative infrastructure
Venture capital funds and funds of seed investments	Subsidies for the formation of property contributions for the purchase of shares of closed-end mutual funds

Table 2

Dynamics of expenses of the regional budget on support and development of innovative activities in 2012–2017

The expenses of the regional budget	2012	2013	2014	2015	2016	2017 forecast
The total budget expenditures, bln	145.5	173.8	176.1	184.9	212.1	204.8
The volume of budget expenditures on the support and development of innovative activities, mln rub	374.3	421.4	583.1	505.4	412.0	302.1
The share of budget expenditures to support the development and innovation activities in the total budget expenditures, %	0.26	0.24	0.33	0.27	0.20	0.15

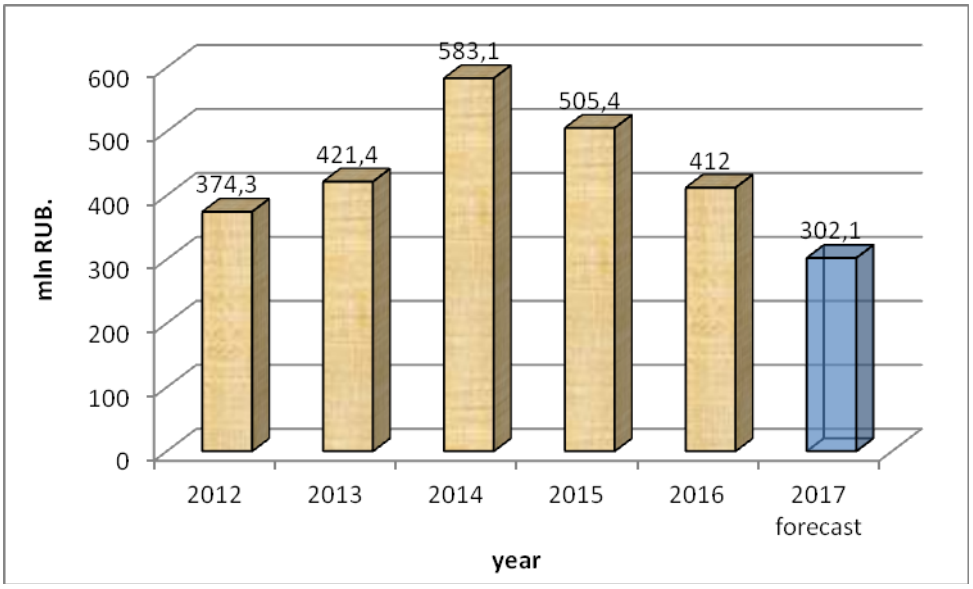


Fig. 1. The expenses of the regional budget on development of innovative activity in 2012–2016, mln rub

Reduction of expenses of the regional budget to support innovative activities in 2016–2017, was done primarily due to the completion of construction of the first starting complex of the Industrial Park in CATE Zheleznogorsk. To the project on construction of Industrial Park in 2012 was allotted 84.9 million rubles from the regional budget, in 2013 116.2 million rubles, in 2014 and 2015 – 319.3 and 230.4 million rubles. In 2016 the Government of Krasnoyarsk region allocated funded 49.4 million rubles for the development of Industrial Park [10]. The main purpose of the implementation of the activities of the Industrial Park was to develop an advanced infrastructure to meet the needs of small and medium enterprises in the industrial, administrative and laboratory space, as well as the services necessary for the development and implementation of new technologies and products.

In addition, the budget expenditure in 2016 compared with the previous period decreased due to the fact that from 2013 to 2015 was funded the total amount of 127.7 million rubles (in 2013 – 77.0 million rubles; in 2014 – 24.1 million rubles; in 2015 – 26.6 million rubles) to the regional budget for the creation of regional engineering centres for small and medium-sized businesses.

At the expense of the regional budget and attracted co-financing from the Federal budget, with the support of the Ministry of economic development of the Russian Federation in the Krasnoyarsk region in 2014–2015 on the basis of regional state Autonomous institution "Krasnoyarsk regional innovative-technological business-incubator" ("KRITBI") was established with 3 regional engineering centres (REC) – "Polymeric composite materials and technologies", "Mining and metallurgical technologies", "Biotechnology and deep processing of vegetative raw materials". The main purpose of RCI is to assist small and medium-sized enterprises, research centres in realizing their technological and analytical developments – from the initial stage to the finished product by providing consulting, engineering services, and design services. In addition, the activities of RTSI is aimed at increasing the technology readiness level for small and medium enterprises through the development (design) of technological and technical processes and to ensure the solution of designing, engineering, and technological and organizational innovation tasks of technology companies at different stages of development. In 2016 on the development of the RTSI from the regional budget has been 8.9 million rubles.

The main funds from the regional budget is allotted annually to support activities of regional state Autonomous institution "Krasnoyarsk regional innovative-technological business-incubator" ("KRITBI") and "Krasnoyarsk regional Fund of support of scientific and scientific-technical activity" ("Regional Fund of science"), providing state support to subjects of innovative activities. Tabl. 3 presents the costs of the regional budget for the support activities of "KRITBI" and "Regional Fund of science" in 2012–2016.

Fig. 2 presents the dynamics costs of the regional budget for the support activities of "KRITBI" and "Regional Fund of science" in 2012–2016.

Table 3

Expenditures of the budget of Krasnoyarsk region to support activities of "KRITBI" and "Regional Fund of science" in 2012–2016 (million rubles)

	2012	2013	2014	2015	2016
"Krasnoyarsk regional innovative-technological business-incubator"	149.5	150.7	148.1	144.9	135.6
"Krasnoyarsk regional Fund of support of scientific and scientific-technical activity"	132.7	69.2	69.7	70.0	110.0

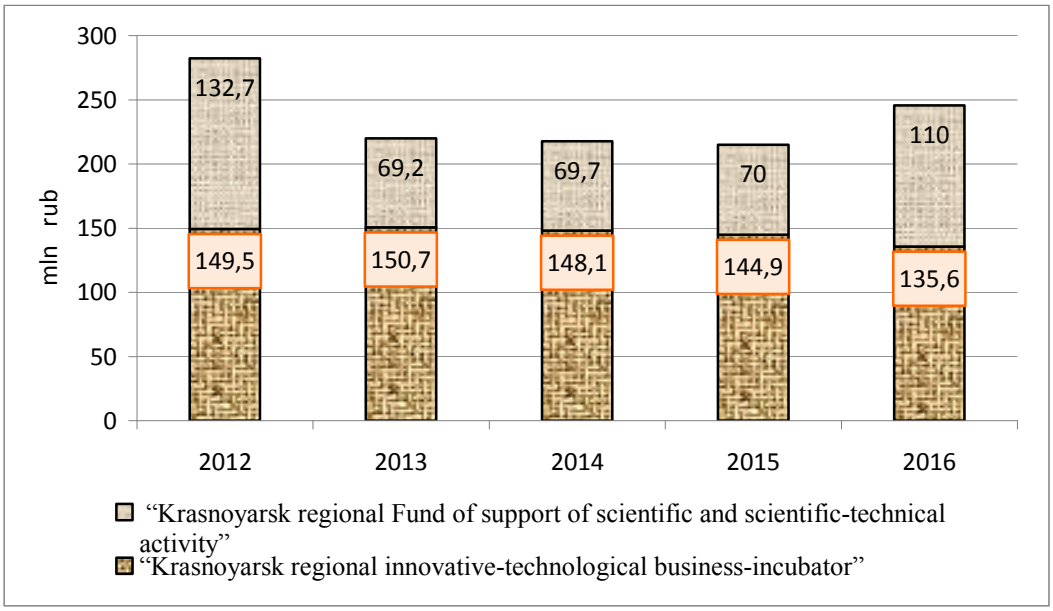


Fig. 2. The expenses of the Expenditures of the budget of Krasnoyarsk region to support activities of "KRITBI" and "Regional Fund of science" in 2012–2016 (million rubles)

"KRITBI" operates in order to create a favorable business environment for development of small and medium technology entrepreneurship target at the scientific, scientific-technical and innovative potential in solving problems of socio-economic development of the region. For its residents "KRITBI" provides: "smart office" (areas, office equipment, training rooms, meeting rooms), provides services prototyping services in support of projects, accounting and legal services, organizational and PR support. Residents of "KRITBI" in 2017 are about 60 high-tech companies [11].

Since 2012, "KRITBI" is the official representative of Fund of assistance in the development of small forms of enterprises in scientific-technical sphere (Fund of assistance to innovation). During this time, the support of the Fund for the promotion of innovation received 207 people in the contest "Clever", 47 companies in the competition "Start" of 6 companies under the program "Development. Export" and 20 companies in the competition "Commercialization". In 2015–2016, budget was more than 300 million. In addition, thanks to the Fund support, the residents ' projects were involved 688.5 million rubles of private investment.

"Krasnoyarsk regional Fund of support of scientific and scientific-technical activities" provides state support on a competitive basis, popular scientific and scientific-technical development aimed at socio-economic development of Krasnoyarsk region.

In 2016, were held 11 competitions targets at supporting applied research, to promote science and attract young people to scientific and technological research to the stage of implementation. Total funding volumes for the tenders amounted to 184.9 million rubles, including – 95.1 million rubles from means of the regional budget. In the framework of the competitions held in 2016 (jointly with the Russian Foundation for basic Research and Russian Humanitarian Scientific Fund, where the amount of co-financing Funds is 70 million rubles), in the region 1032 submitted bids totaling 739.01 million rub; attracted co-financing from the applicant organizations, customers of scientific and technological products and Federal development institutions in supported projects and activities with amount of 91.327 million rub; supported 311 projects and activities from the 39 applicant organizations (subjects of scientific, scientific-technical and innovative activities).

Analysis of the structure of expenditures of the regional budget for state to support of innovation activities. Analysis of the structure of expenditures of the regional budget directed on the state support of innovative activity in 2016 is presented in the fig. 3.

The results show that a significant portion of the regional budget of 12.25 % (50 million) targeted in 2016 for reimbursement of expenses related to the creation and support of the Krasnoyarsk nanotechnology center, established by the Government of the Krasnoyarsk Territory together with the Fund for infrastructure and educational programs JSC "RUSNANO" in 2016 [12]. The main tasks of Krasnoyarsk nanotechnology center are to support basic research, provide access to the specialized equipment for applied research, training for high-tech industries, the organization of nanotechnological products and the development of infrastructure of nanoindustry. In the framework of project activities of the nanocenter cooperates with leading research institutions, educational organizations and enterprises of the region [13].

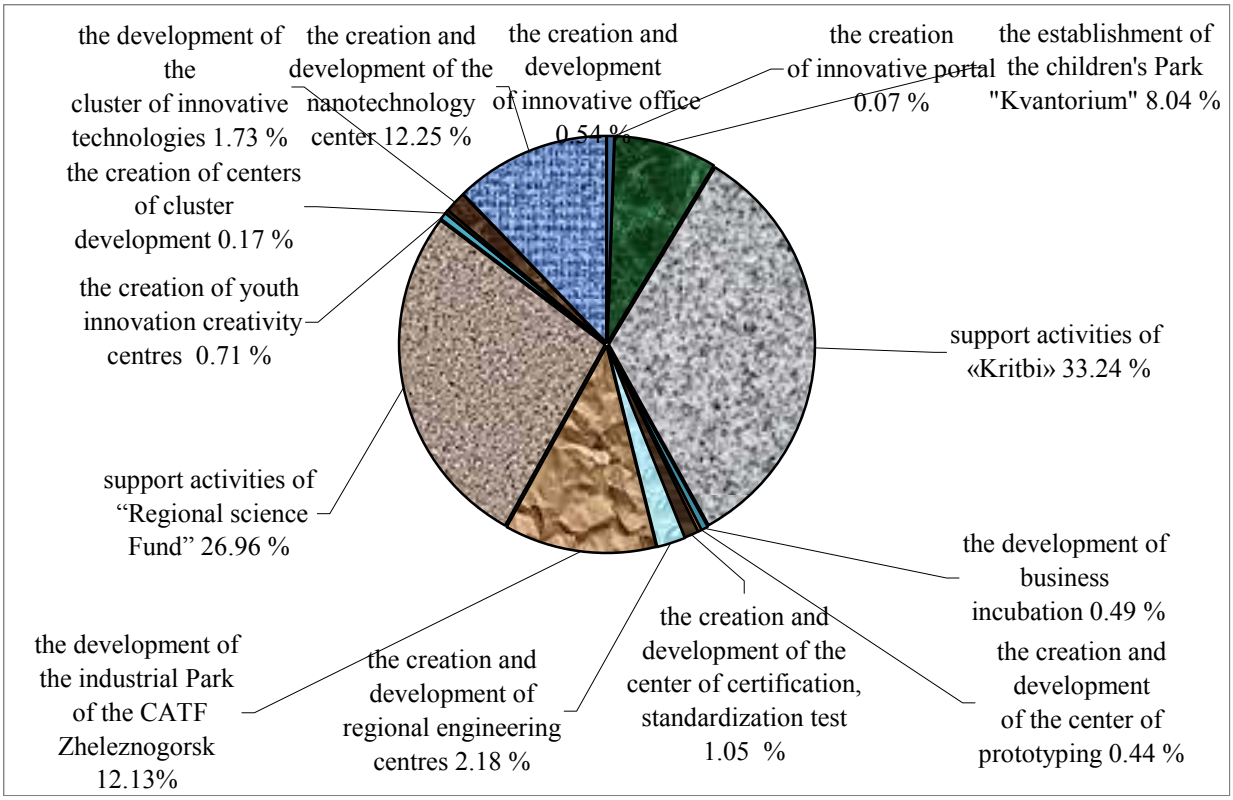


Fig. 3. The structure of expenditures of the regional budget directed on the state support of innovative activity in 2016

The amount of 49.4 million rubles (12.13 %) target for the completion of repair work, installation and running of the industries resident in the area of Industrial Park CATF Zheleznogorsk. So for 9 high-tech companies have completed the development of design-estimate documentation and place in an Industrial Park. Also in the area of Industrial Park the work is done on equipment placement, RTSI "Polymer and composite materials and technologies" (REC "PCMT"). However, the process of organizing a branch of "KRITBI" in the city Zheleznogorsk, which will be passed to the equipment RCI "PCMT" on the right of operational management. It is planned that the branch will reach self-sufficiency by the end of 2017 [14].

In the development of scientific and technological creativity and innovative entrepreneurship of young people from the regional budget in 2016 allocated 32.8 million rubles (8.04 % of the total innovation expenditure) on creation of a Technopark in Krasnoyarsk Territory "Kvantorium". In August 2016 Krasnoyarsk Territory was among the 17 territories of the winners of the competitive selection of the Ministry of education and science of the Russian Federation were granted subsidies from the Federal budget on financial provision of activities on creation of a Technopark "Kvantorium". The amount of subsidy provided by the Federal Ministry of education and science in 2016 was 56.3 million. Funds from the regional budget and Federal budget target for the purchase of high-tech equipment for the children's Technopark.

The project of children's Technopark, implemented in the framework of the Federal target program of education development for 2016–2020, focused on priority directions of technological development of the Krasnoyarsk region, taking into account the implementation in the region of the National technology initiative (NTI). Creation of a Technopark involves the formation of a special high-tech laboratories and workshops, interactive Museum, library and lecture hall. The project aims at the development of creative abilities and interest in scientific and technological activities among students, the spread and popularization of scientific knowledge; the creation of conditions for intellectual development and support to gifted children; assistance in professional orientation and the formation of personnel reserve for high-tech industries of economy of the region.

The development of the Cluster of innovative technologies CATF Zheleznogorsk in 2016 allotted 7.0 million rubles. In October 2016 priority project in Krasnoyarsk region Innovation cluster Technopolis "Yenisei" became the winner in the tender and included in the list of participants of the project the Ministry of economic development "innovation clusters – leaders of investment attractiveness of world level". Only on competitive selection of 22 applications were submitted, the results of which selected 11 clusters leaders. The cluster will be assisted in the use of various measures of support from the Ministry of economic development and other agencies and development institutions to ensure the rapid growth on the basis of achievement world level investment attractiveness, development of mechanisms to support entrepreneurial activity and integration into global value chains [15; 16]. To date, the Cluster function 54 high-tech enterprises in the region, including scientific and educational organizations, large and medium-sized companies. The main specialization of the Cluster are space and nuclear technology.

In addition to the financial measures of the support of the Government at the state level of the Krasnoyarsk Region, with participation of ROSATOM state Corporation, developed the concept of creating territories of priority socio-economic development (TPSED) CATF Zheleznogorsk and CATF Zelenogorsk.

Obtaining the status of TPSED will establish a special legal regime of entrepreneurial activities, which are favorable for localization of small and medium business, as well as attracting investment. Residents of TPSED will receive tax and customs privileges within 5 years they will also be exempted from property tax and land tax. In addition, for the residents insurance premiums will also be reduced: from 30.2 to 7.6 % and the rate on the profit tax from 18 % to 5 % in the first five years and 10 % in the next five years.

In order to create demand for innovative products developed a draft decree of the government of Krasnoyarsk Territory "On approving the Procedure for the formation and maintenance of a register of innovation products, manufactured in the Krasnoyarsk Territory". The creation of the Register is to facilitate the formation and development of markets for innovative products (technologies and services) produced in the territory of Krasnoyarsk region.

To solve the problem of staffing high-tech industries in the region in the Krasnoyarsk region in 2015 by combining scientific institutions located on the territory of the region, created by the Federal research centre "of the Krasnoyarsk scientific center SB RAS", and in 2016, created a reference University in Krasnoyarsk region on the basis of "Siberian state aerospace University named academician M. F. Reshetnev" by attaching "Siberian state technological University". Supporting University is a base for technology entrepreneurship aimed at creating shots for advanced technologies [17].

Conclusion. The conducted research concludes that the system of stimulation of innovative activity in modern conditions should be provided with a range of measures, including targeted support for priority directions of innovative activities; creating a favorable economic climate in the region, stimulating interest in the implementation of scientific and technological achievements and investments in fixed capital; legal protection of intellectual property rights.

The tools implemented in the state support of innovative activity in the region, in General, provide the minimum necessary conditions for innovation. However, to ensure the competitiveness of the economy of the Krasnoyarsk territory along with the advanced Russian regions (Republic of Tatarstan, Moscow, Saint-Petersburg, Tomsk, Kaluga region) this is not enough. In the course of the analysis, noted the following major weaknesses implemented by the region of measures of the state support of innovative activity:

1. Weak cooperation of the existing innovative infrastructure (lack of interaction between government, business, science and subjects of infrastructure of support of innovative activity).

2. The lack of direct financing of innovation: the absence of Krasnoyarsk region venture capital Fund, risk-sharing mechanisms between the state and business, lack of direct financial support measures for companies engaged in the production of innovative products; lack of support measures grant funding at the stage of commercialization and serial production – all of this slows down the existing potential for innovative development.

3. The lack of tax and customs privileges and preferences for residents and companies engaged in innovation activities.

4. The territorial imbalance in the development of innovation – concentration of the main high-tech enterprises, scientific organizations and innovation infrastructure in the Central and southern part of the Krasnoyarsk region.

5. A high degree of risk, lack of competition, enabling businesses to implement innovative activities.

6. Insufficient demand for innovative products in the Krasnoyarsk Territory.

Despite the reorientation of higher education to prepare highly qualified personnel for the leading sectors of the economy, there is a lack and outflow of highly qualified personnel.

The analysis of the measures of state support of innovative activities implemented in the Krasnoyarsk region, allowed us to determine the main causes that slow down the development of the region and hinder the development of economy of innovative technologies. Based on the results of the analysis, it is possible to conclude that the bi-directional™ and a sufficient efficiency of state support measures, implemented by the region. To ensure the competitiveness and efficiency of the regional economy it is necessary to develop the mechanism of interaction of state regulation of innovation activities at both the regional and Federal levels.

References

1. Avramchikova N. T., Avramchikov V. M., Antamoshkin A. N. *Upravlenie rasprostraneniem innovatsi v regionalnoi sotsialnoi ekonomicheskoi sisteme.* [Managing diffusion of innovation in regional socio-economic system]. Krasnoyarsk, KrasGAU, 2015, 161 p.

2. Avramchikova N. T., Chistyakova N. O., Firulev O. V. [Innovation networks: problems and prospective (Russian case study)]. *Responsible research and innovation*. Tomsk, TGU, 2016, P. 13–20 (In Russ.).

3. Granberg A. G. *Osnovi rgionalnoi ekonomiki* [Fundamentals of regional economy]. Moscow, NIU VShE, 2006, 495 p.

4. Avramchikova N. T., Avramchikov V. M., Belyakova G. Y., Belyakov S. A. The impact of innovation processes on the life cycle of the economic development of a resource-based region. *Advanced Research in Law and Economics*. 2015, No. 1(11), P. 23–31. DOI: http://dx.doi.org/10.14505/jarle.

5. Vorob'eva I. M. [State support of innovative activity is correct]. *Molodoy ucheniy.* 2015, No. 11, P. 787–789 (In Russ.).

6. *Reyting innovatsionnogo razvitiya sub'ektov Rossiyskoy Federtsii* [The rating of innovative development of subjects of the Russian Federation] (In Russ.). Available at: https://issek.hse.ru/news/185892548.html/ (accessed 17.02.2017).

7. *Reyting innovatsionnikh regionov dlya tselei monitoringa i upravleniya* [Rating of innovative regions for the purposes of monitoring and control] (In Russ.). Available at: http:// regions.org/programs/regions-development/rejting-innovacionnykh-regionov-2015-versija-1-0/ (accessed 17.02.2017).

8. Resolution of the government of Krasnoyarsk region from 25.10. 2011 No. 645-p "On approval of the long-term target program "Development of innovative activity in the Krasnoyarsk territory" for 2012–2014" (In Russ.). Available at: Available at: http://www.zakon.krskstate.ru/doc/7300 (accessed 16.03.2017).

9. RF Federal Law "About scientific, scientific-technical and innovative activity in Krasnoyarsk region" of December 01, No. 13-6629 (In Russ.). Available at: http://www. zakon.krskstate.ru/doc/13366 (accessed 16.03.2017).

10. Resolution of the government of Krasnoyarsk region from 30 09. 2013. No. 505-p "On endorsement of state target program of Krasnoyarsk Region "Development of investment, innovation, small and medium enterprises in the region" (In Russ.). Available at: http://www.zakon.krskstate.ru/doc/16056 (accessed 16.03.2017).

11. The decree of the Governor of Krasnoyarsk Region dated 24.11. 2011 № 218-ug "On approval of the Strategy of innovative development of Krasnoyarsk Region for the period till 2020 "Innovative region – 2020" (In Russ.). Available at: http://www.docs.cntd.ru/document/985024710 (accessed 16.03.2017).

12. RF Federal Law "On the budget of the Krasnoyarsk region in 2017 and the planned period 2018-2019" of Decemder 08, No. 2-195 (In Russ.). Available at: http://www. zakon.krskstate.ru/0/doc/37702 (accessed 16.03.2017).

13. Resolution of the government of Krasnoyarsk region from 07.10 2016 г. No 501-p "On endorsement of state target program of Krasnoyarsk Region "Development and enhancing the global competitiveness of scientific and educational complex and innovation system" (In Russ.). Available at: http://www.zakon.krskstate.ru/0/doc/38416 (accessed 16.03.2017).

14. Avramchikova N. T., Chistyakova N. O. *Perspektivi razvitiya klastera innovatsionnikh tekhnologi ZATO g. Zhleznogorsk Krasnoyarskogo krya* [Prospects of development of cluster of innovative technologies ZATO Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Region]. Krasnoyarsk, SibGAU, 2016, 120 p.

15. Vautrin T. Innovation and Competitiveness clusters Policy in France. *Programme "Competitiveness clusters policy" (France).* Available at: http://proinno.intrasoft.be/index.cfm?fuseaction=wiw.measures&page=detail&ID=8922/ (accessed 01.02.2011).

16. Dohse D. Cluster-Based Technology Policy – The German Experience. *Journal of Industry and Innovation.* 2007, Vol. 14, No. 1, P. 69–94.

17. Resolution of the government of Krasnoyarsk region from 30.09.2013 г. No 508-p "On endorsement of state target program of Krasnoyarsk Region "Development of education" (In Russ.). Available at:

http://www.docs.cntd.ru/document/465806850 (accessed 16.03.2017).

Библиографические ссылки

1. Аврамчикова Н., Аврамчиков В. М., Антамошкин А. Н. Управление распространением инноваций в региональной социально-экономической системе : монография / КрасГАУ. Красноярск, 2015. 161 с.

2. Аврамчикова Н. Т., Чистякова Н. О., Фирулев О. В. Innovation networks: problems and prospective (Russian case study) // Responsible research and innovation : материалы междунар. конф. Томск : ТПУ, 2016. С. 13–20.

3. Гранберг А. Г. Основы региональной экономики. М. : НИУ ВШЭ. 2006. 495 с.

4. Влияние инновационных процессов на жизненный цикл экономического развития ресурсно-ориентированного региона / Н. Т. Аврамчикова [и др.] // Journal of Advanced Research in Law and Economics (ISSN2068696X-Romania-Scopus). 2015. № 1(11). С. 23–31.

5. Воробьева И. М. Государственная поддержка инновационной деятельности // Молодой ученый. 2015. № 11. С. 787–789.

6. Рейтинг инновационного развития субъектов Российской Федерации / под ред. Л. М. Гохберга. М. : НИУ ВШЭ, 2016. Вып. 4. 249 с.

7. Рейтинг инновационных регионов для целей мониторинга и управления / Экспертно-аналитический комитет Ассоциации инновационных регионов России. М. : АИРР, 2017. 67 с.

8. Об утверждении долгосрочной целевой программы «Развитие инновационной деятельности на территории Красноярского края» на 2012–2014 годы : постановление Правительства Красноярского края от 25.10.2011 г. № 645-п [Электронный ресурс]. URL: http://www.zakon.krskstate.ru/doc/7300 (дата обращения: 16.03.2017).

9. О научной, научно-технической и инновационной деятельности в Красноярском крае : Закон Красноярского края от 01.12.2011 г. № 13-6629 [Электронный ресурс]. URL: http://www.zakon.krskstate.ru/doc/13366 (дата обращения: 16.03.2017).

10. Об утверждении государственной программы Красноярского края «Развитие инвестиционной, инновационной деятельности, малого и среднего предпринимательства на территории края : постановление Правительства Красноярского края от 30.09.2013 г. № 505-п [Электронный ресурс]. URL: http://www.zakon.krskstate.ru/doc/16056 (дата обращения: 16.03.2017).

11. Об утверждении Стратегии инновационного развития Красноярского края на период до 2020 года «Инновационный край – 2020 : Указ губернатора Красноярского края от 24.11. 2011 г. № 218-уг [Электронный ресурс]. URL: http://www.docs.cntd.ru/document/985024710 (дата обращения: 16.03.2017).

12. О бюджете Красноярского края на 2017 г. и плановый период 2018–2019 г. : Закон Красноярского края от 08.12.2016 г. № 2-195 [Электронный ресурс]. URL: http://www. zakon.krskstate.ru/0/doc/37702 (дата обращения: 16.03.2017).

13. Об утверждении государственной программы Красноярского края «Развитие и повышение глобальной конкурентоспособности научно-образовательного комплекса и инновационной системы : постановление Правительства Красноярского края от 07.10.2016 г. № 501-п [Электронный ресурс]. URL: http://www.zakon.krskstate.ru/0/doc/38416 (дата обращения: 16.03.2017).

14. Аврамчикова Н. Т., Чистякова Н. О. Перспективы развития кластера инновационных технологий ЗАТО г. Железногорск Красноярского края : монография / СибГАУ. Красноярск, 2016. 120 с.

15. Vautrin T. Innovation and Competitiveness clusters Policy in France. URL: http://www.triplehelixconference.org/th/11/bic/docs/Papers/Dezhina.pdf. (дата обращения: 16.03.2017).

16. Dohse D. Cluster-Based Technology Policy – The German Experience // Industry and Innovation. 2007. Vol. 14, No. 1. P. 69–94.

17. Об утверждении государственной программы Красноярского края «Развитие образования» : постановление Правительства Красноярского края от 30.09.2013 г. № 508-п [Электронный ресурс]. URL: http://www.docs.cntd.ru/document/465806850 (дата обращения: 16.03.2017).

© Avramchikova N. T., Volkov D. O., Zakharova L. N., 2017

УДК 338.45.01

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 452–457

ФАКТОРЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

В. Г. Бревнов

Сибирский государственный университет науки и технологий 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 и его машиностроительные предприятия являются движущей силой экономического развития Российской Федерации. Продолжительное время процессы конверсии обеспечивали распространение инновационных разработок оборонно-промышленного комплекса в гражданские отрасли экономики. Продукция отрасли военного и двойного назначения необходима, прежде всего, для удовлетворения потребностей отечественных вооружённых сил и иностранных заказчиков, развития народного хозяйства. Важнейшим направлением дальнейшего совершенствования отрасли является её устойчивое развитие. В настоящий момент отечественными машиностроительными предприятиями оборонной промышленности реализуется множество крупных проектов, направленных на сохранение темпов устойчивого функционирования и развития отрасли с целью модернизации, выполнения ряда государственных программ. Отечественная оборонная промышленность, безусловно, является одним из лидеров мирового производства профильной продукции, производителем технологий, что подтверждается растущими показателями спроса на номенклатуру вооружений и сопутствующих технологий. В настоящий момент, в период общемировых изменений, прослеживаются тенденции дальнейшего развития отрасли, а именно: изменение объёмов и структуры производства, смена технологических укладов, изменение цен на ресурсы. В то же время оборонные машиностроительные предприятия испытывают ряд трудностей в области управления, маркетинга, финансов и производства. На основе анализа существующих проблем выявлены и сгруппированы важнейшие факторы, оказывающие влияние на деятельность машиностроительных предприятий отрасли. Признаками их классификации выступают: функциональная группа, источник воздействия и его длительность, степень изменчивости, управляемость, направление воздействия на устойчивость. Подобная классификация позволит предложить систему показателей оценки устойчивого развития и функционирования машиностроительных предприятий отрасли. Устойчивое развитие предполагает согласованность не только экономической, но и социальной, а также экологической сфер деятельности предприятия, при этом были выделены экономические, социальные и экологические факторы. Внутри экономической группы факторов выделены управленческие, рыночные, производственные и финансовые подгруппы. Исследованы особенности деятельности машиностроительных предприятий оборонно-промышленного комплекса, что позволяет более эффективно разрабатывать пути решения существующих проблем, обеспечив при этом устойчивое функционирование в краткосрочной и устойчивое развитие в долгосрочной перспективе.

Ключевые слова: инновации, оборонно-промышленный комплекс, устойчивость, устойчивое развитие, машиностроительные предприятия ОПК, факторы устойчивого развития.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 452–457

SUSTAINABLE DEVELOPMENT FACTORS OF MACHINE-BUILDING ENTERPRISES OF MILITARY-INDUSTRIAL COMPLEX

V. G. Brevnov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: Vasiliy.brevnov@mail.ru

Military-industrial complex and its machine-building enterprises are the driving force of the Russian Federation economic development. For a long time, the conversion processes provided the dissemination of innovative developments of the defense industry in the economy civilian sectors. Military products and dual-use industries are necessary, first of all, to meet the needs of the national armed forces and foreign customers, and the development of the national economy. The most important direction for further improvement industry is its sustainable development. At present, the domestic machine-building defense industry enterprises are implementing many large-scale projects aimed at maintaining the pace of sustainable operation and development the industry in order to modernize and implement a number

of state programs. The domestic defense industry is undoubtedly one of the leaders in the global production profile products, a producer of technologies, as evidenced by the growing demand for the armament nomenclature and related technologies. At the moment, during the period of global changes, further development trends of the industry are traced, namely: changes in the volume and production structure, the change in technological structures, and changes in prices for resources. At the same time, defense engineering enterprises face with a number of difficulties in the management, marketing, finance and production areas. On the basis analysis of existing problems, the most important factors influencing the activity machine-building enterprises were identified and grouped. The signs of their classification are the following: a functional group, the source impact and its duration, the degree of variability, controllability, the direction the impact on sustainability. Such a classification will make it possible to propose the indicators system for assessing the sustainable development and functioning of machine-building enterprises in the industry. Sustainable development implies the coherence of not only economic, but also social, as well as, environmental activities of the enterprise, with economic, social and environmental factors highlighted. Within the economic group factors, management, market, production and financial subgroups are identified. The features activity of machine-building enterprises are explored, which makes it possible to develop ways of solving existing problems more effectively while ensuring stable functioning in short-term and sustainable development in the long term.

Keywords: innovations, defense industry complex, stability, sustainable development, machine-building enterprises, factors of sustainable development.

Введение. Оборонно-промышленный комплекс (ОПК) России – совокупность научно-исследовательских, испытательных организаций и производственных предприятий, выполняющих разработку, производство, хранение, постановку на вооружение военной и специальной техники, амуниции, боеприпасов и т. п. преимущественно для государственных силовых структур, а также на экспорт. Он включает органы государственного управления, промышленные предприятия, научные организации, которые занимаются созданием вооружения и военной техники.

По состоянию на 31 декабря 2014 года по данным ЦНИИ «Центр» 81,9 % организаций ОПК составляют машиностроительные предприятия, которые производят около 30 % продукции отечественного машиностроения [1]. При этом самыми инновационно активными секторами ОПК являются авиа- и ракетостроение, радиоэлектроника, судостроение. Основным заказчиком ОПК является государство, госзаказ формирует до 55 % выручки предприятий комплекса. На долю экспорта приходится 32 % выручки. Востребованность продукции отечественных предприятий на международных рынках является показателем её конкурентоспособности. Таким образом, экспорт является одной из важнейших статей доходов отечественных предприятий ОПК.

Установлено, что объёмы экспорта вооружений и сопутствующей техники (ВСТ) нестабильны, зависят от объёма военных расходов и подвержены рискам в силу геополитических изменений [2]. На рисунке представлена динамика военных расходов стран, занимающих первые 5 мест в рейтинге по указанному показателю. США более 50 лет являются лидером по затратам на вооружение и тратят на свой ВПК более 35 % всех мировых затрат в этой отрасли [3]. Россия по объёму военных расходов занимает лишь пятое место в мире после Китая, Саудовской Аравии и Великобритании [4].

В то же время РФ занимает второе место по экспорту вооружений. Согласно докладам SIPRI, за период с 2008 по 2014 год лидером являются США с долей рынка, равной 30 %, второе место занимает Россия – 26 %, затем Германия – 7 %, Франция – 6 % и Китай – 5 % [5].

Тенденции развития предприятий ОПК в Российской Федерации и мире. Одной из важнейших глобальных тенденций является увеличение числа государств, занимающихся экспортом вооружений, и, как следствие, увеличение конкуренции между ними. Эту тенденцию иллюстрирует наращивание Китаем военных расходов. Таким образом, несмотря на лидерские позиции Российской Федерации в качестве экспортёра вооружений, существует риск утраты конкурентных преимуществ ввиду относительно низких военных расходов по сравнению с другими странами. Дело в том, что российские предприятия ОПК до сих пор используют технологический задел советской инженерной школы [6]. Для получения новых технологических разработок необходима соответствующая кадровая политика и стабильное финансирование.

Следующей тенденцией является плавное изменение структуры мирового экспорта продукции ОПК. В табл. 1 представлена структура экспорта ВСТ в мире по состоянию на 2014 год.

Наиболее стабильными сегментами на мировом рынке являются авиационная и вертолётная техника (34 и 14 %), военно-морская техника (11 %). Следует отметить быстрый рост таких сегментов, как беспилотные летательные аппараты (БПЛА) – 2 % и программные средства, радиоэлектроника – 2 %. В структуре экспорта российских предприятий ОПК БПЛА составляют менее 1 %.

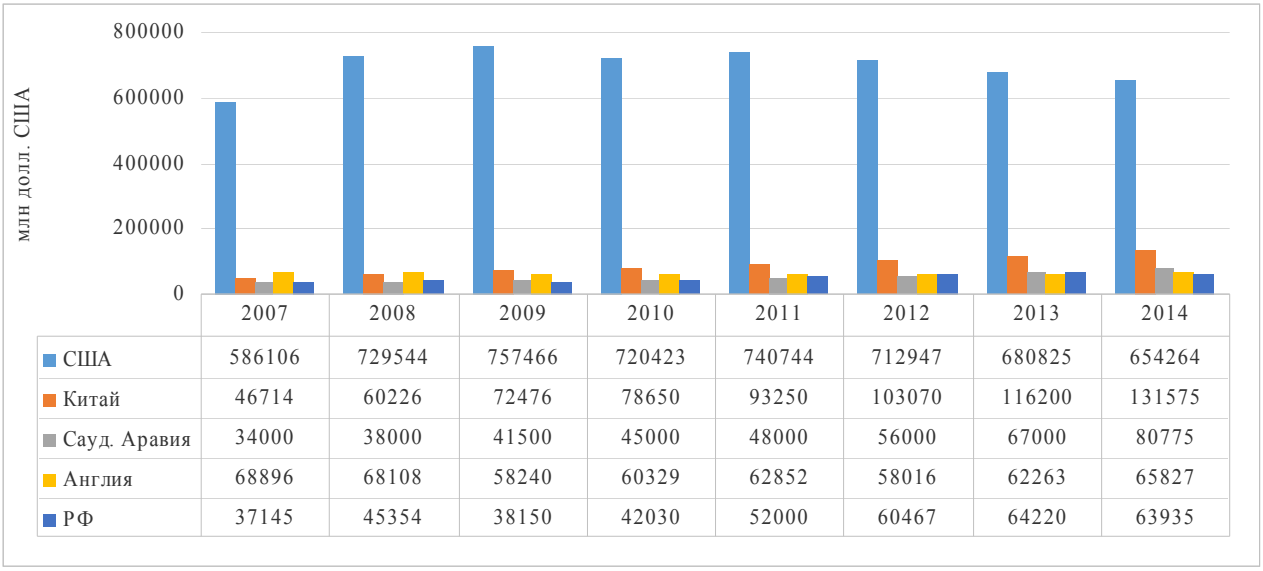
По оценкам Сибирского отделения Российской академии наук (СО РАН) через 25–30 лет шестой технологический уклад станет доминирующим в экономике развитых стран. Оборонно-промышленный комплекс с его научно-исследовательским и производственным потенциалом является основным исполнителем перехода в мировой инновационный процесс. В то же время российский рынок существенно отстаёт по темпам инновационного развития и принципиально недостаточен для окупаемости сложной машиностроительной продукции ввиду падения доходов крупнейших компаний и среднедушевого дохода граждан. Снижение в отраслях машиностроения с 2009

по 2014 гг. по оценкам Strategy Partners составило: станки и инструменты – 16 %, авиакосмическая отрасль – 2 %, мировой ВВП – 1 %, потребительские товары – 1 % [7].

Основным заказчиком продукции ОПК является государство (55 % продукции комплекса). Индекс промышленного производства в отрасли с 2010 по 2015 гг. составил 106,5 %, темп роста инвестиций за период составил 110,1 %. Увеличение индексов произошло в основном за счёт реализации государственных программ. В обобщённом виде тенденции представлены в табл. 2. и сопоставлены со стратегическими последствиями для гражданской экономики.

Следующей тенденцией является углубление институциональных изменений в ОПК. Завершается объединение предприятий отрасли в крупные холдинги [8]. Госзаказ внутри холдингов распределяется неравномерно, часть предприятий испытывает дефицит финансовых ресурсов. В настоящее время актуальным является вопрос поиска альтернативы госзаказу и государственным инвестициям. Как правило, этот вопрос решается путём акционирования части активов.

С 2013 года происходит плавное снижение цен на нефть и полезные ископаемые, что привело к ситуации нарастающего дефицита средств Фонда национального благосостояния (ФНБ) и замораживанию части его проектов. Согласно прогнозам ЦНИИ «Центр» последствия указанного дефицита скажутся на объёмах госзаказа уже в 2017–2018 гг.



Военные расходы (млн долл. США)
Military costs, $ (millions)

Таблица 1

Структура мирового экспорта продукции ОПК

Наименование области	Доля, %
Авиационная техника	34
Вертолётная техника	14
Бронетанковая техника	11
Военно-морская техника	11
Средства ПВО	7
Ракетно-артиллерийское вооружение	5
Беспилотные летательные аппараты	2
Другие типы ВиВТ	16

Таблица 2

Тенденции и стратегические последствия развития российских предприятий ОПК

Тенденции развития ОПК	Стратегические последствия для гражданской экономики
В мире	
Изменчивость объёмов экспорта ВТС [3]	Неполная загрузка мощностей предприятий, стагнация мирового рынка гражданского машиностроения [7]
Доминирование 6-го технологического уклада в экономике развитых стран [9]	Закрепление за развитыми странами статуса технологических лидеров [9]
Высокая волатильность цен на нефть	Нестабильность оборонных бюджетов стран – экспортёров нефти
В России	
Незначительный рост объемов экспорта российской продукции военного назначения [7]	Увеличение загрузки производственных мощностей предприятий

Окончание табл. 2

Тенденции развития ОПК	Стратегические последствия для гражданской экономики
Рост объемов производства и поставок в рамках реализации Государственной программы вооружений (ГПВ) на 2016–2020 гг. и аналогичных последующих перспективных программ	Обеспечение высоких темпов развития, поддерживающих функционирование ОПК, науки и образования, смежных отраслей производства, увеличение глубины переработки сырья внутри страны
Углубление институциональных изменений в ОПК. Территориальная и отраслевая кластеризация с участием предприятий ОПК; образование интегрированных структур по основным направлениям научно-технологического развития ОПК; кризисы [10; 11]	Оптимизация производственных мощностей, совершенствование государственного регулирования деятельности ОПК, развитие социальной и производственной инфраструктуры, стимулирование инвестиций и др.
Снижение цен на нефть и полезные ископаемые	Дефицит бюджета, снижение бюджетных расходов на оборону

Проблемы в деятельности машиностроительных предприятий ОПК на современном этапе. Текущая деятельность машиностроительных предприятий ОПК не лишена ряда существенных проблем. В ходе исследования выполнена систематизация и группировка проблем развития машиностроительных предприятий ОПК по функциональным областям. Первая группа – проблемы управления. Она включает в себя неоптимальную систему критериев отбора при формировании государственного оборонного заказа (ГОЗ), кадровый голод, слабую систему подготовки кадров, низкий процент закрепления молодых специалистов, относительно низкую заработную плату, слабый социальный пакет [9; 12]. Вторая группа включает в себя проблемы маркетинга и сбыта: рынок с небольшим временным горизонтом планирования, отсутствие экономически прогнозируемых условий, санкции носят долгосрочных характер, недостаточная диверсификация (не конверсия) в гражданскую продукцию. До 1980-х годов советская система планирования не предполагала изучение спроса на внешнем и внутреннем рынках для каждого предприятия ОПК. В настоящее время производители комплектующих ориентированы в основном лишь на внутренний рынок и не реализуют потенциал встраивания в международные цепочки и проекты. Третья группа – финансовые проблемы. Среди них – низкая финансовая устойчивость, низкая средняя рентабельность (в ОПК составляет только 6–7 %, тогда как по промышленности в целом – 15,6 %), высокая цена кредитных ресурсов, неоптимальная структура активов, сокращение финансирования гособоронзаказа, исследований, разработок [13]. Четвёртая группа – производственные проблемы: недостаточный уровень инновационности предприятий ОПК, зависимость от поставок иностранных комплектующих и технологического оборудования, физический и моральный износ основных фондов, высокие накладные расходы, низкая производительность труда (в 3–5 раз ниже лидеров на глобальном рынке), производство гражданской продукции не всегда технологически связано с основным производством.

Системность кризиса отечественного ОПК заключается в том, что он затрагивает не одно направление, а весь спектр деятельности отрасли. Десять лет назад основной проблемой было отсутствие необходимого финансирования. В настоящее время к этому добавились кадровый голод, кризис системы планирования и управления разработкой вооружения, недостаточный уровень инновационности предприятий ОПК, их зависимость от поставок иностранных комплектующих, низкая финансовая устойчивость.

Анализ проблем и тенденций развития машиностроительных предприятий ОПК позволил выявить особенности их деятельности.

1. Наличие двух видов производств – военного и гражданского (45 % выпуска предприятий ОПК составляет гражданская продукция). При этом производство военной продукции является приоритетным [13].

2. Значительная часть производств ОПК относится к машиностроению (82 % по данным Минпромторга [14]), которое, в свою очередь, обусловливает техническую возможность диффузии технологических инноваций во все сферы народного хозяйства. Президентом РФ поставлена задача нарастить выпуск высокотехнологичной гражданской продукции.

3. Преобладание наукоёмких производств, поскольку научно-исследовательские программы связаны с космическими исследованиями (более 20 % ОПК составляют научно-производственные предприятия [15]); предприятия ОПК представлены конструкторскими бюро, производственными предприятиями и научно-производственными объединениями. Результатами их деятельности могут быть инновационные проекты: «новшества» либо «инновации» (32 % продукции ОПК является инновационной [15]).

4. Сложный алгоритм планирования, учитывающий случайные объемы доводочных работ по результатам исследований и испытаний продукции; параллельность выполнения ряда работ, многостадийность производственного цикла, технологическая очередность выполнения работ и ограничения по ресурсам.

5. Продукция обладает высокой степенью надёжности, высоким качеством и неразрывно связана с безопасным жизнеобеспечением; часть разработок может быть использована для производства гражданской продукции.

6. Значительная часть предприятий ОПК находится в отдалённых от административных центров районах, что предполагает построение отдельных логистических систем.

7. Предприятия ОПК испытывают сильную зависимость от госзаказа (55 % продукции по данным Минпромторга), государственное регулирование цен на продукцию (государственным заказчиком, как правило, используется принцип «затраты+») [16].

8. Отсутствует либо существенно ограничен публичный доступ к информации о деятельности предприятия и содержанию некоторых инновационных проектов.

Факторы, оказывающие влияние на деятельность машиностроительных предприятий ОПК. На основе анализа наиболее остро стоящих проблем и тенденций развития российского ОПК, его машиностроительных предприятий, выявлены и сгруппированы ключевые факторы, оказывающие влияние на его устойчивое развитие и функционирование, предложена их классификация. Признаками предлагаемой классификации является группировка по функциональным особенностям, источнику и длительности, степени изменчивости и управляемости, направлению воздействия на устойчивость.

Выбор признаков систематизации факторов обусловлен необходимостью учета их влияния на устойчивое развитие предприятия в целом. Анализ группы организационно-управленческих факторов показывает, что невнимание к этой функциональной области способно нивелировать конкурентные преимущества во всех прочих функциональных областях, и, напротив, наличие долгосрочной стратегии способно помочь предприятию выжить даже в случае резкого сжатия рынка и отсутствия государственной поддержки. Следующими по значимости являются производственно-технологические факторы, именно эта группа является определяющей для отечественных предприятий ОПК. Следующими по значимости являются рыночные факторы, которые в большинстве своём являются внешними по отношению к предприятию.

В связи с тем, что устойчивое развитие предполагает согласованность не только экономической, но и социальной и экологической сфер деятельности предприятия, были выделены экономические, социальные и экологические факторы.

Экономическая группа факторов включает наличие платежеспособного спроса, источника финансирования (финансового резерва), готовой инновационной инфраструктуры, государственного регулирования, денежной массы, экономический климат, рациональное планирование, уровень инфляции, величину процентных ставок по кредитам, уровень налогового обременения, включая налоговые и иные льготы, скорость реализации экономических реформ, финансовую и экономическую эффективность компании, качество менеджмента, организационную архитектуру и наличие корпоративной культуры, ёмкость рынков сбыта. Экологическую группу факторов составляют экологическая политика, технология производства и экологическая безопасность. Социальная группа факторов включает социальную государственную и корпоративную политику.

По признаку управляемости факторы делятся на управляемые и неуправляемые. К управляемым факторам относятся: рациональное планирование, наличие платежеспособного спроса, ёмкость рынков сбыта, наличие источника финансирования (финансового резерва), наличие инновационной инфраструктуры, финансовая и экономическая эффективность компании, качество менеджмента, организационная архитектура, наличие корпоративной культуры, экологическая политика, технология производства, экологическая безопасность и социальная корпоративная политика. Неуправляемые факторы включают уровень инфляции, процентную ставку по кредитам, размеры налогового обременения, наличие денежной массы, социальной государственной политики, государственное регулирование, включая налоговые и иные льготы.

Заключение. Таким образом, принимая во внимание всё вышеизложенное**,** целесообразно сделать следующий вывод. В настоящий момент в Российской Федерации, исходя из экономической и геополитической ситуации, Президентом определены направления развития ВСТ, которые включают развитие ядерных сил, средств воздушно-космической обороны, систем связи, БПЛА и станкостроения [15]. Указанные направления носят ярко выраженный инновационный характер. Однако ввиду волатильности цен на нефть финансирование развития ОПК может быть существенно уменьшено. К 2020 году российское правительство планирует завершить модернизацию производственных мощностей ОПК, финансирование в рамках государственных программ будет сокращено и перейдёт на путь балансирования объёмов выпуска военной и высокотехнологичной гражданской продукции. В связи с чем необходимо более активное изучение возможностей устойчивого функционирования и развития машиностроительных предприятий ОПК, совершенствование процессов реализации накопленного инновационного потенциала, факторов устойчивого развития.

Библиографические ссылки

1. Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт судостроительной промышленности «Центр» [Электронный ресурс]. URL: http://www.cniicentr.ru/index.php/ru/funktsii/analiz-i-otsenka-effektivnosti-finansovo-ekonomicheskogo-sostoyaniya-predpriyatij-integrirovannykh-struktur-i-otraslej-opk (дата обращения: 02.01.2017).

2. The SIPRI top 100 arms-producing and military services companies, 2012 SIPRI Fact Sheet January 2014 [Электронный ресурс]. URL: http://books.sipri.org/files/FS/SIPRIFS1401.pdf (дата обращения: 09.01.2017).

3. База данных по мировому экспорту вооружений и военной техники 2008–2016. Центр анализа мировой торговли оружием [Электронный ресурс]. URL: http://www.armstrade.org/pages/main/databases/index.shtml (дата обращения: 05.01.2017).

4. Статистика и анализ мировой торговли оружием : ежегодник [Электронный ресурс]. Москва : ЦАМТО, 2016. URL: http://armstrade.org/files/yearly_2016_1_1.pdf (дата обращения: 05.01.2017).

5. Yearbook Armament, disarmament and international security summary SIPRI, 2016 [Электронный ресурс]. URL: https://www.sipri.org/sites/default/files/YB16-Summary-ENG.pdf (дата обращения: 05.01.2017).

6. Савинова О. В., Мухина Д. А. Экспортные возможности оборонной промышленности Российской Федерации на современном этапе развития // Известия ПГПУ им. В. Г. Белинского. 2012. № 28. С. 509–513.

7. Пути развития машиностроения и ОПК РФ в современных условиях [Электронный ресурс]. URL: http://www.soyuzmash.ru/docs/prez/prez-kop-310316/prez-kop-310316-1.pdf (дата обращения: 08.01.2017).

8. Цветков В. А. Пути повышения эффективности и устойчивости развития оборонно-промышленного комплекса // Вопросы экономического управления в оборонно-промышленном комплексе России – 2015: сб. докладов конф. [Электронный ресурс]. URL:

http://экономикаопк.рф/moderator-sektsii-1-finansovaya-politika-na-predpriyatiyah-opk (дата обращения: 07.01.2017).

9. Соколов А. В. Сравнительная оценка финансово-экономического состояния предприятий оборонной промышленности РФ. Новосибирск : Ин-т ИЭиОПП СО РАН, 2010. 196 с.

10. Латышенок Д. К. Современное состояние оборонно-промышленного комплекса России // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 1. С. 253–260.

11. Фролов А. Л. Импортозамещение в ОПК России: опыт 2014–2016 годов [Электронный ресурс] // Экспорт вооружений. 2016. № 6. URL: http://www.globalaffairs.ru/number/Svoi-vmesto-chuzhikh-18493 (дата обращения: 09.01.2017).

12. Соколов А. В. Анализ финансово-экономического состояния предприятий оборонной промышленности Российской Федерации в 2000–2007 годах // Вестник НГУ. Сер. «Социально-экономические науки». 2009. Т. 9, № 4. С. 33–43.

13. Седов В. С Анализ тенденций развития оборонно-промышленного комплекса России [Электронный ресурс] // Российский экономический портал. URL: http://institutiones.com/general/2381-analiz-tendencij-razvitiya-oborono-promyshlennogo-kompleksa-rossii.html (дата обращения: 08.01.2017).

14. Доклад о целях и задачах Минпромторга на 2015–2016 гг. [Электронный ресурс]. URL: http://minpromtorg.gov.ru/docs/#!doklad_onbspcelyah_inbspzadachah_minpromtorga_rossii_nanbsp2016_god_inbsposnovnyh_rezultatah_deyatelnosti_zanbsp2015_god (дата обращения: 20.01.2017).

15. Центр анализа стратегий и технологий [Электронный ресурс]. URL: http://www.cast.ru. (дата обращения: 10.01.2017).

16. Елисеев О. В. Повышение эффективности выполнения государственного оборонного заказа на основе развития контрактного механизма : дис. … к-та экон. наук. М. : Военный университет, 2014. 225 с.

References

1. Federal state unitary enterprise “Central Research and Development Institute of the Ship-building Industry Center”. Available at: http://www.cniicentr.ru/index.php/ru/funktsii/analiz-i-otsenka-effektivnosti-finansovo-ekonomicheskogo-sostoyaniya-predpriyatij-integrirovannykh-struktur-i-otraslej-opk (accessed 02.01.2017) (In Russ.).

2. The SIPRI top 100 arms-producing and military services companies, 2012 SIPRI Fact Sheet January 2014. Available at: http://books.sipri.org/files/FS/SIPRIFS1401.pdf (accessed 09.01.2017).

3. Database on world export of arms and military equipment 2008–2016 Center of the analysis of world trade by weapon] Available at: http://www.armstrade.org/pages/main/databases/index.shtml (accessed 05.01.2017).

4. Annual Statistics and analysis of world trade by TsAMTO weapon, Moscow 2016. Available at: http://armstrade.org/files/yearly_2016_1_1.pdf (accessed 05.01.2017) (In Russ.).

5. Yearbook Armament, disarmament and international security summary SIPRI, 2016. Available at: https://www.sipri.org/sites/default/files/YB16-Summary-ENG.pdf (accessed 05.01.2017) (In Russ.).

6. Savinova O. V., Mukhina D. A. [Export opportunities of the defensive industry of the Russian Federation at the present stage of development]. *Izvestiya PGPU im. V. G. Belinskogo*. 2012, No. 28, P. 509–513 (In Russ.).

7. Ways of development of mechanical engineering and OPK Russian Federation in modern conditions. Available at: http://www.soyuzmash.ru/docs/prez/prez-kop-310316/prez-kop-310316-1.pdf (accessed 08.01.2017) (In Russ.).

8. Tsvetkov V. A. [Ways of increase in efficiency and stability of development of defense industry complex. *Sbornik dokladov konferentsii “Voprosy ekonomicheskogo upravleniya v oboronno-promyshlennom komplekse Rossii 2015”* [Collection of reports of the “Questions of Economic Management in Defense Industry Complex of Russia 2015” conference] (In Russ.). Available at: http://экономикаопк.рф/moderator-sektsii-1-finansovaya-politika-na-predpriyatiyah-opk (accessed 07.01.2017).

9. Sokolov A. V. *Sravnitel’naya otsenka finansovo-ekonomicheskogo sostoyaniya predpriyatiy oboronnoy promyshlennosti RF* [Comparative assessment of a financial and economic condition of the entities of defense industry of the Russian Federation] Novosibirsk, In-t IEiOPP SO RAN, 2010, 196 p. (In Russ.).

10. Latyshenok D. K. [Current state of defense industry complex of Russia]. *Vestnik SibGAU.* 2015, Vol. 16, No. 1, P. 253–260 (In Russ.).

11. Frolov A. L. [Import substitution in OPK of Russia: experience of 2014-2016]. *Eksport vooruzheniy*. 2016, No. 6 (In Russ.). Available at: http://www. globalaffairs.ru/number/Svoi-vmesto-chuzhikh-18493 (accessed 09.01.2017).

12. Sokolov A. V. [The analysis of a financial and economic condition of the entities of defense industry of the Russian Federation in 2000–2007]. *Vestnik NGU*. 2009, No 9 (4), P. 33–43 (In Russ.).

13. Sedov V. S. [Analysis of tendencies of development of defense industry complex of Russia. Russian economic portal]. *Rossiyskiy ekonomicheskiy portal.* Available at: http://www.soyuzmash.ru/docs/prez/prez-kop-310316/prez-kop-310316-1.pdf (accessed 08.01.2017).

14. *Doklad o tselyakh i zadachakh Minpromtorga na 2015-2016*. [The report on the purposes and tasks of Minpromtorg for 2015–2016] (In Russ.). Available at: http://minpromtorg.gov.ru/docs/#!doklad_onbspcelyah_inbspzadachah_minpromtorga_rossii_nanbsp2016_god_inbsposnovnyh_rezultatah_deyatelnosti_zanbsp2015_god (accessed 20.01.2017).

15. *Tsentr analiza strategiy i tekhnologiy* [Center of the analysis of strategy and technologies] (In Russ.). Available at: http://www.cast.ru (accessed 10.01.2017).

16. Eliseev O. V. *Povyshenie effektivnosti vypolneniya gosudarstvennogo oboronnogo zakaza na osnove razvitiya kontraktnogo mekhanizma* [Increase in efficiency of accomplishment of the state defensive order on the basis of development of the contractual mechanism]. Moscow, FGKVOU VPO “Military university”, 2014, 225 p.

© Бревнов В. Г., 2017

УДК 330.34+ 330.341:338.40

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 458–463

МАТРИЦА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ КАК ИНСТРУМЕНТ ФОРМИРОВАНИЯ АРХИТЕКТУРЫ ИННОВАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ РЕГИОНА

Ю. В. Ерыгин, Е. В. Борисова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: borisovaev2015@mail.ru

Определена роль инновационной инфраструктуры в инновационном развитии регионов, обладающих значительным инновационным потенциалом предприятий оборонно-промышленного комплекса (ОПК).

Проведенный анализ инновационной инфраструктуры регионов, имеющих возможности развития экономики на основе коммерциализации инновационного потенциала предприятий ОПК, позволил определить основные направления ее развития, определяя условия для эффективной реализации региональных инновационных проектов.

Разработан концептуальный подход к формированию инновационной инфраструктуры региона, учитывающий инновационный потенциал территории, характер и условия коммерциализации инновационного потенциала предприятий ОПК, а также специфику их деятельности.

Для реализации предложенного концептуального подхода разработана матрица распределения бизнес-процессов инновационных проектов (РБПИП) региона по объектам инновационной инфраструктуры (матрица РБПИП).

Использование предложенной матрицы РБПИП в рамках одного инновационного проекта позволяет сформировать сетевое взаимодействие заинтересованных в успешной его реализации объектов инновационной инфраструктуры. При осуществлении всей совокупности региональных инновационных проектов матрица позволяет сформировать для каждого объекта инновационной инфраструктуры портфель заказов, состоящий из совокупности бизнес-процессов инновационных проектов региона.

Результаты оценки коммерческой состоятельности объектов инновационной инфраструктуры, реализующих портфели заказов, определяют объекты, которые должны быть сформированы на уровне региона, и бизнес-процессы, которые должны быть переданы за его пределы объектам инновационной инфраструктуры национального и международного уровня.

Таким образом, матрица позволяет сформировать архитектуру инновационной инфраструктуры региона. Сбалансированность объектов региональной инновационной инфраструктуры при этом достигается за счет соответствия бизнес-процессов инновационных проектов объектам инновационной инфраструктуры, как функционирующим в регионе, так и предлагаемым к созданию.

Ключевые слова: *оборонно-промышленный комплекс, инновационный потенциал, коммерциализация, инновационная инфраструктура, инновационный проект, бизнес-процессы.*

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 458–463

THE BUSINESS PROCESSES ALLOCATION MATRIX AS THE INSTRUMENT OF ARCHITECTURE FORMATION OF INNOVATIVE INFRASTRUCTURE IN THE REGION

Yu. V. Erygin, E. V. Borisova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: borisovaev2015@mail.ru

In the article the role of innovative infrastructure in innovative development of regions with a considerable innovative capacity of the enterprises of defense industry complex is defined.

The authors have carried out the analysis of innovative infrastructure of regions which have possibilities of development of economy of the region on the basis of commercialization of innovative capacity of defense industry enterprises. This analysis has allowed to define the main directions of development of economy of the region and to define conditions for effective implementation of regional innovative projects.

The authors have developed the conceptual approach to form the innovative infrastructure of the region. This approach considers the innovative capacity of the territory, character and conditions of commercialization of innovative capacity of defense industry enterprises, and specifics of their activity.

The authors have developed the business processes allocation matrix of innovative projects of the region on objects of innovative infrastructure (the matrix of "RBPIP") for realization of the offered conceptual approach.

In one innovative project use of the offered matrix of "RBPIP" will create network interaction of the objects of innovative infrastructure interested in its successful realization.

The matrix allows building for each object of innovative infrastructure the portfolio of business processes from a set of business processes of innovative projects of the region at implementation of all set of regional innovative projects.

The results of an assessment of a commercial solvency of objects of innovative infrastructure define objects which have to be created in the region at realization of portfolio of business processes.

These results define business processes which are transferred to objects of innovative infrastructure of national and international level.

The business processes allocation matrix of innovative projects allows creating architecture of innovative infrastructure of the region. The balance of objects of regional innovative infrastructure is reached due to compliance of business processes of innovative projects to the objects of innovative infrastructure functioning in the region and offered to creation.

Keywords: defense industry complex, innovative potential, commercialization, innovative infrastructure, innovative project, business processes.

Введение. На современном этапе одним из основных направлений государственной экономической политики России является завоевание лидирующих позиций на мировом рынке на основе использования новейших технологий и разработок.

Ведущую роль в развитии экономики страны на инновационной основе играет оборонно-промышленный комплекс (ОПК), в котором сосредоточен инновационный потенциал предприятий авиационной промышленности, радиоэлектроники, машиностроения и других высокотехнологичных отраслей.

Коммерциализация накопленного инновационного потенциала предприятий ОПК может стать основой развития экономики не только регионов, но и страны в целом, что определяет необходимость его эффективного использования.

В значительной степени инновационному развитию регионов на основе коммерциализации инновационного потенциала предприятий ОПК способствует формирование инновационной инфраструктуры, создающей условия для эффективной реализации региональных инновационных проектов.

На объекты региональной инновационной инфраструктуры могут быть возложены как функции по реализации отдельных бизнес-процессов самого инновационного проекта, так и функции, связанные с продвижением на рынок и финансированием разработок, а также стимулированием инновационной деятельности.

Анализ инновационной инфраструктуры регионов, обладающих значительным инновационным потенциалом предприятий ОПК, позволил сделать вывод об отсутствии соответствия создаваемых объектов инновационной инфраструктуры тем инновационным проектам, которые реализуются на территории. Именно это обстоятельство снижает эффективность функционирования создаваемых в регионах объектов инновационной инфраструктуры.

Другим недостатком инновационной инфраструктуры, создаваемой в регионах, имеющих возможности развития на основе коммерциализации инновационного потенциала предприятий ОПК, является отсутствие взаимодействия создаваемых объектов с объектами национальной и международной инновационной инфраструктуры. Таким образом, инновационная инфраструктура не рассматривается как компонент данных систем.

Кроме того, прослеживается слабая связь объектов инновационной инфраструктуры региона с объектами рыночной и инвестиционно-финансовой инфраструктуры. Сами предприятия ОПК не имеют опыта практической работы на рынках высокотехнологичной продукции и механизмов, связанных с коммерциализацией их инновационного потенциала.

Отсутствие объектов рыночной и финансовой инфраструктуры как в регионе, так и на федеральном уровне существенно снижает экономический потенциал инновационных предприятий, не позволяя привлекать финансовые ресурсы и обеспечивать реализацию высокотехнологичной инновационной продукции на рынке.

Учет вышеназванных недостатков позволяет определить требования к формированию инновационной инфраструктуры в регионе и предусматривает создание рынков, на которых может быть востребована высокотехнологичная продукция гражданского назначения, а также меры по стимулированию спроса и продвижению высокотехнологичной гражданской продукции.

Концептуальный подход к формированию инновационной инфраструктуры в регионе. Для решения сформулированных проблем авторами статьи разработан концептуальный подход к формированию региональной инновационной инфраструктуры, учитывающий инновационный потенциал территории, характер и условия коммерциализации инновационного потенциала предприятий ОПК, а также специфику их деятельности.

Предложенный подход определяет необходимость формирования объектов инновационной инфраструктуры с учетом состава и особенностей реализации инновационных проектов, реализуемых на территории, а также необходимости построения организационного взаимодействия объектов инновационной инфраструктуры.

Важнейшим отличием авторского подхода к формированию инновационной инфраструктуры в регионе [1] является отступление от общепринятого деления инновационного процесса на стадии и предложение

осуществлять декомпозицию инновационного проекта на простые бизнес-процессы, что позволит задействовать существующий в регионе экономический и инновационный потенциал, а также учесть условия реализации бизнес-процессов.

Предложенная декомпозиция инновационных проектов на бизнес-процессы также позволяет обеспечить максимальное вовлечение в их реализацию субъектов хозяйственной деятельности, формирующих инновационную инфраструктуру региона, включая как функционирующие в регионе объекты, так и те ее объекты, которые необходимо создавать для обеспечения эффективности реализации инновационных проектов.

При этом должны быть учтены возможности включения в процесс реализации инновационных проектов объектов инновационной инфраструктуры национального и международного уровней, что свидетельствует о необходимости интеграции региональной инновационной инфраструктуры в национальную и международную инновационную инфраструктуру.

Вышесказанное определяет необходимость рассмотрения инновационной инфраструктуры региона как целевого компонента национальной и международной инновационной инфраструктуры, обеспечивающего создание, финансирование и реализацию инноваций для решения задачи коммерциализации инновационного потенциала предприятий ОПК за счет вовлечения объектов национальной и международной инновационной инфраструктуры в реализацию бизнес-процессов инновационных проектов региона.

Необходимость декомпозиции инновационных проектов на бизнес-процессы также вызвана необходимостью учета специфики деятельности предприятий ОПК, связанной с невозможностью реализации бизнес-процессов в рамках предприятий, поскольку их основной целевой задачей является выполнение государственного оборонного заказа.

Предложенная декомпозиция позволяет выделить неэффективные для предприятий ОПК бизнес-процессы с целью их последующей передачи другим участникам инновационной деятельности, важнейшее место среди которых занимают объекты инновационной инфраструктуры.

Другой особенностью использования потенциала предприятий ОПК, обусловливающей декомпозицию инновационных проектов на бизнес-процессы, является отсутствие необходимости и опыта работы данных предприятий с объектами рыночной и инвестиционно-финансовой инфраструктуры.

Таким образом, предложенная декомпозиция инновационных проектов позволяет передавать бизнес-процессы другим участникам инновационной деятельности, обладающим соответствующими компетенциями для их реализации.

Важнейшим условием эффективного трансфера выделенных бизнес-процессов является достижение условия окупаемости затрат всех участников реализации передаваемых бизнес-процессов, что достигается путем формирования портфелей заказов, состоящих из бизнес-процессов всего множества инновационных проектов, реализуемых на территории.

При несоблюдении данного условия участниками реализации бизнес-процессов могут стать субъекты хозяйственной деятельности, расположенные в других регионах страны и мира.

Матрица РБПИП как метод исследования. В качестве основного методического инструмента, реализующего сформулированные концептуальные положения, авторами предложена матрица распределения бизнес-процессов инновационных проектов региона по объектам инновационной инфраструктуры (матрица РБПИП).

Схематично матрица РБПИП представлена на рисунке и включает в себя перечень реализуемых в регионе бизнес-процессов инновационных проектов, а также существующих и потенциальных участников инновационной деятельности, включая объекты инновационной инфраструктуры.

При этом среди участников инновационной деятельности могут быть не только объекты рыночной и инвестиционно-финансовой инфраструктуры как региона, так и за его пределами, что является отражением задач, которые должны решаться в процессе реализации инновационных проектов.

В качестве параметров матрицы РБПИП по оси абсцисс предложены бизнес-процессы инновационных проектов, реализуемых в регионе на основе инновационного потенциала предприятий ОПК, по оси ординат – инициатор инновационного проекта, объекты инновационной, рыночной, инвестиционно-финансовой инфраструктуры и другие участники, способные выполнить функции по реализации бизнес-процессов [2, с. 9].

В матрице РБПИП приведен общий набор объектов инновационной инфраструктуры, который может корректироваться в зависимости от реализуемых в регионе инновационных проектов.

При реализации одного инновационного проекта построение матрицы РБПИП отражает сетевое взаимодействие объектов инновационной инфраструктуры [3] и позволяет создать единую сеть взаимозависимых объектов, объединенных в различных организационных формах для реализации общего инновационного проекта на основе взаимной заинтересованности в получении конечного результата его реализации.

Отличие предлагаемого механизма построения сетевого взаимодействия от уже существующих [4–15] заключается в том, что в него вовлекаются объекты инвестиционно-финансовой и рыночной инфраструктуры, включение которых в сетевое взаимодействие реализует принцип интеграции инновационной инфраструктуры и позволяет обеспечить формирование спроса на инновационную продукцию, повысить эффективность реализации завершающих стадий инновационного процесса, а также привлечь дополнительные источники финансирования для реализации инновационных проектов.

Выявленный в ходе использования матрицы состав участников реализации бизнес-процессов определенного инновационного проекта не дает представления об инновационной инфраструктуре региона целом, так как в этом случае матрица позволяет определить лишь требования к составу объектов инновационной инфраструктуры, которые необходимы для реализации отдельного инновационного проекта.

Объекты инновационной инфраструктуры	БП 1	БП 2	БП 3	БП 4	БП 5	БП 6	БП 7	БП 8	БП 9	БП10	БП 11	БП 12	БП13
РЦ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
ВТП	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
ТБ, ИАЦ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
ЦМ,В	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
ЦК	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
ЦКИ	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0
ИЦ	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
ИТЦ	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0
ЦТТ	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0
ТП	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
БИ	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ЦКП	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
НОЦ	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ВУЗ	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ИП	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0

Бизнес-процессы инновационного проекта

Матрица РБПИП (разработана авторами):

$БП_{1...n}$ – бизнес-процессы инновационного проекта, реализуемого в регионе; 1 – выполнение бизнес-процесса; 0 – невыполнение бизнес-процесса; БИ – бизнес-инкубаторы; ВУЗ – университеты, прочие образовательные учреждения; ВТП – виртуальные торговые площадки инновационных разработок; ИТЦ – инновационно-технологические центры; РЦ – региональные инновационные центры; ТП – технопарки; ЦКИ – центры коммерциализации инноваций (технологий); ЦТТ – центры трансфера технологий; ЦК – центры консалтинга (центры развития); ЦМ, В – центры маркетинга, деловые центры, ярмарки, инновационные форумы, выставки; ИЦ – инжиниринговые центры; ИАЦ – информационные центры, информационно-аналитические центры; НОЦ – научно-образовательные центры; ЦКП – центры коллективного пользования; ИП – инициатор инновационного проекта, собственник инновационных разработок

Matrix “RBPIP” (developed by the authors):

$BP_{1...n}$ – business processes of the innovative project of the region; 1 – performance of business process; 0 – business process non-performance; BI – business incubators; HED – universities, other educational institutions; VTF – virtual trading floors of innovative developments; ITC – the innovative and technological centers; RIC – regional innovative centers; TP – science and technology parks; CKI – centers of commercialization of innovations (technologies); CTT – centers transfer of technologies; CC – centers of consulting (the centers of development); CM – centers of marketing, business centers, fairs, innovative forums, exhibitions; IC – engineering centers; IC – information centers, information and analysis centers; CSE – scientific and educational centers; CCU – centers of collective use; IP – initiator of the innovative project, the owner of innovative developments

Реализуя всю совокупность инновационных проектов региона, матрица РБПИП позволяет определить совокупность бизнес-процессов инновационных проектов и сформировать из них портфель заказов для каждого объекта инновационной инфраструктуры.

В случае, когда матрица используется в отношении всех потенциальных инновационных проектов, реализуемых на территории региона, она позволяет определить совокупные требования к формированию региональной инновационной инфраструктуры, необходимой для реализации инновационных проектов региона, формируя архитектуру его инновационной инфраструктуры.

Часть бизнес-процессов инновационных проектов могут выполнять инновационные предприятия при наличии у них необходимого экономического потенциала и минимальных затрат, связанных с реализацией бизнес-процессов. Другая часть бизнес-процессов передается объектам инновационной инфраструктуры региона и формирует портфели их заказов.

В случае невозможности реализации бизнес-процессов в регионе принимается решение по расширению функций или созданию в регионе новых объектов инновационной инфраструктуры, а также их перепрофилированию или ликвидации, способствуя повышению эффективности их функционирования. Кроме того, может быть принято решение о передаче функций по реализации бизнес-процессов объектам инновационной инфраструктуры, находящимся за пределами региона.

Передача функций по реализации бизнес-процессов может осуществляться предприятиям ОПК по кооперационным связям интегрированной корпоративной структуры, участниками которой они являются.

Формирование совокупности бизнес-процессов всех реализуемых на территории инновационных проектов, закрепляемых за объектами инновационной инфраструктуры в ходе использования матрицы РБПИП, позволяет по критерию окупаемости затрат, связанных с их реализацией, оценить коммерческую состоятельность объектов инновационной инфраструктуры, реализующих портфели заказов, определить объекты, которые должны быть сформированы на уровне региона, а также бизнес-процессы, которые будут переданы за его пределы объектам инновационной инфраструктуры национального и международного уровня.

Таким образом, использование матрицы РБПИП как инструмента формирования инновационной инфраструктуры имеет 3 главных аспекта:

1. Определение объектов инновационной инфраструктуры, которые должны осуществлять реализацию бизнес-процессов инновационных проектов региона.
2. Определение совокупности бизнес-процессов, подлежащих реализации объектами инновационной инфраструктуры, формируя портфели их заказов.
3. Формирование сетевого взаимодействия объектов инновационной инфраструктуры.

Заключение. Таким образом, предложенная матрица позволяет определить совокупность бизнес-процессов, связанных с реализацией программ инновационного развития территории, закрепленных за объектами инновационной инфраструктуры. После оценки коммерческой эффективности сформированных таким образом портфелей бизнес-процессов может быть сделан вывод о составе участников региональной инновационной инфраструктуры. В итоге обеспечивается сбалансированность региональной инновационной инфраструктуры, достигаемая за счет учета соответствия инновационных бизнес-процессов инновационных проектов объектам инновационной инфраструктуры.

Благодарности. Статья подготовлена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-02-00792.

Acknowledgements. The article is prepared with the financial support by the Russian Federal Property Fund № 17-02-00792.

Библиографические ссылки

1. Ерыгин Ю. В., Борисова Е. В. Концепция формирования инновационной инфраструктуры в регионе, обладающем значительным инновационным потенциалом предприятий ОПК // Российское предпринимательство. 2016. Т. 17, № 18. С. 2283–2300.

2. Борисова Е. В. Матрица распределения бизнес-процессов инновационных проектов как инструмент формирования инновационной инфраструктуры в регионе [Электронный ресурс] // Науковедение : интернет-журнал. 2016. Т. 8, № 4 (35). URL: http://naukovedenie.ru/PDF/77EVN416.pdf (дата обращения: 15.05.2017).

3. Ерыгин Ю. В., Борисова Е. В. Механизм функционирования инновационной инфраструктуры в процессе коммерциализации инновационного потенциала предприятий ОПК // Экономика и менеджмент систем управления. 2016. № 1.2 (19). С. 227–234.

4. Басов Н. В. Сети межорганизационных взаимодействий как основа реализации открытых инноваций // Инновации. 2010. № 7. С. 36–46.

5. Болычев О. Н., Волошенко К. Ю. Межорганизационные сетевые формы взаимодействия как определяющая форма научно-технического инновационного сотрудничества России и Европейского союза в Балтийском регионе // Балтийский регион. 2013. № 4 (18). С. 23–39.

6. Владимирова О. Н. Проблемы формирования и функционирования инновационной инфраструктуры в регионе [Электронный ресурс] // Регионология. 2010. № 2. URL: http://regionsar.ru/ node/504?page=0,0 (дата обращения: 10.05.2017).

7. Дробышевская Л. Н., Кучерук В. А. Оценка эффективности сетевого взаимодействия компаний в регионе // Terra economicus. 2012. Т. 10. № 3, ч. 2. С. 104–109.

8. Евсеев О. С., Коновалова М. Е. Развитие инновационной инфраструктуры в условиях модернизации национальной экономики // Фундаментальные исследования. 2012. № 9, ч. 1. С. 220–224.

9. Конышев О. В. Управление организационно-финансовым взаимодействием участников интегрированных субъектов хозяйствования : автореф. дис. … канд. экон. наук. Орел, 2002. 24 с.

10. Лобок А. М. Сетевое взаимодействие: новый формат или модное название? // Журнал руководителя управления образованием. 2014. № 7. С. 1–8.

11. Неретина Е. А. Типы конфигурации и способы построения межорганизационных сетей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Общественные науки. 2014. Вып. № 2 (30). С. 196–204.

12. Нефедьев А. Д. Инновационная инфраструктура // Креативная экономика. 2011. № 10 (58). С. 42–48.

13. Шерешева М. Ю. Формы сетевого взаимодействия компаний. М. : Изд. дом Гос. ун-та Высшей школы экономики, 2010. 339 с.

14. Smith K. G., Carroll S. J., Ashford S. J. Intraand Interorganizational Cooperation: Toward a research Agenda // Academy of Management Journal. 1995. № 1.

15. Sydow J., Windeler A. Steuerung von und in Netzwerken – Perspektiven, Konzepte, vor allem offene Fragen / (hrsg.) J. Sydow, A. Wmdeler ; Steuerung von Netzwerken. Wiesbaden, 2000. P. 14.

References

1. Erygin Yu. V., Borisova E. V. [The concept of formation of innovative infrastructure in the region having the considerable innovative capacity of defense industry enterprises]. *Rossiyskoe predprinimatel'stvo.* 2016, Vol. 17, No. 18, P. 2283–2300 (In Russ.).

2. Borisova E. V. [Matrix distribution business processes of innovative projects as a tool for the formation of innovation infrastructure in the region]. *Naukovedenie.* 2016, Vol. 8, No. 4 (35). Available at: http://naukovedenie.ru/PDF/77EVN416.pdf. (accessed 15.05.2017) (In Russ.).

3. Erygin Yu. V., Borisova E. V. [The mechanism of functioning of innovative infrastructure in the course of commercialization of innovative capacity of defense industry enterprises]. *Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya*. 2016, No. 1.2 (19), P. 227–234 (In Russ.).

4. Basov N. V. [Network of interorganizational interactions as basis of realization of open innovations]. *Innovatsii.* 2010, No. 7, P. 36–46 (In Russ.).

5. Bolychev O. N., Voloshenko K. Ju. [Interorganizational network forms of interaction as the defining form of scientific and technical innovative cooperation of Russia and European Union in the Baltic region]. *Baltiyskiy region.* 2013, No. 4 (18), P. 23–39 (In Russ.).

6. Vladimirova O. N. [Problems of formation and functioning of innovative infrastructure in the region]. *Regionologiya.* 2010, 2. Available at: http://regionsar.ru/node/504?page=0,0. (accessed 10.05.2017) (In Russ.).

7. Drobyshevskaya L. N., Kucheruk V. A. [The analysis of efficiency of network interaction of the companies in the region]. *Terra economicus*. 2012, Vol. 10, No. 3, Part 2, P. 104–109 (In Russ.).

8. Evseev O. S., Konovalova M. E. [Development of innovative infrastructure in the conditions of modernization of national economy]. *Fundamental'nye issledovaniya.* 2012, No. 9, Part 1, P. 220–224 (In Russ.).

9. Konyshev O. V. *Upravlenie organizatsionno-finansovym vzaimodeystviem uchastnikov integrirovannykh sub''ektov khozyaystvovaniya: avtoref. Kand. diss.* [Management of organizational and financial interaction of participants of the integrated subjects of managing. Cand. Diss.]. Orel, 2002. 24 p.

10. Lobok A. M. [Network interaction: new format or fashionable name?]. *Zhurnal rukovoditelya upravleniya obrazovaniem.* 2014, No. 7, P. 1–8 (In Russ.).

11. Neretina E. A. [Types configuration and ways of creation of interorganizational networks. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Obshchestvennye nauki.* 2014, No. 2 (30), P. 196–204 (In Russ.).

12. Nefedyev A. D. [Innovative infrastructure]. *Kreativnaya ekonomika.* 2011, No. 10 (58), P. 42–48 (In Russ.).

13. Sheresheva M. Ju. *Formy setevogo vzaimodeystviya kompaniy* [Forms of network interaction of the companies]. Moscow, Izd. dom Gos. un-ta Vysshey shkoly ekonomiki Publ., 2010, 339 p.

14. Smith K. G., Carroll S. J., Ashford S. J. Intra and Interorganizational Cooperation: Toward a research Agenda. *Academy of Management Journal*. 1995, No. 1.

15. Sydow J., Windeler A. Steuerung von und in Netzwerken – Perspektiven, Konzepte, vor allem offene Fragen. *Steuerung von Netzwerken*. Wiesbaden, 2000, P. 14.

© Ерыгин Ю. В., Борисова Е. В., 2017

УДК 629.7: 330.4:519.2

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 464–470

ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ РИСКОВ ПРОЕКТОВ

А. И. Орлов, А. Д. Цисарский

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
Российская Федерация, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5/1
E-mail: prof-orlov@mail.ru

При моделировании жизненного цикла программы создания наукоемкой продукции необходимо учитывать риски, специфические при создании ракетно-космической техники. Представлен новый вид организационно-экономических моделей оценки рисков проектов создания ракетно-космической техники. В них впервые рассматривается в общем виде обобщение аддитивно-мультипликативной модели оценки рисков. В двухуровневой схеме на нижнем уровне оценки рисков объединяются аддитивно, на верхнем – мультипликативно. Аддитивно-мультипликативная модель применена для оценки рисков проектов создания ракетно-космической техники. Выделено 44 частных риска на нижнем уровне и 8 – на верхнем, соответственно этапам выполнения проекта. Аддитивно-мультипликативная модель полезна и для решения других задач оценки рисков. Она применялась для оценки рисков выполнения инновационных проектов в вузах (с участием внешних партнеров) и для оценки рисков при выпуске новых инновационных изделий. Рассматриваются последовательно основные элементы нового вида моделей оценки рисков: иерархическая система рисков, экспертная оценка рисков нижнего уровня, агрегирование показателей нижележащей группы рисков для расчета группового риска более высокого уровня, использование результатов оценивания для управления рисками, последствия срыва сроков и методы их преодоления. За созданием иерархической системы рисков следующий шаг – построение и применение системы экспертной оценки рисков нижнего уровня (частных рисков). Человеку свойственно использовать для оценки нечисловые характеристики, поэтому естественно давать оценки рисков конкретного проекта создания ракетно-космической техники с помощью лингвистических переменных. Значения лингвистических переменных могут быть получены непосредственно от экспертов в виде баллов из ряда 0, 1, 2, 3, 4, 5. При дальнейшем развитии организационно-экономической модели оценки рисков проектов с целью углубленного описания неопределенностей могут быть использованы другие математические средства, основанные на теории нечетких множеств и интервальной математике. Перспективные методы агрегирования оценок рисков предполагают использование взвешенных средних по Колмогорову, взвешенных медиан I и II типов. Результаты оценивания используют при управлении рисками. Подход и разработанная математическая модель могут быть полезны проектным менеджерам, осуществляющим свою деятельность в ракетно-космической промышленности.

Ключевые слова: риск, оценка, моделирование, проекты, ракетно-космическая техника, вероятность, экспертные процедуры.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 464–470

BUSINESS MODEL OF RISKS EVALUATION OF PROJECTS

A. I. Orlov, A. D. Tsisarskiy

Bauman Moscow State Technical University
5/1, 2-ya Baumanskaya Str., Moscow, 105005, Russian Federation
E-mail: prof-orlov@mail.ru

When modeling the life cycle of the program for the creation of science-intensive products, it is necessary to take into account the risks which are specific for the creation of rocket and space technology. In this article we offer the new kind of organizational and economic models for estimation the risks of projects for creating rocket and space technology. In it, for the first time, we consider the generalization of the additive-multiplicative model of risk estimation. In a two-level scheme at the lower level, risk assessments are combined additively, at the top level – multiplicatively. We use the additive-multiplicative model to estimate the risks of projects for creating rocket and space technology. There are 44 private risks at the lower level and 8 at the top, respectively, the stages of project implementation. The additive-multiplicative model is also useful for solving other problems of risk estimation. We applied it to estimate the risks of implementing innovative projects in universities (with the participation of external partners) and to estimate the risks in the release of new innovative products. We consider successively the main elements of a new model of risk estimation models: a hierarchical risk system, an expert risk estimation of the lower level, an aggregation of the risks in the lower group to calculate the higher-level group risk, use of the estimation

results for risk management, the consequences of the failure of terms and methods for overcoming them. For the creation of a hierarchical system of risks, the next step is the construction and application of a low-level expert risk estimation (private risk) system. It is natural for an expert to use non-numerical characteristics for estimation, so it is natural to give the risk estimations of a specific project for creating rocket and space technology using linguistic variables. Values of linguistic variables we can obtain directly from experts in the form of scores from the series 0, 1, 2, 3, 4, 5. With further development of the organizational and economic model of risk estimation of projects for the purpose of in-depth description of uncertainties, other mathematical tools based on theory of fuzzy sets and interval mathematics can be used. Perspective methods of aggregating risk estimations assume the use of weighted Kolmogorov's means, weighted medians I and II types. Estimation results we use in risk management. The approach and the mathematical model which we develop in this article can be useful for project managers who carry out their activities in the rocket and space industry.

Keywords: risk, estimation, modeling, projects, rocket and space technology, probability, expert procedures.

Введение. Успешная реализация проектов создания ракетно-космической техники необходима для обеспечения национальной безопасности нашей страны, в том числе ее экономической составляющей. Поэтому вполне естественно, что стратегия инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года предусматривает ускоренное развитие космической отрасли [1]. Для его обеспечения необходимо решение ряда задач экономики космической деятельности [2]. Работы нашего научного коллектива по организационно-экономическому обеспечению ракетно-космической промышленности проанализированы в статье [3] и главе 4 монографии [4]. В частности, необходима разработка организационно-экономических моделей оценки рисков проектов в ракетно-космической промышленности.

При моделировании жизненного цикла программы создания наукоемкой продукции необходимо учитывать риски, специфические при создании ракетно-космической техники [5]. Поэтому большое значение имеет развитие технологий адаптивного управления проектами создания, эксплуатации и утилизации ракетно-космической техники [6]. Так, для повышения эффективности реализации проектов по созданию перспективных образцов ракетно-космической техники целесообразно применять концепцию управления требованиями [7].

Настоящая статья посвящена новому виду организационно-экономических моделей оценки рисков проектов создания ракетно-космической техники. В них впервые рассматривается в общем виде обобщение аддитивно-мультипликативной модели оценки рисков. Работа посвящена дальнейшему развитию подхода, предложенного нами в статьях [8; 9] и докладах [10; 11]. Элементы рассматриваемого подхода уже используются в ЦНИИМАШ при выполнении научно-исследовательских работ и вошли в учебные курсы МГТУ им. Н. Э. Баумана (дисциплины «Организационно-экономическое моделирование», «Управление проектами» и «Контроллинг рисков»).

Рассмотрим последовательно основные элементы нового вида моделей оценки рисков: иерархическую систему рисков, экспертную оценку рисков нижнего уровня, агрегирование показателей нижележащей группы рисков для расчета группового риска более высокого уровня, использование результатов оценивания для управления рисками, последствия срыва сроков и методы их преодоления.

Иерархическая система рисков. Рассматриваемый подход основан на построении иерархической системы рисков. В работах [8; 9] с целью моделирования особенностей оценки рисков при создании ракетно-космической техники (РКТ) использовалась трехуровневая иерархическая система: риск невыполнения проекта в срок – групповые риски – частные риски. При этом групповые риски – это риски невыполнения в срок этапов проекта.

Основная идея построения иерархической системы – переход от сложного оцениваемого глобального риска к более простым групповым и от них – к частным рискам, которые могут быть оценены (например, экспертами) сравнительно легко. Для демонстрации предлагаемого подхода примем, что разработка РКТ состоит из следующих восьми этапов:

1) концепция;
2) разработка технического проекта (аванпроекта и эскизного проекта);
3) разработка рабочей конструкторской документации;
4) разработка технологической документации и техпроцессов;
5) изготовление макета и опытных изделий (опытного образца);
6) наземная отработка (испытания);
7) летные испытания и доработка документации для производства по результатам испытаний;
8) запуск в производство.

На каждом этапе имеются те или иные частные риски. Так, на этапе 5 «Изготовление опытного образца» нами выделены 7 частных рисков:

R_{14} – риск ошибок при изготовлении деталей и блоков;

R_{24} – риск ошибок при сборке;

R_{34} – риск недостатка ресурсов (станочного парка, кадровых, компьютерных, временных и других ресурсов);

R_{44} – риски, связанные с невыполнением обязательств смежниками и субподрядчиками (кооперация);

R_{54} – организационный риск (риск срыва работ из-за плохой их организации);

R_{64} – риск, вызванный действиями поставщиков сырья, комплектующих, материалов (низкое качество, нарушение сроков);

R_{74} – внешний риск (по другим причинам).

По всем 8 этапам было выделено 44 частных риска $R_{ij,}$ где i – номер этапа, i = 1, 2, 3, …, 8, а j – номер

частного риска внутри этапа, $j = 1, 2, ..., n(i)$, где $n(i)$ – количество частных рисков, выделенных на этапе i (при этом $n(i)$ менялось от 3 до 7). Полный перечень 44 частных рисков (с разделением по группам) приведен в статьях [8; 9].

Ясно, что трехуровневая иерархическая система может быть развернута в более подробную систему с большим числом уровней. Частные риски могут быть подвергнуты декомпозиции. Так, риск R_{14} ошибок при изготовлении деталей и блоков может быть разложен на группу рисков, соответствующих отдельным деталям и блокам. Поскольку подобное разложение может быть проведено и для других частных рисков, указанных в статьях [8; 9], то трехуровневая иерархическая система рисков может быть развернута до четырехуровневой. Очевидно, можно рассмотреть и другие частные риски, например, риски ошибок при изготовлении отдельных блоков. Тогда можно выделить отдельные ошибки, которые возможны при изготовлении конкретного блока. Следовательно, появляются частные риски на пятом уровне иерархии и т. д.

В работах [8; 9] нами была выбрана трехуровневая схема, позволяющая достаточно подробно описать многообразие рисков и в то же время достаточно быстро провести численную оценку рисков. При развитии системы риск-менеджмента на предприятии, создающем РКТ, может оказаться полезной детализация рисков, переход к большему числу уровней иерархии.

Построение иерархической системы рисков проводится специалистами в предметной области при анализе риска на первом этапе применения теории риска (имеются в виду три раздела теории риска: анализ риска, оценка риска, управление риском). Рассматриваемый в настоящей статье подход можно применять не только для оценки рисков проектов создания РКТ. В статье [9] приведена информация о построении трехуровневых иерархических систем рисков еще в двух предметных областях: для выполнения инновационных проектов в вузах (с участием внешних партнеров) и для выпуска новых инновационных изделий.

Экспертная оценка частных рисков. За созданием иерархической системы рисков следующий шаг – построение и применение системы экспертной оценки рисков нижнего уровня (частных рисков).

Человеку свойственно использовать для оценки нечисловые характеристики [12], поэтому естественно давать оценки рисков конкретного проекта создания РКТ с помощью лингвистических переменных. Например, члены экспертной комиссии оценивают вероятность реализации риска R_{ij} с помощью градаций лингвистической переменной X_{ij}, выбирая ее значения (градации) из списка:

0 – *практически невозможное событие* (с вероятностью не более 0,01);

1 – *крайне маловероятное событие* (с вероятностью от 0,01 до 0,05);

2 – *маловероятное событие* (вероятность от 0,05 до 0,10);

3 – *событие с вероятностью, которой нельзя пренебречь* (от 0,10 до 0,20);

4 – *достаточно вероятное событие* (вероятность от 0,20 до 0,30);

5 – *событие с заметной вероятностью* (более 0,30).

Ответ эксперта – одна из формулировок, выделенных курсивом. Слева приведена условная кодировка, ее осуществляют организаторы экспертизы. Может быть использована другая кодировка, например, вместо 0, 1, 2, 3, 4, 5 использованы значения 1, 10, 100, 1000, 10000, 100000. Справа приведены еще более условные границы для вероятности. Их назначение – предварительная ориентация экспертов перед началом оценивания с помощью градаций лингвистической переменной.

Очевидно, система оценивания частных рисков с помощью лингвистических переменных может меняться в соответствии с конкретной задачей оценки и управления риском. В частности, могут быть изменены:

– количество градаций;

– способ оцифровки градаций;

– граничные значения для вероятностей (например, если нежелательные события являются редкими, но соответствующий им ущерб велик, то вероятность практически невозможного события должна быть не более 10^{-5}, вместо «не более 0,01», как указано выше, и т. п.)

Естественно принять, что значения X_{ij}, используемые для оцифровки градаций, неотрицательны.

Конкретные процедуры экспертного оценивания выбирает исследователь в соответствии с рекомендациями учебника [13]. Отметим, что мы считаем нецелесообразным использование так называемого метода анализа иерархий Т. Л. Саати. К аргументам В. В. Подиновского и О. В. Подиновской [13–15] надо добавить, что метод Т. Л. Саати некорректен с точки зрения теории измерений [16], поскольку построен на неправомерной оцифровке (при переходе к количественной шкале) полученных от экспертов данных, измеренных в порядковой шкале.

Подходы к описанию частных рисков. Как сказано выше, значения лингвистических переменных X_{ij} могут быть получены непосредственно от экспертов в виде баллов из ряда 0, 1, 2, 3, 4, 5. При дальнейшем развитии организационно-экономической модели оценки рисков проектов создания РКТ с целью углубленного описания неопределенностей могут быть использованы другие математические средства [17].

Для описания лингвистических переменных напрашивается применение теории нечетких множеств (в соответствии с названием и содержанием классической книги Л. А. Заде [18]). Функции принадлежности используемых нечетких оценок рисков экспертами оцениваем с помощью экспертов. При таком подходе X_{ij} – нечеткие числа.

Можно использовать «треугольные» нечеткие числа, у которых функция принадлежности описывается тремя числовыми параметрами a, b, c ($a < b < c$) и имеет треугольный вид: функция принадлежности равна 0 левее a и правее c, в точке b – равна 1, на интервалах (a, b) и (b, c) – линейна. Арифметические

операции над такими числами описываются проще, чем для функций принадлежности общего вида.

Известно, что теория нечетких множеств в определенном смысле сводится к теории случайных чисел и, тем самым, к теории вероятностей [17; 19]. Однако это сведение формулируется в виде совокупности теорем и носит математический характер. С прикладной точки зрения вероятностно-статистические модели и модели на основе теории нечетких множеств в настоящее время целесообразно рассматривать как различные варианты математического инструментария.

Другое возможное обобщение – моделирование лингвистических переменных с помощью *интервальных чисел* (например, [11]). Тогда X_{ij} – интервал (a, b) (или $[a, b]$, $(a, b]$, $[a, b)$), т. е. описывается двумя числовыми параметрами a и b. В примере, описанном выше, «крайне маловероятное событие» описывается интервалом (0,01; 0,05]. Статистика интервальных данных подробно рассмотрена в [16; 17].

Для описания частных рисков используем матрицу «вероятность – тяжесть последствий». Тяжесть последствий A_{ij} при реализации частного риска R_{ij} задается числом – коэффициентом весомости (важности, значимости, существенности) и оценивается экспертно. Итак, у риска R_{ij} выделяем две характеристики – показатель вероятности X_{ij} и показатель тяжести последствий A_{ij}. Итоговая оценка Q_{ij} частного риска R_{ij} имеет вид $Q_{ij} = A_{ij}X_{ij}$, где A_{ij} – показатель весомости, например, оценка экономических потерь, вызванных данным видом риска; X_{ij} – показатель выраженности (распространенности). Эта формула обобщает известный способ оценки риска как произведения среднего ущерба (математического ожидания ущерба) на вероятность нежелательного события.

Агрегирование оценок рисков. Как из оценок рисков, входящих в определенную группу на нижнем уровне, получить оценку риска верхнего уровня? (Точнее, речь идет о подъеме на один уровень в иерархической системе рисков.) Рассмотрим агрегирование оценок рисков, т. е. построение обобщенного показателя, «рейтинга» риска более высокого уровня, усредняющего оценки рисков более низкого уровня.

Для i-й группы рисков оценка Q_i группового риска R_i рассчитывается как сумма оценок Q_{ij} частных рисков:

$$Q_i = Q_{i1} + Q_{i2} + \ldots + Q_{in(i)} =$$
$$= A_{i1}X_{i1} + A_{i2}X_{i2} + \ldots + A_{in(i)}X_{in(i)},$$

т. е. агрегирование проводится аддитивно. Значения факторов $X_{i1}, X_{i2}, \ldots, X_{in(i)}$ оценивают эксперты для каждого конкретного проекта создания РКТ, в то время как значения коэффициентов весомости $A_{i1}, A_{i2}, \ldots, A_{ik(i)}$ задаются одними и теми же для всех проектов – по результатам специально организованного экспертного опроса.

С оценкой Q_i группового риска R_i связана вероятность P_i успешного выполнения i-го этапа, а именно, $P_i = 1 - Q_i$, или $P_i = 1 - A_{i1}X_{i1} - A_{i2}X_{i2} - \ldots - A_{in(i)}X_{in(i)}$.

Вероятность P_i должна быть неотрицательна при всех возможных значениях $X_{i1}, X_{i2}, \ldots, X_{ik(i)}$. Если все оценки факторов риска (частных рисков) принимают свои максимальные значения, то и оценка Q_i группового риска R_i должна принять свое максимальное значение, равное 1 (а вероятность P_i, соответственно, минимальное значение 0). Следовательно, коэффициенты весомости (важности) должны удовлетворять условию

$$A_{i1}\max X_{i1} + A_{i2}\max X_{i2} + \ldots + A_{ik(i)}\max X_{in(i)} = 1.$$

В рассмотренном выше варианте оцифровки максимальные значения X_{ij} равны 5. Следовательно, сумма $A_{i1}, A_{i2}, \ldots, A_{in(i)}$ должна равняться 1/5 = 0,2.

В рассматриваемой модели принято, что события, относящиеся к различным группам рисков, независимы между собой в смысле теории вероятностей. Поскольку успешное выполнение проекта возможно тогда и только тогда, когда все этапы выполнены, то вероятность P выполнения проекта в срок равна произведению всех вероятностей P_i успешного выполнения этапов, т. е. агрегирование проводится мультипликативно:

$$P = P_1P_2\cdots P_m = (1 - Q_1)(1 - Q_2)\cdots(1 - Q_m),$$

где m – число этапов (в просчитанных в статьях [8; 9] моделях разработка РКТ состоит из восьми этапов, $m = 8$; в рассмотренных в модели [9] выполнения инновационных проектов в вузах (с участием внешних партнеров) и модели выпуска новых инновационных изделий выделено 4 группы рисков, а потому $m = 4$).

Оценка Q риска невыполнения проекта в срок – это дополнение до 1 вероятности успешного выполнения проекта P, т. е. $Q = 1 - P$. Именно эта величина является основной при принятии управленческих решений.

Некоторые обоснования именно такого способа усреднения оценок частных рисков, как описано выше, приведены в [8; 9].

В теории принятия решений разработаны различные методы агрегирования, другими словами, построения обобщенных (интегральных) показателей, рейтингов [20; 21]. В организационно-экономической модели оценки рисков проектов создания РКТ перспективными представляются методы агрегирования оценок частных и групповых рисков с помощью степенных средних, средних по Колмогорову, взвешенных медиан I и II типов, а также методы агрегирования с отсечением недопустимо больших значений оценок частных и групповых рисков (т. е. обнаружение подобного недопустимо большого значения приводит к заключению о невыполнении проекта в срок) и др. Перечисленные методы агрегирования могут быть использованы при дальнейшем развитии организационно-экономической модели оценки рисков проектов.

Перспективные методы агрегирования. Рассмотрим подробнее некоторые методы агрегирования. Пусть необходимо агрегировать оценки рисков $x_1, x_2, \ldots, x_n$. При их упорядочении получаем вариационный ряд $x(1) \le x(2) \le x(3) \le \ldots \le x(n)$.

При реальных расчетах применяют средние двух типов. Первый тип – степенные средние, частными случаями которых являются среднее арифметическое, среднее квадратическое, среднее гармоническое. Среднее геометрическое является пределом степенного среднего, когда показатель степени стремится к 0. Более общим видом средних являются средние по Колмогорову:

$$F^{-1}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}F(x_i)\right),$$

где F – строго монотонная функция; F^{-1} – функция, обратная к ней.

Второй тип средних величин – структурные средние, прежде всего медиана и мода, а также члены вариационного ряда, минимум, максимум, квартили, децили.

Применение теории измерений позволило установить, как выбирать средние в соответствии со шкалами, в которых измерены исходные данные [12; 19; 20]. Так, для данных, измеренных в порядковой шкале, допустимыми средними являются только члены вариационного ряда. В частности, при нечетном объеме выборки – выборочная медиана, при четном – левая и правая медианы (т. е. два центральных члена вариационного ряда). В шкале интервалов из всех средних по Колмогорову можно использовать только среднее арифметическое. В шкале отношений из всех средних по Колмогорову допустимы только степенные средние и среднее геометрическое.

Взвешенные средние (синоним – средние взвешенные) – это средние величины, в которых усредняемые величины учитываются по-разному, в соответствии с весовыми коэффициентами. Выделим два типа взвешенных средних. Для средних I типа весовые коэффициенты соответствуют элементам выборки. Для средних II типа весовые коэффициенты соответствуют членам вариационного ряда.

Пусть $a_1, a_2, \ldots, a_n$ – весовые коэффициенты (веса), т. е. неотрицательные числа, в сумме составляющие 1. Удобно ввести случайные величины $X(a_1, a_2, \ldots, a_n)$ и $Y(a_1, a_2, \ldots, a_n)$ такие, что $P(X = x_1) = a_1$, $P(X = x_2) = a_2, \ldots, P(X = x_n) = a_n$, в то время как $P(Y = x(1)) = a_1$, $P(Y = x(2)) = a_2, \ldots, P(Y = x(n)) = a_n$. Таким образом, случайные величины X и Y принимают одни и те же значения (перечисленные в наборе $x_1, x_2, \ldots, x_n$), но, вообще говоря, с разными вероятностями. Если все веса равны между собой (и равны $1/n$), то распределения случайных величин X и Y совпадают и называются эмпирическим распределением.

Взвешенные средние легко определить с помощью введенных случайных величин X и Y. Среднее взвешенное арифметическое I типа – это математическое ожидание X, т. е.

$$M(X) = \sum_{i=1}^{n} a_i x_i. \qquad (1)$$

Среднее взвешенное арифметическое II типа – это математическое ожидание Y, т. е.

$$M(Y) = \sum_{i=1}^{n} a_i x(i). \qquad (2)$$

Ясно, что результаты расчетов по формулам (1) и (2), вообще говоря, различны.

Среднее взвешенное по Колмогорову I типа – это

$$F^{-1}\left(M(F(X))\right) = F^{-1}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}a_i F(x_i)\right).$$

Среднее взвешенное по Колмогорову II типа – это

$$F^{-1}\left(M(F(Y))\right) = F^{-1}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}a_i F(x(i))\right).$$

Аналогично вводятся выборочная взвешенная медиана I типа – медиана случайной величины X, вероятности совпадения которой с элементами выборки равны заданным весам, и выборочная взвешенная медиана II типа – медиана случайной величины Y, вероятности совпадения которой с членами вариационного ряда равны заданным весам.

При использовании взвешенных средних величин в задачах системного анализа и принятия решений необходимо указывать тип средних, поскольку от типа средних зависят численные значения. В Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана при преподавании дисциплины «Прикладная статистика» и в Московском физико-техническом институте при преподавании дисциплины «Методы анализа данных» понятия средних взвешенных величин I типа и II типа входят в учебные программы, однако в научной и учебной литературе разделение средних взвешенных величин I типа и II типа нам не встречалось. Разделение необходимо, поскольку для одних и тех же исходных числовых данных значения одноименных средних взвешенных I и II типов различаются, что при практической работе может привести к недоразумениям.

Использование результатов оценивания при управлении рисками. Оценка Q риска невыполнения проекта в срок дает лицу, принимающему решение (ЛПР), основания для принятия тех или иных управленческих решений. Если оценка указанного риска мала (например, 1 %), то ЛПР может ограничиться контролем за выполнением этапов проекта. Если оценка Q риска невыполнения проекта в срок составляет 80–90 %, то сроки выполнения проекта следует признать нереальными, а потому необходимы кардинальные управленческие решения.

Управление рисками может быть основано не только на основе оценки Q риска невыполнения проекта в целом, но и на анализе влияний оценок частных и групповых рисков на итоговую оценку риска Q. Целесообразно принять меры по снижению наиболее заметных влияний, т. е. по снижению конкретных групповых, а затем и частных рисков. Так, в приведенном выше примере этапа 4 «Изготовление опытного образца» могут быть приняты меры по снижению частных рисков, например, усилен контроль при изготовлении деталей и блоков (с целью уменьшения оценки X_{14} риска R_{14}); проведено дополнительное обучение сборщиков (это позволит уменьшить оценку X_{24} риска R_{24}); проанализирована потребность в ресурсах (производственных, материальных, кадровых, временных и др.) и при необходимости увеличены выделяемые ресурсы с целью уменьшения оценки X_{34} риска R_{34} недостатка ресурсов; отработаны взаимоотношения со смежниками и субподрядчиками, поставщиками сырья, комплектующих, материалов (это позволит уменьшить оценки X_{44} и X_{64} рисков R_{44} и R_{64} соответственно) и т. д.

Может быть поставлена и решена оптимизационная задача по распределению имеющихся ресурсов с целью максимально возможного снижения итогового риска путем воздействия на доступные управлению групповые и частные риски, как это было сделано при разработке нашим коллективом автоматизированной системы прогнозирования и предотвращения авиационных происшествий [22].

В работах [8; 9] нами рассмотрена последовательность этапов выполнения проекта по созданию РКТ. Срыв сроков выполнения определенного этапа приводит к необходимости изменения сроков дальнейших этапов. Принято предположение, что при срыве этапа он повторяется и при этом *обязательно* выполняется. Выделены варианты выполнения проекта создания РКТ с учетом возможных повторов. Можно рассмотреть более сложную теорию, когда повторное выполнение этапа приводит к успеху не наверняка, а лишь с некоторой вероятностью.

Заключение. Отличительная особенность рассмотренного в настоящей статье подхода состоит в том, что он основан на построении трехуровневой иерархической системы рисков. Выбранная трехуровневая схема позволяет достаточно подробно описать многообразие рисков и в то же время достаточно быстро провести их численную оценку. При необходимости трехуровневая иерархическая система рисков может быть развернута до четырехуровневой и даже пятиуровневой схемы. Декомпозиция риска верхнего уровня дает систему рисков, образующих группу рисков более низкого уровня иерархии.

Анализ оценки 44 рисков, приведенных в работах [8; 9], показывает, что отдельные риски второго порядка вносят в риски по этапам заметно больший вклад, чем другие риски на тех же этапах. Полученные результаты демонстрируют возможность оценки и управления такими рисками.

Учитывая значимость инноваций в области создания ракетно-космической техники, подход и разработанная математическая модель могут быть полезны проектным менеджерам, осуществляющим свою деятельность в ракетно-космической промышленности.

Авторы благодарны Д. Б. Пайсону за полезные замечания.

Библиографические ссылки

1. Инновационная Россия – 2020 (Стратегия инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года). М. : Правительство Российской Федерации, 2011. 148 с.

2. Экономика развития космической деятельности / под ред. Г. Г. Райкунова. М. : Физматлит, 2013. 600 с.

3. Орлов А. И. Организационно-экономическое обеспечение ракетно-космической промышленности // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 120. С. 86–114.

4. Орлов А. И., Луценко Е. В., Лойко В. И. Организационно-экономическое, математическое и программное обеспечение контроллинга, инноваций и менеджмента / под общ. ред. С. Г. Фалько. Краснодар : КубГАУ, 2016. 600 с.

5. Хрусталев Е. Ю., Хрусталев О. Е. Моделирование жизненного цикла программы создания наукоемкой продукции // Экономический анализ: теория и практика. 2012. № 16 (271). С. 2–12.

6. Грачев И. Д., Фионов А. С. Развитие технологий адаптивного управления проектами создания, эксплуатации и утилизации ракетно-космической техники // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2012. № 42 (183). С. 2–14.

7. Цисарский А. Д. Повышение эффективности реализации проектов по созданию перспективных образцов ракетно-космической техники на основе концепции Requirements Engineering // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2013. № 31. С. 25–29.

8. Орлов А. И., Цисарский А. Д. Особенности оценки рисков при создании ракетно-космической техники // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2013. № 43 (232). С. 37–46.

9. Орлов А. И. Аддитивно-мультипликативная модель оценки рисков при создании ракетно-космической техники // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 102. С. 78–111.

10. Орлов А. И., Цисарский А. Д. Аддитивно-мультипликативная модель оценки рисков и ее применение при разработке инновационно-инвестиционных проектов создания ракетно-космической техники // Проблемы управления безопасностью сложных систем : Труды XXI Междунар. конф. (декабрь 2013, г. Москва) / под ред. Н. И. Архиповой, В. В. Кульбы. М. : РГГУ, 2013. С. 394–398.

11. Орлов А. И. Цисарский А. Д. Особенности оценки рисков при реализации инновационно-инвестиционных проектов в космической отрасли // Актуальные проблемы российской космонавтики : материалы XXXVIII Академических чтений по космонавтике (январь 2014, г. Москва) / под общ. ред. А. К. Медведевой. М. : Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства, 2014. С. 210–210.

12. Орлов А. И. Организационно-экономическое моделирование. Ч. 2. Экспертные оценки. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 486 с.

13. Саати Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М. : Радио и связь, 1989. 316 с.

14. Подиновский В. В., Подиновская О. В. О некорректности метода анализа иерархий // Проблемы управления. 2011. № 1. С. 8–13.

15. Подиновский В. В., Подиновская О. В. Еще раз о некорректности метода анализа иерархий // Проблемы управления. 2012. № 4. С. 75–78.

16. Орлов А. И. Организационно-экономическое моделирование. Ч. 1. Нечисловая статистика. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. 542 с.

17. Орлов А. И., Луценко Е. В. Системная нечеткая интервальная математика. Краснодар : КубГАУ, 2014. 600 с.

18. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М. : Мир, 1976. 165 с.

19. Орлов А. И. Устойчивость в социально-экономических моделях. М. : Наука, 1979. 296 с.

20. Орлов А. И. Теория принятия решений. М. : Экзамен, 2006. 576 с.

21. Лындина М. И., Орлов А. И. Математическая теория рейтингов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 114. С. 1–26.

22. Хрусталев С. А., Орлов А. И., Шаров В. Д. Математические методы оценки эффективности управленческих решений // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79, № 11. С. 67–72.

References

1. Innovative Russia – 2020 (Strategy of Innovative Development of the Russian Federation for the period up to 2020). Moscow, Government of the Russian Federation, 2011. 148 p.

2. Raykunov M. et al. *Ekonomika razvitiya kosmicheskoy deyatel'nosti* [Development of space activity economics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013, 600 p.

3. Orlov A. I. [Organizational and economic support of space industry]. *Nauchnyy zhurnal KubGAU* [Scientific Journal of KubSAU]. 2016, No. 120, P. 86–114 (In Russ.).

4. Orlov A. I., Lucenko E. V., Lojko V. I. *Organizatsionno-ekonomicheskoe, matematicheskoe i programmnoe obespechenie kontrollinga, innovatsiy i menedzhmenta* [Organizational-economic, mathematical and software controlling, innovation and management]. Krasnodar, KubGAU, 2016, 600 p.

5. Khrustalev E. Yu., Khrustalev O. E. [Modeling of life cycle of the program of creation of the knowledge-intensive production]. *Ekonomicheskiy analiz: teoriya i praktika*. 2012, No. 16 (271), P. 2–12 (In Russ.).

6. Grachev I. D., Fionov A. S. [Development of technology of adaptive management of project of creation, operation and utilization of space rocket technology]. *Natsional'nye interesy: prioritety i bezopasnost'*. 2012, No. 42 (183), P. 2–14 (In Russ.).

7. Tsisarskiy A. D. [Increase of efficiency of implementation of projects on creation of perspective samples of missile and space equipment on basis of requirements engineering concept]. *Natsional'nye interesy: prioritety i bezopasnost'*. 2013, No. 31 (220), P. 25–29 (In Russ.).

8. Orlov A. I., Tsisarskiy A. D. [Features of risk assessment to create rocket and space technology]. *Natsional'nye interesy: prioritety i bezopasnost'*. 2013, No. 43 (232), P. 37–46 (In Russ.).

9. Orlov A. I. [Additive-multiplicative model for risk estimation in the production of rocket and space technics]. *Nauchnyy zhurnal KubGAU*. 2014, No. 102, P. 78–111 (in Russ.).

10. Orlov A. I., Tsisarskiy A. D. [Additive-multiplicative model of risk evaluation and its application in process of developing innovative-investment projects of space-rocket technique creation]. *Problemy upravleniya bezopasnost'yu slozhnykh sistem: Trudy XXI Mezhdunarodnoy konferentsii* [Problems of complicated system security management: Proc. XXI Int. Conf.]. Moscow, RSUH Publ., 2013, P. 394–398 (In Russ.).

11. Orlov A. I. Tsisarskiy A. D. [Special aspects risk evaluation in process of realization innovative-investment projects in space sector]. *Aktual'nye problemy rossiyskoy kosmonavtiki. Materialy XXXVIII Akademicheskikh chteniy po kosmonavtike* [Topical issues of Russian cosmonautics. Proc. XXXVIII Academic readings on cosmonautics]. Moscow, RAS committee on scientific heritage development of space pioneers, 2014, P. 210–210 (In Russ.).

12. Orlov A. I. *Organizatsionno-ekonomicheskoe modelirovanie. Ch. 2. Ekspertnye otsenki* [Business modelling. P. 2. Expert estimate]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2011, 486 p.

13. Saati T. L. *Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy* [Decision making. Analytic hierarchy process]. Moscow, Radio i svyaz', Publ., 1989, 316 p.

14. Podinovskij V. V., Podinovskaja O. V. [On the incorrectness of the analytic hierarchy process]. *Problemy upravleniya*. 2011, No. 1, P. 8–13 (In Russ.).

15. Podinovskij V. V., Podinovskaja O. V. [Once again about the incorrectness of the Analytic hierarchy process]. *Problemy upravleniya*. 2012, No. 4, P. 75–78 (In Russ.).

16. Orlov A. I. *Organizatsionno-yekonomicheskoe modelirovanie. Ch. 1: Nechislovaja statistika.* [Business modelling. P. 1. Nonnumerical statistics]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2009, 542 p.

17. Orlov A. I., Lucenko E. V. *Sistemnaya nechetkaya interval'naya matematika* [System of fuzzy interval mathematics]. Krasnodar, KubGAU Publ., 2014, 600 p.

18. Zade L. A. *Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primenenie k prinyatiyu priblizhennykh resheniy* [Concept of linguistic variable and its application in making approximate decisions]. Moscow, Mir Publ., 1976,165 p.

19. Orlov A. I. *Ustojchivost' v sotsial'no-jekonomicheskikh modeljakh* [Stability in socio-economic models]. Moscow : Nauka Publ., 1979. 296 p.

20. Orlov A. I. *Teoriya prinyatiya resheniy* [Decision making theory]. Moscow, Ekzamen Publ., 2006, 576 p.

21. Lyndina M. I., Orlov A. I. [Mathematical theory of ratings]. *Nauchnyy zhurnal KubGAU* [Scientific Journal of KubSAU]. 2015, No. 114, P. 1–26.

22. Khrustalev S. A., Orlov A. I., Sharov V. D. [Mathematical methods for estimating the effectiveness of management decisions]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov.* 2013, Vol. 79, No. 11, P. 67–72 (In Russ.).

© Орлов А. И., Цисарский А. Д., 2017

UDK 338.45

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 471–475

PROSPECTS FOR CREATING AN AEROSPACE CLUSTER IN THE EAST OF RUSSIA

A. P. Sukhodolov[1], Y. A. Sukhodolov[2*]

[1]Baikal State University
11, Lenin Str., Irkutsk, 664003, Russian Federation
[2]Ministry for International Cooperation and Foreign Economic Relations of Zabaykalsky Region
37, Anokhin Str., Chita, Zabaykalsky Region, 672010, Russian Federation
[*]E-mail: yakov.suhodolov@gmail.com

The article considers the issue of creating a new Russian aerospace centre in Zabaykalsky region with the participation of the state corporations Roscosmos and Rostec and involving Zabaykalsky region military-industrial complex plants in this process.

It is stated in the article that the worsening of the socio-economic situation in Zabaykalsky region is caused by liquidating Zabaykalsky military command region which has resulted in the state defense order being reduced and has counted against machine-building plants of the military-industrial complex. All of this has also resulted in many highly qualified specialists and their families leaving Zabaykalsky region.

A proposal to create a new aerospace industry centre in Zabaykalsky region has been made. Creating such a centre will do well to socio-economic development of Zabaykalsky region, because of the centre's becoming part of the aerospace cluster, forming around Vostochny cosmodrome, as well as because of using the advantages of placing aerospace machine plants and aerospace equipment plants in Zabaykalsky region instead of using those ones located in the European part of Russia. This will allow the creation of one territory industrial complex of Siberian Region and the Far East Region by organising production aimed at meeting the requirements of Vostochny cosmodrome, as well as Eastern Siberia and the Far East aircraft plants, and exporting goods which are in demand in the countries of the Asia-Pacific region.

A conclusion is drawn that creating a new aerospace industry centre aimed at producing high-technology products which are in high demand in Russia and the countries of the Asia-Pacific region, will contribute to economic, industrial and intellectual development of Zabaykalsky region, and will also improve the economy of Siberian Federal District and the Far Eastern Federal District.

Keywords: Siberian Federal District, Far Eastern Federal District, Zabaykalsky region, aerospace industry, machine engineering, Vostochny cosmodrome.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 2. С. 471–475

ПЕРСПЕКТИВЫ ФОРМИРОВАНИЯ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО КЛАСТЕРА НА ВОСТОКЕ РОССИИ

А. П. Суходолов[1], Я. А. Суходолов[2*]

[1]Байкальский государственный университет
Российская Федерация, 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11
[2]Министерство международного сотрудничества и внешнеэкономических связей Забайкальского края
Российская Федерация, 672010, Забайкальский край, г. Чита, ул. Анохина, 37
[*]E-mail: yakov.suhodolov@gmail.com

Рассматривается вопрос создания нового центра аэрокосмической промышленности России в Забайкальском крае при участии государственных корпораций Роскосмос и Ростех, а также вовлечения существующих в Забайкальском крае предприятий оборонно-промышленного комплекса России.

Отмечается, что ухудшение социально-экономического положения Забайкальского края вызвано в том числе и ликвидацией Забайкальского военного округа, которая повлекла за собой сокращение оборонного заказа, размещаемого в Забайкальском крае, и негативно отразилась на существующих машиностроительных предприятиях оборонно-промышленного комплекса Забайкальского края, а также послужила причиной оттока из края высококвалифицированных специалистов и членов их семей.

Сделано предложение о необходимости создания нового центра аэрокосмической промышленности в Забайкальском крае. Создание такого центра окажет положительное влияние на социально-экономическое развитие Забайкальского края за счет вхождения его (центра) составной частью в аэрокосмический кластер, формирующийся вокруг космодрома «Восточный», и использования преимуществ от размещения предприятий аэрокосмического машиностроения и приборостроения в Забайкальском крае по сравнению с аэрокосмическими

центрами в европейской части России. Это позволит связать регионы Сибири и Дальнего Востока в единый территориально-производственный комплекс за счет организации производства, направленного на обеспечение потребностей космодрома «Восточный», существующих в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке предприятий авиационной промышленности, а также организации производства экспортной продукции, востребованной в странах Азиатско-Тихоокеанского региона.

Сделан вывод о том, что создание центра аэрокосмической промышленности, ориентированного на выпуск высокотехнологичной продукции, позволит задействовать инженерно-научный потенциал России и стран СНГ, будет способствовать экономическому, производственному и интеллектуальному развитию Забайкальского края, а также окажет положительное влияние на экономику регионов Сибирского и Дальневосточного федеральных округов.

Ключевые слова: СФО, ДФО, Забайкальский край, Красноярский край, аэрокосмическая промышленность, машиностроение, космодром «Восточный».

Introduction. Currently the socio-economic situation in the Zabaykalsky region is difficult. In the last three decades there have been many reasons for the worsening of the socio-economic situation here, among them being a reason, to which little attention has been paid so far. In 1998 the Zabaikalsky military command region as well as its management located in Chita ceased to exist [1]. This deprived the Zabaykalsky region of federal funding by the Russian Federation Ministry of Defense. Some activities of the Zabaikalsky military command region are still being performed in Chita, but the Ministry of Defense no longer funds these activities as it did before.

Therefore, the region lost its main funding and prospects for further development. After the Zabaikalsky military command region had been liquidated dozens of thousands highly qualified officers and technicians, who were graduates from universities and vocational schools, left the region. Their wives, who were the education, culture and medical care base of the Zabaikalsky region, as well as their children, who were the future of the region, also left.

We should not forget the sad experience of the Ukraine, when the western part of the country infused with the Soviet Union's investment got separated. There are concerns that the eastern part of Russia, which has received a lot of funding recently and which has such economically developed countries as China, the USA and Japan nearby is under a similar threat now. To prevent such a situation it is necessary to connect the Far East with Siberia and all of Russia, and, first of all, with the Zabaikalsky region [2].

Historically, the Zabaikalsky region is a raw material economy region specialising in mining and agriculture. The industrial potential of the Zabaikalsky region's manufacturing is mainly shaped by machine-building plants, the food industry and the building materials industry. However, the technical condition of machinery assets of these industries' plants (under 50 % effective) profoundly reduces their competitiveness and requires substantial investment to update. There is no high-quality manufacturing in the Zabaikalsky region nowadays.

Machine building played an important role in the regional economy as it was mainly formed by plants of the defense industry complex. Nowadays, machine building forms 37.5 % of all manufacturing, employing 6.000 people [3].

Currently, the system of the defense industry complex of the Zabaikalsky region includes plants providing full repair service and reconstruction of armored machinery ("the 103th armored machinery repair plant" (a stock company)), aviation equipment (the stock company ("the 810th aviation equipment repair plant" (a stock company)) and automotive vehicles ("the 88th Central automotive vehicles repair plant" (an open stock company)), as well as plants specialising in building medium range vessels and low-displacement boats and motor boats (the limited liability company "Sretensk shipbuilding yard") [4–6]. Despite these plants' having a narrow specialisation, they play a noticeable role in the region's economy employing over 10.000 people. At the same time it should be noted that the current situation at these plants is still challenging. The reason for this is the decreasing amount of government contracts in defense industry awarded in the region. A decrease in the number of repairs performed at these plants is caused by liquidating the Zabaykalsky military command region and a lot of military hardware being relocated from the Zabaikalsky region.

What can compensate for this loss for the Zabaikalsky region, which remains a militarily strategically important region of Russia?

Prospects for creating an aerospace centre in the Zabaykalsky region. Creating an aerospace industry centre can become one of the prospective trends of socio-economic development of the Zabaikalsky region, as the aerospace industry is one of the most technically developed branches of machine building, which is characterised by a high degree of cooperation and concentration of production, also this industry plays the most significant role in ensuring the national security of Russia [7].

The project of creating an aerospace industry centre in the Zabaikalsky region is included in "The integrated plan for socio-economic development of the Zabaikalsky region until the year 2030", which is currently being developed in collaboration with the Russian federal agencies of executive authority interested in this project (according to President Vladimir V. Putin's instruction of 31 October 2016 № Pr-3082 [8].

The government of the Zabaikalsky region supports the idea of creating a new aerospace industry centre in the region, as locating new machine building plants here, as well as those ones of military-industrial complex, will contribute to the socio-economic development of the Zabaikalsky region and increasing Russia's defence capacity in the Far East.

The Far East will become strongly linked to the Zabaikalsky region due to the region's becoming part of

the aerospace cluster forming around Vostochny cosmodrome located in the Amur region. Aerospace machine building plants and aerospace equipment plants to be built for Vostochny cosmodrome's development can be placed in the Zabaikalsky region as they would have several advantages over such centres located in the European part of Russia, for example, in the Samara region:

First, an aerospace centre located in the Zabaikalsky region will be much closer to Vostochny cosmodrome.

Second, this aerospace centre will be "duplicating" the aerospace industry centre in Samara, which is very important for ensuring national security. The aerospace cluster in the Samara region is very compact, in terms of the territory it occupies, which despite its economic advantages makes it vulnerable in case of war and terrorist attacks.

Third, the aerospace centre in the Zabaikalsky region will become a high-technology link between the Far Eastern territories and the Baikal region (including the Irkutsk region and Buryatia and their aircraft plants), as well as the Krasnoyarsk region, where rocket technology is produced and aerospace industry personnel are trained.

At the same time creating an aerospace industry centre in the Zabaikalsky region does not imply "destroying a rival" to the aerospace industry centre in Samara, since creating a new plants' complex will allow the enlarging of Russia's share in the international aerospace market, which is nowadays only 2–3 % [9]. The new advanced aerospace industry centre in the Zabaikalsky region will give an impulse to updating all of the aerospace production, and along with Samara, Voronezh and other aerospace industry centres the Zabaikalsky centre will strengthen Russia's position in the international aerospace market.

The machine building complex of the Krasnoyarsk region can be extended to the Zabaikalsky region, thus creating several subsidiary plants producing satellite antennae, cables for rockets and aeroplanes, navigational equipment, etc. Expert help for solving issues related to building a new aerospace centre in the Zabaikalsky region can be provided by the Krasnoyarsk regional division of the Russian Engineering Union and scientists from Reshentev Siberian State Aerospace University.

It is very important to make such state corporations as Roscosmos and Rostec interested in building an aerospace complex in the Zabaikalsky region [10]. This especially concerns Rostec which includes such corporations as "Almaz-Antey" and "Radio-Electronic Technologies" which can become active investors in the Zabaikalsky region. For example, "Almaz-Antey" built machine building plants in a very short period of time in Kirov and Nizhny Novgorod, i. e. the Kirov machine building plant (a stock company) and the Nizhny Novgorod 70th Anniversary of Victory Plant (a stock company), which are responsible for mass production of new complexes of aerospace defence and the rockets they contain. The cost to build these plants totalled over 54 billion rubles, i. e. 20 billion rubles for building the Kirov plant and 34 billion rubles for building the Nizhny Novgorod plant [11]. With these plants starting to work at their full capacity there is a plan to have up to 5.500 new jobs, i. e. 3.500 new jobs in Kirov and 2.000 new jobs in Nizhny Novgorod.

Building a plant, similar to the Kirov machine building plant (a stock company), in the Zabaikalsky region, with an investment of 20 billion rubles, will allow the creation of up to 1.800 new jobs in the region thus ensuring tax returns of up to 540 million rubles to all levels' treasuries.

Manufacturing high-technology products including those in-demand in the framework of some targeted federal programmes (for example, the military-industrial complex development programme and the federal aerospace programme), in the framework of orders by the state corporations Rostec and Roscosmos, as well as while providing for Vostochny cosmodrome's needs and the Baikal region and the Far East aircraft plants' needs (those in Irkutsk, Ulan-Ude and Komsomolsk-on-Amur) will allow activation of engineering and scientific resources of Siberia and the Far East. All of this will also contribute to economic, industrial and intellectual development of the Zabaikalsky region, and will also open up new opportunities for developing agriculture, the food industry, and the service sector together with the resort complex.

Creating an aerospace industry centre aimed among other things at producing goods for export will contribute to Russia's economic and technological cooperation with China, India, Malaysia and other countries in the Asia-Pacific Region [12; 13], this will also provide the new SW: aerospace industry centre with long-term orders.

For detailed addressing of the issues related to creating a new aerospace industry centre in the Zabaikalsky region, i. e. making a list of aerospace products to be manufactured, employing personnel, choosing a site where the centre will be built, etc. it is necessary to collaborate at the Russian Federation government level with representatives of the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation, the Ministry of Economic Development of the Russian Federation, the state corporations Rostec and Roscosmos, Vostochny cosmodrome, Irkutsk, Ulan-Ude and Komsomolsk-on-Amur aircraft plants, the Krasnoyarsk division of the Russian Engineering Union, Reshentev Siberian State Aerospace University and the government of the Zabaikalsky region.

The personnel for the new aerospace cluster can be provided by Siberian universities, training future specialists for high-technology industries. These universities are Reshentev Siberian State Aerospace University and Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics [14]. In addition, for building an aerospace centre it is necessary to hire not only engineers, but also security guards, cleaning personnel, drivers, etc. People of all professions are in demand here, states Egor Shcherbakov, the author of the article "Eastern Way to Cosmos" [15].

There is hope that aerospace specialists from the Ukraine will be able to come to the Zabaikalsky region. This is ready to work human capital, to attract them it is necessary to build a modern comfortable satellite-town not far from Chita, this will improve the demographical situation in the Zabaikalsky region.

Conclusion. In such a way, creating an aerospace industry centre in the Zabaikalsky region will do the following:

– stabilise the situation at the defence-industrial complex's plants in the Zabaikalsky region and keep the specialists in machine engineering in the region;

− the new aerospace centre will become a logical final link in the chain of aerospace and aircraft plants in the East of Russia;

− create a chain of accompanying plants in the Zabaikalsky region as well as in the neighbouring regions in the Siberian Federal District and the Far Eastern Federal District;

− increase the share of high-technology products in the overall industrial production in the East of Russia;

− guarantee economic and technological cooperation between Russia and China and other countries of the Asia-Pacific Region;

− allow use of the engineering and scientific potential of fellow Russians currently living in the Ukraine and other countries of the Commonwealth of Independent States;

− provide with an opportunity for fast economic, industrial and intellectual growth of the Zabaikalsky region.

References

1. Russian Federation Presidential Decree no. 900 On Military-Administrative Division of the Russian Federation dated 27 July, 1998. *Sobranie zakonodatel'stva Rossiiskoi Federatsii.* 1998, No. 31, P. 3839 (In Russ.).

2. Sukhodolov A. P. Not to Turn out to Be a "Provincial Part of Russia". *Rossiiskaya Gazeta*, 2016, Dec. 14 (In Russ.). Available at: https://rg.ru/2016/12/14/u-zabajkalia-poiavilsia-shans-realizovat-svoiu-istoricheskuiu-missiiu.html (accessed 30.04.2016).

3. Regional Office of Federal State Statistics Service for Zabaikalsky Region. Available at: http://chita.gks.ru (accessed 30.04.2016).

4. The Stock Company "the 103th Armored Machinery Repair Plant". Available at: http://103btrz.ru (accessed 30.04.2016).

5. The Stock Company "the 810th Aviation Equipment Repair Plant". Available at: http://810arz.ru (accessed 30.04.2016).

6. The Limited Liability Company "Sretensk Shipbuilding Yard". Available at: http://ssz.rosbizinfo.ru (accessed 30.04.2016).

7. Timofeichev A. Russian Space Industry Being Moved to the East. *BBC. Russkaya sluzhba* [BBC. Russian]. Available at: http://http://www.bbc.com/russian/russia/2013/10/131024_rogozin_far_east_space_industry (accessed 30.04.2016).

8. Sukhodolov A. P. Strong and Attractive. *Rossiiskaya Gazeta*, 2016, Dec. 1. Available at: https://rg.ru/2016/12/01/aleksandr-suhodolov-rasskazal-o-razvitii-zabajkalskogo-kraia.html (accessed 30.04.2016).

9. Prokopenkova I. O. Modern tendencies of international cooperation development in the world aerospace industry: Chinese and Indian factors. *Problemy natsional'noi strategii.* 2012, No. 2 (11), P. 122–137 (In Russ.).

10. Chemezov S. V. Innovations are the basis for strategy development of the Rostec State Corporation. *Innovatsii*. 2013, No. 12, P. 3–9 (In Russ.).

11. *AO "Kirovskoe mashinostroitel'noe predpriyatie"* [The Kirov Machine Building Plant (a Stock Company)]. Available at: http://kmp43.ru (accessed 30.04.2016).

12. Erygin Yu. V., Firulev O. V. Evaluating space industry performance in the international market. In Loginov Yu. Yu. (ed.). *Reshetnevskie chteniya. Materialy 19-i Mezhdunararodnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 55-letiyu Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akad. M. F. Reshetneva (Krasnoyarsk, 10–14 noyabrya 2015)* [Reshetnev Readings. Proc. of the 19th International Research Conference, Devoted to the 55th Anniversary of Reshetnev Siberian State Aerospace University. Krasnoyarsk, Nov. 10–14, 2015]. Krasnoyarsk, Reshetnev Siberian State Aerospace University Publ., 2015, Vol. 2, No. 19, P. 342–343 (In Russ.).

13. Sukhodolov Ya. A. [Modern Peculiarities of Foreign Trade Relations between the Russian Federation and the People's Republic of China]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta.* 2015, No. 4 (52), P. 158–164 (In Russ.).

14. Sukhodolov A. P. Chita is Looking Attentively into the Space. *Rossiiskaya Gazeta,* 2016, No. 7 (In Russ.). Available at: https://rg.ru/2016/11/07/zabajkale-mozhet-stat-novym-centrom-aerokosmicheskoj-promyshlennosti-rf.html (accessed 30.04.2016).

15. Shcherbakov E. The Eastern Way to Cosmos. *Vostochno-Sibirskaya Pravda*. 2017, Apr. 11–17 (No. 11), P. 22–23 (In Russ.).

Библиографические ссылки

1. О военно-административном делении Российской Федерации : Указ Президента Российской Федерации от 27 июля 1998 года № 900 [Электронный ресурс] // Доступ из СПС «КонсультантПлюс».

2. Суходолов А. П. Чтобы не оказаться «провинциальным углом» [Электронный ресурс] // Российская газета. 2016. 14 дек. / URL: https://rg.ru/2016/12/14/u-zabajkalia-poiavilsia-shans-realizovat-svoiu-istoricheskuiu-missiiu.html (дата обращения: 30.04.2017).

3. Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Забайкальскому краю : офиц. сайт [Электронный ресурс]. URL: http://http://chita.gks.ru (дата обращения: 30.04.2017).

4. АО «103 бронетанковый ремонтный завод» : офиц. сайт [Электронный ресурс]. URL: http://103btrz.ru (дата обращения: 30.04.2017).

5. АО «810 авиационный ремонтный завод» : офиц. сайт [Электронный ресурс]. URL: http://810arz.ru (дата обращения: 30.04.2017).

6. ООО «Сретенский судостроительный завод» : офиц. сайт [Электронный ресурс]. URL: http://ssz.rosbizinfo.ru (дата обращения: 30.04.2017).

7. Тимофейчев А. Космическую промышленность России сдвигают на восток [Электронный ресурс] // Русская служба Би-би-си. 24.10.2013. URL: http://www.bbc.com/russian/russia/2013/10/131024_rogozin_far_east_space_industry (дата обращения: 30.04.2017).

8. Суходолов А. П. Сильный и привлекательный [Электронный ресурс] // Российская газета. 2016. 01 дек.

URL: https://rg.ru/ 2016/12/01/aleksandr-suhodolov-rasskazal-o-razvitii-zabajkalskogo-kraia.html (дата обращения: 30.04.2017).

9. Прокопенкова И. О. Современные тенденции развития международной кооперации в мировой аэрокосмической промышленности: фактор Китая и Индии // Проблемы национальной стратегии. 2012. № 2 (11). С. 122–137.

10. Чемезов С. В. Инновации как основа стратегического развития госкорпорации Ростех // Инновации. 2013. № 12. С. 3–9.

11. АО «Кировское машиностроительное предприятие» : офиц. сайт [Электронный ресурс]. URL: http://kmp43.ru (дата обращения: 30.04.2017).

12. Ерыгин Ю. В., Фирулев О. В. Оценка современного положения ракетно-космической отрасли России на международном рынке космических услуг // Решетневские чтения. 2015. Т. 2, № 19 / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т им. акад. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2015. С. 342–343.

13. Суходолов Я. А. Современная специфика внешнеторговых связей Российской Федерации с Китайской Народной Республикой // Вестник Ростовского государственного экономического университета (РИНХ). 2015. № 4 (52). С. 158–164.

14. Суходолов А. П. Чита всматривается в космос [Электронный ресурс] // Российская газета. 2016. 07 нояб. URL: https:// rg.ru/2016/11/07/zabajkale-mozhet-stat-novym-centrom-aerokosmicheskoj-promyshlennosti-rf.html (дата обращения: 30.04.2017).

15. Щербаков Е. Восточный путь в космос // Восточно-Сибирская правда. 2017. 11–17 апреля. С. 22–23.

© Sukhodolov A. P., Sukhodolov Y. A., 2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Абкарян Артур Карлосович – кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии обработки материалов, Политехнический институт, Сибирский федеральный университет. E-mail: abkaryan_artur@mail.ru.

Аврамчикова Надежда Тимофеевна – доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры финансов и кредита, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: avr-777yandex.ru.

Альтшулер Александр Шоломович – кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор, Государственный космический научно-производственный центр имени М. В. Хруничева.

Анисимов Даниил Игоревич – аспирант кафедры радиотехники, Сибирский федеральный университет; инженер, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: denanis@inbox.ru.

Антонец Иван Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры авиационной техники, Ульяновское высшее авиационное училище гражданской авиации. E-mail: iv.antonec@yandex.ru.

Асланян Роксана Ованесовна – аспирант кафедры электротехнических комплексов и систем, Сибирский федеральный университет; инженер 2 категории, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: roksana_a@list.ru.

Багатеев Ильгиз Равилевич – инженер, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». E-mail: pu48@bk.ru.

Баландин Евгений Александрович − инженер, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». E-mail: balaniva@sibmail.com.

Баландина Татьяна Николаевна – инженер, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». E-mail: tan.balandina2015@yandex.ru.

Баранов Михаил Евгеньевич – кандидат биологических наук, доцент факультета военного обучения, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: me_baranov@mail.ru.

Беляев Евгений Николаевич – кандидат технических наук, доцент, кафедры энергофизических систем факультета двигателей летательных аппаратов, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). E-mail: belyaev72@rambler.ru.

Бинчуров Александр Сергеевич – аспирант кафедры конструкторско-технологического обеспечения машиностроительного производства; Политехнический институт, Сибирский федеральный университет. E-mail: mexanixs@mail.ru

Бобронников Владимир Тимофеевич – доктор технических наук, профессор кафедры 604 «Системный анализ и управление», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет).

Борисова Елена Владимировна – аспирант кафедры финансов и кредита, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: borisovaev2015@mail.ru.

Борсоев Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры авиационной техники, Ульяновское высшее авиационное училище гражданской авиации. E-mail: borsoev@aeronav.aero

Бревнов Василий Григорьевич – инженер методического кабинета при диссертационных советах, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: Vasiliy.brevnov @mail.ru.

Волков Дмитрий Олегович – аспирант кафедры финансов и кредита, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: exivee@mail.ru.

Волочаев Михаил Николаевич – инженер лаборатории молекулярной спектроскопии, Институт физики имени Л. В. Киренского. E-mail: volochaev91@mail.ru.

Воробьев Алексей Геннадиевич – кандидат технических наук, доцент кафедры ракетных двигателей факультета двигателей летательных аппаратов, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). E-mail: formula1_av@mail.ru.

Герасимова Людмила Анатольевна – кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры инженерной экологии факультета машиноведения и мехатроники, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: Lyu-Gerasimova@yandex.ru.

Гордеев Юрий Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкторско-технологического обеспечения машиностроительного производства; Политехнический институт, Сибирский федеральный университет. E-mail: tms-mtf@rambler.ru.

Гурулев Александр Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН. E-mail: lgc255@mail.ru.

Дубынин Павел Алексеевич – студент, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: pavel.dubynin@mail.ru.

Ерыгин Юрий Владимирович – доктор экономических наук, профессор кафедры финансов и кредита, первый проректор – проректор по образовательной деятельности, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: yuri_erygin@mail.ru

Ефремова Светлана Владимировна – младший научный сотрудник ОНИРС, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: efremova_svet@sibsau.ru.

Жигалов Виктор Степанович – ведущий научный сотрудник, Институт физики имени Л. В. Киренского. E-mail: zhigalov@iph.krasn.ru.

Захарова Лариса Николаевна – кандидат экономических наук, доцент кафедры управления качеством, стандартизации и документационного обеспечения управления; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: logistatzln@mail.ru.

Индаков Николай Степанович – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкторско-технологического обеспечения машиностроительного производства, Политехнический институт, Сибирский федеральный университет. E-mail: indakov 072@mail.ru.

Калинин Андрей Олегович – инженер, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва E-mail: Andrey.kalinin@phkp.ru.

Карцан Игорь Николаевич – кандидат технических наук, доцент, начальник Военного института, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kartsan@sibsau.ru.

Кацура Александр Владимирович, кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической эксплуатации авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: pnk-sibsau@mail.ru

Квеглис Людмила Иосифовна – доктор физико-матемтических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры материаловедения и технологии обработки материалов, Политехнический институт, Сибирский федеральный университет. E-mail: kveglis@list.ru.

Кириллов Валерий Александрович – заместитель начальника отдела общего проектирования космических аппаратов, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». E-mail: kva75@iss-reshetnev.ru.

Киселев Денис Иванович – магистрант кафедры конструкторско-технологического обеспечения машиностроительного производства, Политехнический институт, Сибирский федеральный университет. E-mail: kdi327@mail.ru.

Киселева Елена Александровна – младший научный сотрудник, 22 НИО 2 НИУ НИЦ ВА РВСН им. Петра Великого. E-mail:varvsn@mil.ru.

Ковалев Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры системного анализа, ректор, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: kovalev.fsu@mail.ru.

Колинчук Алина Владимировна – аспирант кафедры космической техники и нетрадиционных источников энергии, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». E-mail: lunya18111991@yandex.ru.

Куликова Юлия Дмитриевна – студентка кафедры систем искусственного интеллекта, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет.

Лепёшкина Екатерина Сергеевна – инженер кафедры безопасности информационных технологий, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: klepka1111.93@mail.ru.

Лосев Василий Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов, Институт информатики и телекоммуникаций, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: basilos@mail.ru.

Марченко Игорь Анатольевич – инженер 1 категории, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: dreadman-85@mail.ru.

Масюгин Альберт Николаевич – аспирант, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: albert.masyugin@mail.ru.

Носков Федор Михайлович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения и технологии обработки материалов, Политехнический институт, Сибирский федеральный университет. E-mail: yesoono@yandex.ru.

Оборина Людмила Ивановна – аспирант кафедры управления качеством и сертификации, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: sibgau-uks@mail.ru.

Орлов Александр Иванович – доктор технических наук, доктор экономических наук, кандидат физико-математических наук, профессор, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана. E-mail: prof-orlov@mail.ru.

Пантелеев Василий Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехнических комплексов и систем, директор Политехнического института, Сибирский федеральный университет. E-mail: pvi0808@rambler.ru.

Петров Михаил Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электронной техники и телекоммуникаций, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: ettk@bk.ru.

Погарцева Мария Михайловна – старший преподаватель кафедры технологии самолетостроения, Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет. E-mail: marry_pog@mail.ru.

Попов Владимир Николаевич – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики имени С. А. Христиановича СО РАН. E-mail: popov@itam.nsc.ru.

Посконин Михаил Васильевич – старший преподаватель, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: Poskonin.m.v@gmail.com.

Пятаева Анна Владимировна – старший преподаватель кафедры систем искусственного интеллекта, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет.

Рыжов Дмитрий Ринатович – аспирант кафедры управления качеством и сертификации, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: sibgau-uks@mail.ru.

Сарамуд Михаил Владимирович – инженер, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: msaramud@gmail.com.

Сенашов Владимир Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Институт вычислительного моделирования СО РАН; профессор кафедры алгебры и математической логики, Сибирский федеральный университет. E-mail: sen1112home@mail.ru.

Ситников Максим Николаевич – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры физики, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: kineru@mail.ru.

Скопинцева Любовь Михайловна – младший научный сотрудник, 22 НИО 2 НИУ НИЦ ВА РВСН им. Петра Великого. E-mail: varvsn@mil.ru.

Соколов Дмитрий Евгеньевич – начальник отдела создания и продвижения биллинговых решений, Макрорегиональный филиал «Сибирь» ПАО «Ростелеком». E-mail: Dmitrij.Sokolov@sibir.rt.ru

Степанов Сергей Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры авиационной техники, Ульяновское высшее авиационное училище гражданской авиации.

Суханова Ольга Андреевна – магистрант кафедры управления качеством и сертификации, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: olkasukhanova@mail.ru.

Суходолов Александр Петрович – доктор экономических наук, профессор, ректор, Байкальский государственный университет. E-mail: rector@bgu.ru.

Суходолов Яков Александрович – кандидат экономических наук, начальник отдела международного и межрегионального сотрудничества министерства международного сотрудничества и внешнеэкономических связей Забайкальского края. E-mail: yakov.suhodolov@gmail.com.

Тарлецкий Иван Сергеевич – инженер-конструктор, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». E-mail: akmak08@rambler.ru.

Треногин Николай Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, директор департамента развития и эксплуатации информационных систем и платформ, Макрорегиональный филиал «Сибирь» ПАО «Ростелеком». E-mail: Nikolay.G.Trenogin@sibir.rt.ru

Трифанов Владимир Иванович – магистрант кафедры управления качеством и сертификации, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: sibgau-uks@mail.ru.

Трифанов Иван Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой управления качеством и сертификации, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: sibgau-uks@mail.ru.

Трифонов Максим Викторович – аспирант кафедры 604 «Системный анализ и управление», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). E-mail: 3_fonov@mail.ru.

Тюрин Сергей Феофентович – заслуженный изобретатель Российской Федерации, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматики и телемеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. E-mail: tyurinsergfeo@yandex.ru.

Ханов Владислав Ханифович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры безопасности информационных технологий, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: hanov@sibsau.ru.

Харин Юрий Владимирович – инженер, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН. E-mail: lgc255@mail.ru.

Харьков Антон Михайлович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: khark.anton@mail.ru.

Хижняк Сергей Витальевич – доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры экологии и естествознания, Красноярский государственный аграрный университет. E-mail: Khizhnyak@yandex.ru.

Цисарский Александр Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана. E-mail: 93105948@tsniimash.ru.

Цыренжапов Сергей Васильевич – младший научный сотрудник, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН. E-mail: lgc255@mail.ru.

Шангина Екатерина Александровна – инженер-конструктор 3 категории 110 отдела, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: kati6230@yandex.ru.

Шахматов Александр Владимирович – инженер кафедры безопасности информационных технологий, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: sanecsan@rambler.ru.

Ясинский Виталий Брониславович – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкторско-технологического обеспечения машиностроительного производства, Политехнический институт, Сибирский федеральный университет. E-mail: VYasinskiy@sfu-kras.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Abkaryan Arthur Karlosovich – Cand. Sc., Docent, Docent of Department of Materials and Materials Processing Technologies, Polytechnic School, Siberian Federal University. E-mail: abkaryan_artur@mail.ru.

Altshuler Aleksandr Sholomovich – Cand. Sc., lead engineer, Khrunichev State Research and Production Space Center.

Anisimov Daniil Igorevich – postgraduate student of Department of Radio engineering, Siberian Federal University; engineer, JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems". E-mail: denanis@inbox.ru.

Antonets Ivan Vasil'evich – Dr. Sc., professor, Department of Aeronautical engineering, Ulyanovsk State Technical University. E-mail: iv.antonec@yandex.ru.

Aslanyan Roksana Ovanesovna – postgraduate student of Department of Electrotechnical complexes and systems, Siberian Federal University; engineer of the 2nd category, JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems". E-mail: roksana_a@list.ru.

Avramchikova Nadezhda Timofeevna – Dr. Sc., Docent, professor of Department of Finance and credit, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: avr-777yandex.ru.

Bagateev Il'giz Ravilevich – engineer, JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems". E-mail: pu48@bk.ru.

Balandin Evgeniy Aleksandrovich – engineer, JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems". E-mail: balaniva@sibmail.com.

Balandina Tat'yana Nikolaevna – engineer, JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems". E-mail: tan.balandina2015@yandex.ru.

Baranov Mikhail Evgen'evich – Cand. Sc., Docent, Faculty of Military training, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: me_baranov@mail.ru.

Belayev Evgenyi Nikolaevich – Cand. Sc., Docent, Department of Energyphysical systems, Moscow Aviation Institute (National Research University). E-mail: belyaev72@rambler.ru.

Binchurov Aleksandr Sergeevich – postgraduate student, of chair Design- technology ensuring machine – building production of the Polytechnic Institute, Siberian Federal University. E-mail: mexanixs@mail.ru.

Bobronnikov Vladimir Timofeevich – Dr. Sc., professor of Department of Systems analysis and Control, Moscow Aviation Institute (National Research University).

Borsoev Vladimir Aleksandrovich – Dr. Sc., professor, Department of Aeronautical engineering, Ulyanovsk State Technical University. E-mail: borsoev@aeronav.aero.

Borisova Elena Vladimirovna – postgraduate student, Department of Finance and credit, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: borisovaev2015@mail.ru

Brevnov Vasily Grigoryevich – engineer of a methodical cabinet at dissertational councils, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail Vasiliy.brevnov@mail.ru.

Dubynin Pavel Alekseevich – student, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: pavel.dubynin@mail.ru.

Efremova Svetlana Vladimirovna – junior scientific researcher, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: efremova_svet@sibsau.ru.

Erygin Yuri Vladimirovich – Dr. Sc., professor, Department of Finance and credit, First vice-rector, vice-rector for academic affairs, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: yuri_erygin@mail.ru.

Gerasimova Ludmila Anatol'evna – Cand. Sc., Docent, Docent of Department of Environmental engineering, Faculty of Mechanical engineering and mechatronics, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: Lyu-Gerasimova@yandex.ru.

Gordeev Yuri Ivanovic – Cand. Sc., Docent of Department of Design and technology ensuring machine – building production of Polytechnic School, Siberian Federal University. E-mail: tms-mtf@rambler.ru.

Gurilev Alexander Aleksandrovich – Cand. Sc., Docent, senior researcher of Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS. E-mail: lgc255@mail.ru.

Indakov Nikolay Stepanovich – Cand. Sc., Docent of Department of Design and technology ensuring machine-building production, Polytechnic School, Siberian Federal University. E-mail: indakov 072@mail.ru.

Jasinski Vitaly Bronislavovich – Cand. Sc., Docent of Department of Design and technology ensuring machine-building production of Polytechnic School, Siberian Federal University E-mail: VYasinskiy@sfu-kras.ru.

Kalinin Andrey Olegovich – engineer, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology**.** E-mail: Andrey.kalinin@phkp.ru.

Katsura Aleksandr Vladimirovich – Cand. Sc., professor, Head of Department of Technical Maintenance of Aviation electrical systems and flight and navigation system, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: pnk-sibsau@mail.ru.

Kartsan Igor' Nikolaevich – Cand. Sc., Docent, Head of Military Institute, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: kartsan@sibsau.ru.

Khanov Vladislav Khanifovich – Cand. Sc., Docent, Docent of Department of Information technology security, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: hanov@sibsau.ru.

Kharin Yuri Vladimirovich – engineer of Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS. E-mail: lgc255@mail.ru.

Kharkov Anton Mikhailovich – Cand. Sc., Docent, Department of Physics, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: khark.anton@mail.ru

Khizhnyak Sergei Vital'evich – Dr. Sc., Docent, professor of Department of Ecology and natural sciences, Krasnoyarsk State Agrarian University. E-mail: Khizhnyak @yandex.ru.

Kirillov Valeriy Aleksandrovich – deputy head of Department of Spacecraft general design, JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems". E-mail: kva75@iss-reshetnev.ru.

Kiselyov Denis Ivanovich – graduate student of Department of Design and technology ensuring machine-building production, Polytechnic School, Siberian Federal University. E-mail: kdi327@mail.ru.

Kiseleva Elena Aleksandrovna – junior scientific researcher, The Military Academy of Strategic Rocket Troops after Peter the Great. E-mail:varvsn@mil.ru.

Kolinchuk Alina Vladimirovna – postgraduate student of Department of Space Engineering and Alternative Energy Sources, National Aerospace University named after N. E. Zhukovsky (KHAI). E-mail: lunya18111991@yandex.ru.

Kovalev Igor Vladimirovich – Dr. Sc., Professor, Department of System analysis, Rector, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: kovalev.fsu@mail.ru.

Kulikova Yuliya Dmitrievna – student, School of Space and Information Technology, Siberian Federal University Siberian Federal University. E-mail: anna4u@list.ru.

Kveglis Lyudmila Iosifovna – Dr. Sc., professor, Department of Materials and Materials Processing Technologies, Siberian Federal University. E-mail: kveglis@list.ru.

Lepeshkina Ekaterina Sergeevna – engineer, Department of information technology security, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: klepka1111.93@mail.ru.

Losev Vasiliy Vladimirovich – Cand. Sc., Docent, Department of Automation of production processes, Institute of Informatics and Telecommunications, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: basilos@mail.ru.

Marchenko Igor' Anatol'yevich – engineer of the 1st category, JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems". E-mail: dreadman-85@mail.ru.

Masyugin Albert Nikolaevich – postgraduate student, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: albert.masyugin@mail.ru.

Noskov Fedor Mikhailovich – Cand. Sc., Docent, Docent of Department of Materials and Materials Processing Technologies, Polytechnic School, Siberian Federal University. E-mail: yesoono@yandex.ru.

Oborina Lyudmila Ivanovna – postgraduate student of Department of Quality management and certification, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: sibgau-uks@mail.ru.

Orlov Alexander Ivanovich – Dr. Sc. (Eng.), Dr. Sc. (Econom.), Cand. Sc. (Phys.-Math.), professor of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: prof-orlov@mail.ru.

Panteleyev Vasiliy Ivanovich – Dr.Sc., professor, Head of Department of Electrotechnical complexes and systems, Director of Polytechnic school, Siberian Federal University. E-mail: pvi0808@rambler.ru.

Petrov Mikhail Nikolayevich – Dr. Sc., professor, Head of Department of Electronic Engineering and Telecommunications, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: ettk@bk.ru.

Pogartseva Mariia Mikhaylovna – senior teacher, Department of Technology of aircraft construction, Komsomolsk-na-Amure State Technical University. E-mail: marry_pog@mail.ru.

Popov Vladimir Nikolaevich – Dr. Sc., senior researcher, chief scientific officer, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS. E-mail: popov@itam.nsc.ru.

Poskonin Mikhail Vasilyevich – senior teacher, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology**.** E-mail: Poskonin.m.v@gmail.com.

Pyataeva Anna Vladimirovna – senior teacher, School of Space and Information Technology, Siberian Federal University. E-mail: anna4u@list.ru.

Ryzhov Dmitriy Rinatovich – postgraduate student of Department of Quality management and certification, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: sibgau-uks@mail.ru.

Saramud Mikhail Vladimirovich – engineer, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology**.** E-mail: msaramud@gmail.com.

Senashov Vladimir Ivanovich – Dr. Sc., professor, leader researcher of Institute, Computational Modeling SB RAS; professor, Department of Algebra and logic, Siberian Federal University. E-mail: sen1112home@mail.ru.

Shahmatov Aleksandr Vladimirovich – engineer, Department of Information technology security, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: sanecsan@rambler. ru.

Shangina Ekaterina Aleksandrovna – design-engineer of the 3d category of 110 department, JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems". E-mail: kati6230@yandex.ru.

Sitnikov Maxim Nikolaevich – Cand. Sc., senior teacher, Department of Physics, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: kineru@mail.ru.

Skopintseva Lyubov' Mikhaylovna – junior scientific researcher, The Military Academy of Strategic Rocket Troops after Peter the Great. E-mail: varvsn@mil.ru.

Sokolov Dmitry Evgenievich – head of department of development and deployment of billing solutions, Macroregional branch "Sibir" of PJSC Rostelecom. E-mail: Dmitrij.Sokolov@sibir.rt.ru.

Stepanov Sergey Mikhaylovich – Cand. Sc., Docent, Department of Aviation technology, Ulyanovsk State Technical University.

Sukhanova Olga Andreevna – Master's degree student of Department of Quality management and certification, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: olkasukhanova@mail.ru.

Sukhodolov Alexander Petrovich – Dr. Sc., professor, Rector, Baikal State University. E-mail: rector@bgu.ru.

Sukhodolov Yakov Aleksandrovich – Cand. Sc., Head of International and Interregional Cooperation Department of Ministry for International Cooperation and Foreign Economic Relations of Zabaykalsky Region. E-mail: yakov.suhodolov@gmail.com.

Tarletskiy Ivan Sergeevich – engineer, JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems". E-mail: akmak08@rambler.ru.

Trenogin Nikolay Gennadyevich – Cand. Sc., Docent, Director of department of development and support of information systems and platforms, Macroregional branch "Sibir" of PJSC Rostelecom. E-mail: Nikolay.G.Trenogin@sibir.rt.ru.

Trifanov Ivan Vasil'evich – Dr. Sc., professor, Head of Department of Quality management and certification, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: sibgau-uks@mail.ru.

Trifonov Maksim Viktorovich – postgraduate student, Department of Systems analysis and Control, Moscow Aviation Institute (National Research University). E-mail: 3_fonov@mail.ru.

Trifanov Vladimir Ivanovich – Master's degree student of Department of Quality management and certification department, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: sibgau-uks@mail.ru.

Tsisarskiy Alexander Dmitrievich – Cand. Sc., Docent, Bauman Moscow State Technical University. E-mail: 93105948@tsniimash.ru.

Tsyrenzhapov Sergey Vasilievich – junior researcher of Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS. E-mail: lgc255@mail.ru.

Tyurin Sergey Feofentovich – Honored Inventor of the Russian Federation, Dr. Sc., professor, professor of Department of Automation and Telemechanics, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: tyurinsergfeo@yandex.ru.

Volkov Dmitry Olegovich – postgraduate student, Department of Finance and credit, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: exivee@mail.ru.

Volochayev Mikhail Nikolayevich – laboratory engineer of molecular spectroscopy, Kirensky Institute of Physics SB RAS. E-mail: volochaev91@mail.ru.

Vorobyev Alexey Gennadievich – Cand. Sc., Docent, Department of Rocket engines, Moscow Aviation Institute (National Research University). E-mail: formula1_av@mail.ru.

Zakharova Larisa Nikolaevna – Cand. Sc., Docent of Department of Quality management and certification, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: logistatzln@mail.ru.

Zhigalov Viktor Stepanovich – lead researcher, Kirensky Institute of Physics SB RAS. E-mail: zhigalov@iph.krasn.ru.