

ISSN 2587-6066



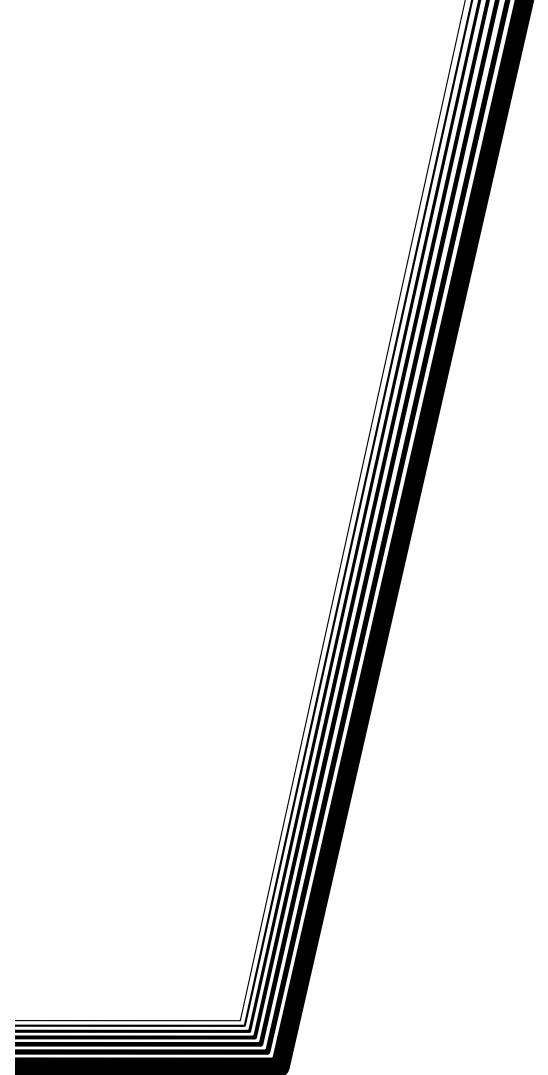
# **СИБИРСКИЙ ЖУРНАЛ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ**

## **SIBERIAN JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

Том  
Vol. **19**, № **4**

**КРАСНОЯРСК 2018**

# **СИБИРСКИЙ ЖУРНАЛ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ**



Том 19, № 4

Красноярск 2018

# СИБИРСКИЙ ЖУРНАЛ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

Том 19, № 4

---

*Главный редактор*

**Ковалев Игорь Владимирович**, доктор технических наук, профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

*Заместители главного редактора*

**Логинов Юрий Юрьевич**, доктор физико-математических наук, профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

**Сенашов Сергей Иванович**, доктор физико-математических наук, профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

**Мурыгин Александр Владимирович**, доктор технических наук, профессор, ответственный за подготовку выпусков журнала, содержащих секретные сведения (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

---

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Аплеснин С. С.**, доктор физико-математических наук, профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

**Галеев Р. Г.**, доктор технических наук (АО «НПП «Радиосвязь»)

**Головенкин Е. Н.**, доктор технических наук, профессор (АО «ИСС»)

**Лаптенко В. Д.**, доктор технических наук, профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

**Лившиц А. В.**, доктор технических наук, доцент (ИрГУПС)

**Максимов И. А.**, доктор технических наук (АО «ИСС»)

**Медведев А. В.**, доктор технических наук, профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

**Михеев А. Е.**, доктор технических наук, профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

**Москвичев В. В.**, доктор технических наук, профессор (СКТБ «Наука» ИВТ СО РАН)

**Садовский В. М.**, доктор физико-математических наук, профессор (ИВМ СО РАН)

**Сафонов К. В.**, доктор физико-математических наук, доцент (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

**Сильченко П. Н.**, доктор технических наук, профессор (СФУ)

**Смирнов Н. А.**, доктор технических наук, профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

**Терсков В. А.**, доктор технических наук, профессор (КРИЖТ ИрГУПС)

**Чеботарев В. Е.**, доктор технических наук, доцент (АО «ИСС»)

**Шайдуров В. В.**, доктор физико-математических наук, профессор (ИВМ СО РАН)

## 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 (Химки)

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

**Краус И.**, профессор (Прага, Чехия)

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

**Лю Т.**, профессор (Пекин, Китай)

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

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

**Павера Р.**, доцент (Братислава, Словакия)

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

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

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

**Чжанг Ш.**, доктор (Тяньцзинь, Китай)

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

**Швиденко А.**, доктор инженерных наук, профессор (Лаксенбург, Австрия)

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

# SIBERIAN JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

Vol. 19, No 4

---

## *Chief Editor:*

**Kovalev I. V.**, Dr.Sc., Professor (Reshetnev University)

## *Deputy Chief Editors*

**Loginov Y. Y.**, Dr.Sc., Professor (Reshetnev University)

**Senashov S. I.**, Dr.Sc., Professor (Reshetnev University)

**Murygin A. V.**, Dr.Sc., Professor (Reshetnev University)

---

## EDITORIAL BOARD

**Aplesnin S. S.**, Dr.Sc., Professor  
(Reshetnev University)

**Galeev R. G.**, Dr.Sc.  
(JSC "NPP "Radiosvyaz")

**Golovenkin E. N.**, Dr.Sc., Professor  
(ISS-Reshetnev Company)

**Laptenok V. D.**, Dr.Sc., Professor  
(Reshetnev University)

**Livshits A. V.**, Dr.Sc., Professor  
(Irkutsk State Transport University)

**Maksimov I. A.**, Dr.Sc.  
(ISS-Reshetnev Company)

**Medvedev A. V.**, Dr.Sc., Professor  
(Reshetnev University)

**Mikheev A. E.**, Dr.Sc., Professor  
(Reshetnev University)

**Moskvichev V. V.**, Dr.Sc., Professor  
(SDTB Nauka KSC SB RAS)

**Sadovsky V. M.**, Dr.Sc., Professor  
(ICM SB RAS)

**Safonov K. V.**, Dr.Sc., Professor  
(Reshetnev University)

**Silchenko P. N.**, Doctor of Technical  
Sciences, Professor (SibFU)

**Smirnov N. A.**, Dr.Sc., Professor  
(Reshetnev University)

**Terskov V. A.**, Dr.Sc., Professor  
(Irkutsk State Transport University)

**Chebotarev V. Y.**, Dr.Sc., Professor  
(ISS-Reshetnev Company)

**Shaidurov V. V.**, Dr.Sc., Professor  
(ICM SB RAS)

## 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 (Khimki)

**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)

**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)

**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)

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

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

## 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. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

ISSN 2587-6066.

Подписной индекс в каталоге «Пресса России» – 39263.

Зарегистрирован в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ).

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

Входит в перечень журналов ВАК по следующим группам научных специальностей:

05.02.00 – машиностроение и машиноведение;

05.07.00 – авиационная и ракетно-космическая техника;

05.13.00 – информатика, вычислительная техника и управление.

Выпускается с 2000 года. До 2002 года журнал 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».

Каждый выпуск журнала включает три раздела:

1 раздел. Информатика, вычислительная техника и управление.

2 раздел. Авиационная и ракетно-космическая техника.

3 раздел. Технологические процессы и материалы.

Статьи публикуются бесплатно после обязательного рецензирования и при оформлении их в соответствии с требованиями редакции ([www.vestnik.sibsau.ru](http://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](http://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, г. Красноярск, проспект имени газеты «Красноярский рабочий», 31, П-416. Тел./ факс (391)291-90-19

E-mail: [vestnik@sibsau.ru](mailto: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.

Certificate of Registration as a Mass Media Resource. Certificate: PI No. FC 77-50577, dated 03 August 2017, given by Federal Supervision Agency for Information Technology, Communications and Mass Media.

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

The journal is registered in the Russian Science Citation Index (RSCI). The journal is indexed in the database of Ulrich's Periodicals Directory.

The journal was first published in 2000. Prior to 2002 it had the title *Vestnik Sibirskoi aerokosmicheskoi akademii imeni akademika M. F. Reshetneva (Vestnik SAA)*, prior to may 2017 it had the title *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M. F. Reshetneva (Vestnik SibGAU)*.

The Journal is recommended for publishing the main results of research when applying for Cand. Sc. degree and Dr. Sc. degree upon the following specialties:

05.02.00 – machine engineering and science of mechanics;

05.07.00 – aviation and spacecraft engineering;

05.13.00 – informatics, computer technology and management.

Each issue consists of three parts:

Part 1. Informatics, computer technology and management.

Part 2. Aviation and Spacecraft Engineering.

Part 3. Technological Processes and Material Science.

Papers prepared in accordance with the editorial guidelines ([www.vestnik.sibsau.ru](http://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 be 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](http://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](mailto:vestnik@sibsau.ru)

Редактор О. А. ПЛЕХОВА

Редактор английского текста С. Г. ЭФА

Оригинал-макет и верстка М. А. СВЕТЛАКОВОЙ

Подписано в печать 25.12.2018. Формат 70×108/16.

Бумага офсетная. Печать плоская. Усл. печ. л. 19,6.

Уч.-изд. л. 25,5. Тираж 1000 экз. Заказ 2803. С 310/18.

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: 29.12.2018. Свободная цена

Editor O. A. PLEKHOVA, Editor (English Language) S. G. EFA

Layout original M. A. SVETLAKOVA

Signed (for printing): 25.12.2018. Format 70×108/16.

Offset Paper. Print flat. 19,6. Published sheets 25,5.

1000 copies. Order 2803. C 310/18.

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: 29.12.2018. Free price

## СОДЕРЖАНИЕ

### РАЗДЕЛ 1. ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<b>Бельская Е. Н., Медведев А. В., Михов Е. Д., Тасейко О. В.</b> Непараметрические алгоритмы восстановления случайных полей .....	574
<b>Бренинг Д. В., Пашковская О. В., Сенашов С. И., Савостьянова И. Л.</b> Математическое моделирование стоимости вторичного жилья в городе Красноярске в 2017 году .....	581
<b>Осипов П. А., Осипова Я. С., Хоркуш А. В., Вдовых П. Е., Верхотурова М. В.</b> Заполнение пропусков во входных и выходных данных с помощью алгоритма непараметрической идентификации .....	589
<b>Пятаев А. С.</b> Алгоритм моделирования трехмерных деревьев .....	598
<b>Фролова Е. А.</b> Многоуровневая оценка качества интерактивных электронных технических руководств для авиационной техники .....	605
<b>Фролова Е. А., Ивакин Я. А., Смирнов А. О.</b> Метод выявления аномалий качества интерактивных электронных технических руководств по эксплуатации и ремонту авиационной техники .....	613

### РАЗДЕЛ 2. АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

<b>Воронцова Е. О., Лукьяненко М. В., Крючков П. А.</b> Оценка целостности фотопреобразователей солнечных батарей, применяемых на перспективных космических аппаратах .....	624
<b>Ковалёв В. С., Мануковский Н. С., Тихомиров А. А.</b> Моделирование компонентов биорегенеративной системы жизнеобеспечения космического назначения .....	631
<b>Мироненко Е. Д., Михеев А. Е.</b> Анализ влияния способа крепления на напряженно-деформированное состояние композитного бака высокого давления .....	637
<b>Назаров В. П., Назарова Л. П., Швецова Д. С., Савчин Д. А.</b> Совершенствование методики определения кавитационной характеристики шнекоцентробежных насосов .....	644
<b>Черная М. М.</b> Методика расчета энергетических характеристик и параметров солнечных батарей высоковольтных систем электропитания космических аппаратов .....	651

### РАЗДЕЛ 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

<b>Воронин А. С., Фадеев Ю. В., Иванченко Ф. С., Немцев И. В., Хартов С. В.</b> Прозрачные нагревательные элементы на основе медной микросетки, пассивированной оксидом графена .....	660
<b>Ереско С. П., Ереско Т. Т., Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А.</b> Совершенствование методики расчета угла закручивания карданной передачи с использованием теоретических и экспериментальных исследований .....	668
<b>Зализняк В. Е., Золотов О. А., Золотова О. П.</b> Математическая модель проводящей нанопоры для расчетов методом молекулярной динамики .....	677
<b>Ковалев И. В., Ковалев Д. И., Колесник В. В., Лосев В. В., Карасева М. В.</b> Анализ технологического оборудования систем автоматизированного мониторинга дымовых газов тепловых электростанций .....	683
<b>Морозов Е. А., Трифонов С. В., Мурыгин А. В., Тихомиров А. А.</b> Автоматическая система контроля концентраций $O_2$ и $H_2$ в технологических газовых контурах биотехнических систем жизнеобеспечения космического назначения .....	691
<b>Симунин М. М.</b> Особенности синтеза композиционного материала на основе диоксида кремния и углеродных нанотрубок .....	698
<b>Титенков С. В., Журавлев В. Ю.</b> Перспективы развития системы технологии гибки трубопроводов 3D-конфигурации на производстве .....	703
<b>Трифанов И. В., Суханова О. А., Мелкозеров М. Г., Жирнова Е. А., Трифанов В. И.</b> Рекуперация энергии положительно заряженных ионов .....	716
<b>Сведения об авторах</b> .....	728

## CONTENTS

### PART 1. INFORMATICS, COMPUTER TECHNOLOGY AND MANAGEMENT

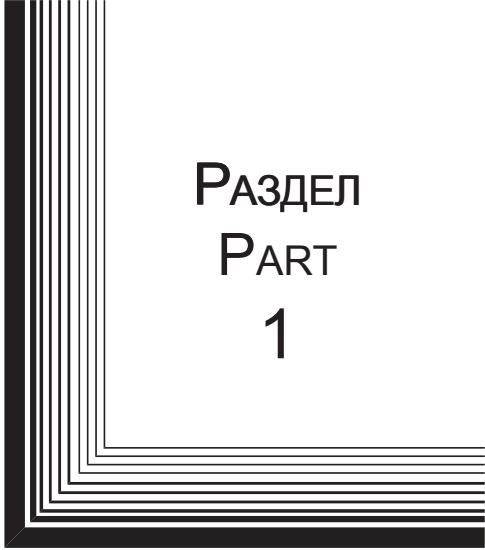
<b>Bel'skaya E. N., Medvedev A. V., Mikhov E. D., Taseiko O. V.</b> Nonparametric algorithms for restoration of random fields .....	574
<b>Brening D. V., Pashkovskaya O. V., Senashov S. I., Savostyanova I. L.</b> Mathematical modeling of the cost of secondary housing in the city of Krasnoyarsk in 2017 .....	581
<b>Osipov P. A., Osipova Y. S., Khorkush A. V., Vdovych P. E., Verkhoturova M. V.</b> Filling the gaps in the input and output data using the algorithm of nonparametric identification .....	589
<b>Pyataev A. S.</b> 3D tree modeling algorithm .....	598
<b>Frolova E. A.</b> Multilevel evaluation of quality interactive electronic technical manuals for aviation technology .....	605
<b>Frolova E. A., Ivakin Ya. A., Smirnov A. O.</b> Method of quality anomalies detection in interactive electronic technical manuals for aircraft maintenance and repair .....	613

### PART 2. AVIATION AND SPACECRAFT ENGINEERING


<b>Vorontsova E. O., Lukyanenko M. V., Kryuchkov P. A.</b> Cells wholeness inspection for solar array used on perspective spacecrafts .....	624
<b>Kovalev V. S., Manukovsky N. S., Tikhomirov A. A.</b> Modeling components of bioregenerative life support system intended for space purposes .....	631
<b>Mironenko E. D., Miheev A. E.</b> The analysis of the impact of the method of fastening on strain-stress behavior of composite overwrapped pressure vessel .....	637
<b>Nazarov V. P., Nazarova L. P., Shvetsova D. S., Savchin D. A.</b> Improvement of the method of determining cavitation characteristics of the centrifugal pumps .....	644
<b>Chernaya M. M.</b> Method for calculating the energy characteristics and solar battery parameters of high-voltage power supply systems .....	651

### PART 3. TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIAL SCIENCE

<b>Voronin A. S., Fadeev Yu. V., Ivanchenko F. S., Nemtsev I. V., Khartov S. V.</b> Transparent heaters based on the copper micromesh passivated by Graf(ph)ene oxide .....	660
<b>Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V., Menovshikov V. A.</b> Improvement of the method of calculating the universal joints transmission angle with the use of theoretical and experimental studies .....	668
<b>Zalizniak V. E., Zolotov O. A., Zolotova O. P.</b> Mathematical model of conducting nanopore for molecular dynamics simulations .....	677
<b>Kovalev I. V., Kovalev D. I., Kolesnik V. V., Losev V. V., Karaseva M. V.</b> Technological equipment analysis of automated monitoring systems of flue gases at power plants .....	683
<b>Morozov Ye. A., Trifonov S. V., Murygin A. V., Tikhomirov A. A.</b> Automatic control system of O <sub>2</sub> and H <sub>2</sub> concentrations in technological gas circuits of BTLSS space application .....	691
<b>Simunin M. M.</b> Features of synthesis of composite material based on silicon dioxide and carbon nanotubes .....	698
<b>Titenkov S. V., Zhuravlev V. Yu.</b> Prospects for the development of the system of bending pipelines of 3D configuration in production .....	703
<b>Trifanov I. V., Sukhanova O. A., Melkozerov M. G., Zhirnova E. A., Trifanov V. I.</b> Energy recuperation of positively charged ions .....	716
<b>Information about the authors</b> .....	731



РАЗДЕЛ  
PART  
1



ИНФОРМАТИКА,  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,  
COMPUTER TECHNOLOGY  
AND MANAGEMENT





УДК 504.054

Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-574-580

**Для цитирования:** Бельская Е. Н., Медведев А. В., Михов Е. Д., Тасейко О. В. Непараметрические алгоритмы восстановления случайных полей // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 4. С. 574–580. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-574-580

**For citation:** Bel'skaya E. N., Medvedev A. V., Mikhov E. D., Taseiko O. V. [Nonparametric algorithms for restoration of random fields]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 4, P. 574–580 (In Russ.). Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-574-580

## НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ПОЛЕЙ

Е. Н. Бельская<sup>1</sup>, А. В. Медведев<sup>1</sup>, Е. Д. Михов<sup>2\*</sup>, О. В. Тасейко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

\*E-mail: edmihov@mail.ru

Многочисленные задачи практики тесно связаны с необходимостью восстановления полей той или иной природы по зашумленным экспериментальным данным. Особенностью этой проблемы является то, что априорной информации чаще всего недостаточно для описания этих полей с точностью до набора вектора параметров. Это обуславливает тот факт, что по различным каналам многомерных процессов информация может быть разнотипной, следовательно, соответствовать различным уровням априорной информации. На эту проблему обращено специальное внимание. При наличии априорной информации параметрического типа целесообразно использовать соответствующие алгоритмы идентификации, когда структура моделей полей определена с точностью до набора параметров и их последующей оценки по мере поступления текущей информации. В случае, если априорной информации недостаточно, то целесообразно использовать непараметрические оценки Надарая–Ватсона для восстановления соответствующих полей. При этом существенно определить по всем каналам многомерной системы, являются ли они  $H$ - или  $T$ -процессами, т. е. процессами, для которых входные или выходные компоненты оказываются стохастически зависимыми, а эти зависимости чаще всего неизвестны.

В качестве примера использования подобных процессов рассмотрены поля распределения примесей вредных веществ в атмосферном воздухе города. В качестве алгоритма восстановления этих полей применена непараметрическая оценка функции регрессии.

**Ключевые слова:** непараметрическое моделирование, локальная аппроксимация, моделирование экологической обстановки.

## NONPARAMETRIC ALGORITHMS FOR RESTORATION OF RANDOM FIELDS

E. N. Bel'skaya<sup>1</sup>, A. V. Medvedev<sup>1</sup>, E. D. Mikhov<sup>2\*</sup>, O. V. Taseiko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup>Siberian Federal University  
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

\*E-mail: edmihov@mail.ru

Numerous practical tasks are closely connected with the need to restore fields of one nature or another from noisy experimental data. A feature of this problem is that a priori information isn't often enough for the description of this field accurately to within a set of a vector of parameters. This is due to the fact that information can be polytypic on the various channels of multidimensional processes. It means that the information matches to various levels of a priori information. In this article special attention is paid to this problem. The corresponding algorithms of identification are used in the presence of a priori information of parametric type. In the presence of a priori information of parametric type, it is advisable to use the appropriate identification algorithms when the structure of field models is defined accurately to within a set of parameters and their subsequent evaluation, as current information arrives. If a priori information isn't enough, it is expedient to the researcher to use nonparametric estimates of Nadaraya–Watson for restoration

of the respective fields. At the same time it is essential to determine whether all the channels of the multidimensional system are  $N$ - or  $T$ -processes.  $N$ - or  $T$ -processes are processes at which entrance or output components are stochastic – dependent and this dependence is unknown in most cases.

The fields of distribution of impurity of harmful substances in atmospheric air of the city are considered as an example of use of similar processes. Nonparametric assessment of function of regression is applied as an algorithm of restoration of this field.

**Keywords:** nonparametric modeling, local approximation, modeling of an ecological situation.

**Введение.** При решении задач практики встречается необходимость в восстановлении случайных полей по зашумленным данным. Восстанавливаемое поле представляет собой неизвестную стохастическую зависимость между входными и выходными переменными. Общая схема восстанавливаемого случайного поля представлена на рис. 1.

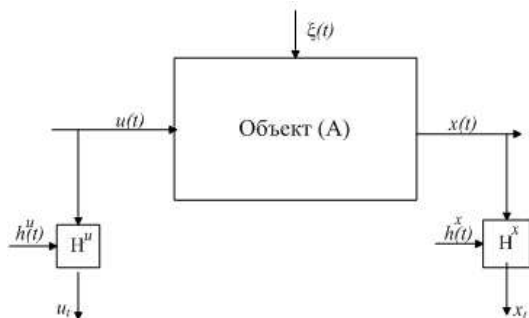


Рис. 1. Общая схема восстанавливаемого случайного поля

Fig. 1. General scheme of a random field being restored

На рис. 1 приняты следующие обозначения:  $A$  – неизвестный оператор, влияющий на внешний вид поля;  $x(t)$  – выходная переменная;  $u(t)$  – входная информация;  $\xi(t)$  – случайное воздействие;  $(t)$  – непрерывное время;  $H^u$ ,  $H^x$  – каналы связи, соответствующие различным переменным, включающие в себя средства контроля, приборы для измерения наблюдаемых переменных;  $u_i$ ,  $x_i$  – означают измерение  $u(t)$ ,  $x(t)$  в дискретное время;  $h^u(t)$ ,  $h^x(t)$  – случайные помехи измерений соответствующих переменных.

Восстановление случайного поля относится к задаче идентификации стохастического процесса. Алгоритм восстановления случайного поля существенно зависит от имеющейся априорной информации о процессе.

**Уровни априорной информации.** Рассмотрим процессы с различным уровнем априорной информации [1; 2]:

1. Процессы с параметрической неопределенностью. Параметрический уровень априорной информации предполагает наличие параметрической структуры модели и некоторых характеристик случайных помех, обычными из которых являются нулевое математическое ожидание и ограниченная дисперсия. Для оценки параметров используются чаще всего разнообразные итеративные вероятностные процедуры. При этих условиях решается задача идентификации в узком смысле (идентификация в узком и широком смыслах рассматривалась авторами ранее в работах [3–6]).

2. Процессы с непараметрической неопределенностью. Непараметрический уровень априорной информации не предполагает наличие модели, но требует наличие некоторых сведений качественного характера о процессе, например, однозначность либо неоднозначность его характеристик, линейность для динамических процессов либо характер его нелинейности. Для решения задач идентификации на этом уровне априорной информации (идентификация в широком смысле) применяются методы непараметрической статистики.

3. Процессы с параметрической и непараметрической неопределенностью. Важными с точки зрения практики являются задачи идентификации многосвязных систем в условиях, когда объем исходной информации не соответствует ни одному из вышеописанных типов. Например, для отдельных характеристик многосвязного процесса на основании энергетических либо физико-химических закономерностей, закона сохранения массы, балансовых соотношений могут быть выведены параметрические закономерности, а для других – нет. Таким образом, мы находимся в ситуации, когда задача идентификации формулируется в условиях и параметрической, и непараметрической априорной информации. Тогда и модели представляют собой взаимосвязанную систему параметрических и непараметрических соотношений.

**Непараметрическая оценка функции регрессии.** В качестве непараметрического алгоритма восстановления случайных полей предложен алгоритм непараметрической оценки функции регрессии [7; 8], основанный на методе ядерного сглаживания [9–12].

Основная идея ядерного сглаживания заключается в следующем: вокруг аппроксимирующей точки строится прямоугольник, каждому элементу выборки назначается вес (чем больше расстояние между элементом выборки и точкой построения прогноза, тем меньше вес), а затем происходит усреднение взвешенных значений. В случае использования регрессии нулевого порядка взвешенные значения последовательности, попавшие в ядро, усредняются.

Ядерная оценка плотности использует те же принципы, что и ядерное сглаживание, однако её алгоритм имеет некоторые особенности. Рассмотрим выражение, определяющее процедуру оценки функции в точке  $u$ :

$$\hat{f}_h(u) = \frac{\sum_{i=1}^n f_i \Phi((u - u_i)/c_s)}{\sum_{i=1}^n \Phi((u - u_i)/c_s)}, \quad (1)$$

где  $x$  – последовательность длиной  $n$ ;  $c_s$  – коэффициент сглаживания;  $\Phi$  – ядерная функция.

Ядерная функция  $\Phi(*)$  удовлетворяет следующим условиям:

$$\frac{1}{c_s} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi\left(\frac{t-t_i}{c_s}\right) dt = 1, \quad (2)$$

$$\lim_{c_s \rightarrow 0} \frac{1}{c_s} \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t) \Phi\left(\frac{t-t_i}{c_s}\right) dt = \varphi(t_i). \quad (3)$$

Как следует из выражения (1), плотность в точке  $u$  вычисляется как сумма значений ядра для величин, определяемых разностями между значением  $u$  и значениями последовательности. При этом точки  $u$ , в которых вычисляется плотность, могут не совпадать со значениями элементов выборки.

**Постановка задачи оценки экологической ситуации в городе Красноярске.** В качестве примера восстановления случайного поля с использованием непараметрических алгоритмов был взят процесс восстановления поля распределения загрязняющих веществ в атмосферном воздухе города Красноярска.

Оценка качества атмосферного воздуха и прогноз его изменения, организация рациональной системы природопользования, главной задачей которой является поиск и разработка путей оптимизации взаимодействия общества с окружающей природной средой, являются приоритетными направлениями в области обеспечения экологической безопасности городской среды [13–15]. Проблема обеспечения чистоты воздушного бассейна является особо важной, так как представляет угрозу здоровью человека и всей окружающей среде в целом. В городской среде источники загрязнения атмосферы многообразны, а состав выбросов отличается многокомпонентностью. На экологическое состояние города Красноярска основное

влияние оказывают промышленные предприятия, которые находятся непосредственно в селитебных зонах, и насыщенный транспортный поток.

Высокая концентрация источников энергетического и химического воздействия и скорость накопления загрязнений на сегодняшний день значительно превышают возможности самоочищения атмосферы, что ведет ко многим отрицательным последствиям, в том числе к высоким уровням заболеваемости населения, снижению качества жизни и т. п., поэтому изучение процессов, происходящих в атмосфере, контроль и выявление источников, принятие мер к снижению загрязнения или его полному устранению можно считать жизненно важной задачей.

Моделирование пространственного распространения загрязняющих веществ в воздухе городской среды является необходимым этапом при разработке управленческих решений в области управления качеством экологических систем.

В работах [3–6] авторами выполнены сценарные расчеты содержания оксида азота, формальдегида и оксида углерода в атмосферном воздухе города Красноярска. В качестве входных данных использовались время, широта, долгота, направление и скорость ветра, в качестве обучающей выборки были взяты данные со стационарных постов наблюдения за загрязнением атмосферы Среднесибирского УГМС. Распределение их на территории города рассматривалось в работах [3; 4] и представлено на рис. 2. Цифрами указаны порядковые номера постов наблюдения согласно плану города. Для моделирования содержания примесей в атмосферном воздухе города был использован непараметрический метод ядерной аппроксимации.

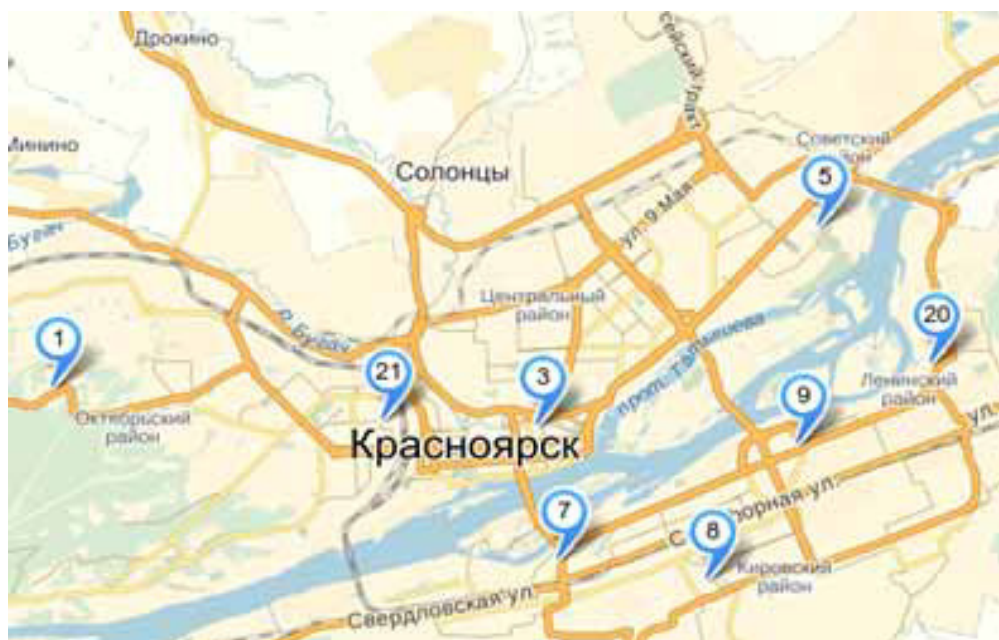


Рис. 2. Расположение основных постов наблюдения за загрязнением атмосферы в городе Красноярске

Fig. 2. Arrangement of the main posts of observation in Krasnoyarsk

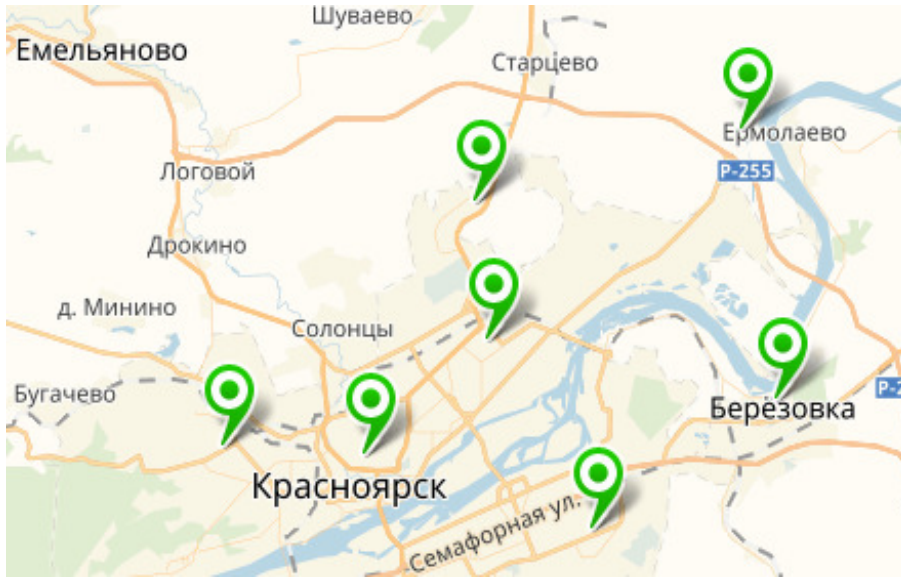


Рис. 3. Расположение дополнительных постов наблюдения за загрязнением атмосферы в городе Красноярске

Fig. 3. Arrangement of additional posts of observation in Krasnoyarsk

**Предложенный метод моделирования экологической обстановки.** В основу предложенной в работе модели положен метод непараметрической оценки функции регрессии. Предложенная модель дополнительно учитывает плотность застройки города, для определения которой использовались спутниковые снимки и алгоритм выделения граней, и включает в себя две составляющие: модель, построенную на основании данных основных стационарных постов наблюдения за загрязнением атмосферы [3–6], и модель, построенную на основании данных с семи дополнительных автоматизированных постов региональной наблюдательной сети подсистемы мониторинга загрязнения атмосферного воздуха КГБУ «Центр реализации мероприятий по природопользованию и охране окружающей среды Красноярского края», распределение которых по территории города представлено на рис. 3. После разработки этих составляющих они были объединены в единую модель распространения примесей в атмосферном воздухе.

Модель, основанная на данных основных стационарных постов наблюдения [3–6], имеет следующий вид:

$$x_{s+1}^{st} = \delta(u_{1,s+1}, u_{2,s+1}) \times \frac{\sum_{i=1}^s x_i^{st} \Phi_1\left(\frac{u_{1,s+1} - u_{1,i}}{c_{s1}}\right) \Phi_1\left(\frac{u_{2,s+1} - u_{2,i}}{c_{s2}}\right) \Phi_2\left(\frac{t_{s+1} - t_i}{c_{s3}}\right)}{\sum_{i=1}^s \Phi_1\left(\frac{u_{1,s+1} - u_{1,i}}{c_{s1}}\right) \Phi_1\left(\frac{u_{2,s+1} - u_{2,i}}{c_{s2}}\right) \Phi_2\left(\frac{t_{s+1} - t_i}{c_{s3}}\right)}, \quad (4)$$

где  $u_{1,i}$  – долгота точки измерения;  $u_{2,i}$  – широта точки измерения;  $t_i$  – время измерения;  $i = \overline{1, s}$  – номер измерения;  $s$  – величина выборки;  $\delta(u_{1,s+1}, u_{2,s+1})$  – плотность застройки в прогнозируемой точке (безразмерный параметр, задаваемый исследователем, начинается с 1);  $\Phi_1$  – гауссова ядерная функция;  $\Phi_2$  – треугольная ядерная функция:

$$\Phi_1(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-u^2 / 2); \quad (5)$$

$$\Phi_2(u) = \begin{cases} 1 - |u|, & \text{если } |u| \leq 1, \\ 0, & \text{если } |u| > 1. \end{cases} \quad (6)$$

Чтобы при построении прогноза в любой точке использовались данные со всех постов наблюдения (так как число наблюдений в единицу времени невелико), в качестве ядерной функции для широты и долготы измерения была использована гауссова ядерная функция, так как данная функция не обращается в 0.

Также были учтены направление и скорость ветра. Изменяя коэффициенты размытости ядер  $c_{s1}$  и  $c_{s2}$ , можно менять форму «колокола», под который будут попадать точки для построения модели [1–6; 9].

Модель, основанная на данных дополнительных постов наблюдения, имеет следующий вид:

$$x_{s+1}^{\text{din}} = \delta(p_{1,s+1}, b_{2,s+1}) \times \frac{\sum_{i=1}^m x_i^{\text{din}} \Phi_1\left(\frac{p_{1,s+1} - p_{1,i}}{c_{s1}}\right) \Phi_1\left(\frac{b_{2,s+1} - b_{2,i}}{c_{s2}}\right) \Phi_2\left(\frac{t_{s+1} - t_i}{c_{s3}}\right)}{\sum_{i=1}^m \Phi_1\left(\frac{p_{1,s+1} - p_{1,i}}{c_{s1}}\right) \Phi_1\left(\frac{b_{2,s+1} - b_{2,i}}{c_{s2}}\right) \Phi_2\left(\frac{t_{s+1} - t_i}{c_{s3}}\right)}, \quad (7)$$

где  $p_{1,i}$  – долгота точки измерения;  $b_{2,i}$  – широта точки измерения;  $t_i$  – время измерения;  $i = \overline{1, s}$  – номер измерения;  $m$  – величина выборки;  $\delta(p_{1,s+1}, b_{2,s+1})$  – плотность застройки в прогнозируемой точке (безразмерный параметр, задаваемый исследователем, начинается с 1).

В обучающую выборку вышерассмотренных моделей входят только те данные с постов наблюдения за загрязнением атмосферы, которые были получены в том же месяце, в котором необходимо сделать



прогноз, чтобы отследить разницу между временами года.

Объединяя модели, основанные на данных основных стационарных (4) и дополнительных (7) постов наблюдений, была получена итоговая модель для оценки экологической ситуации в городе Красноярске:

$$x_{s+1}^{st} = \delta(u_{1,s+1}, u_{2,s+1}) \frac{\sum_{i=1}^s x_i^{st} sv_i + \sum_{i=1}^m x_i^{din} dv_i}{\sum_{i=1}^s sv_i + \sum_{i=1}^m dv_i}, \quad (8)$$

где

$$dv_i = \Phi_1 \left( \frac{p_{1,s+1} - p_{1,i}}{c_{s1}} \right) \Phi_1 \left( \frac{b_{2,s+1} - b_{2,i}}{c_{s2}} \right) \Phi_2 \left( \frac{t_{s+1} - t_i}{c_{s3}} \right), \quad (9)$$

$$sv_i = \Phi_1 \left( \frac{u_{1,s+1} - u_{1,i}}{c_{s1}} \right) \Phi_1 \left( \frac{u_{2,s+1} - u_{2,i}}{c_{s2}} \right) \Phi_2 \left( \frac{t_{s+1} - t_i}{c_{s3}} \right). \quad (10)$$

**Результаты моделирования.** С помощью предложенной модели были выполнены сценарные расчеты содержания различных примесей в атмосферном воздухе города Красноярска. На рис. 4–6 представле-

ны результаты моделирования по диоксиду азота, пыли и формальдегиду.

Распределение концентраций  $\text{NO}_2$  в Красноярске по результатам математического моделирования представлено на рис. 4. Согласно выполненным расчетам наибольшие уровни загрязнения наблюдаются в Центральном и Советском районах города, что объясняется наибольшей плотностью автотранспортных потоков. Тёмным цветом отображена область с наибольшей концентрацией диоксида азота  $C_{\text{NO}_2} > 0,053 \text{ мг/м}^3$ , серым цветом – область с концентрацией  $C_{\text{NO}_2} > 0,046 \text{ мг/м}^3$ , предельно допустимая среднесуточная концентрация по диоксиду азота составляет  $C_{\text{пдксс}} = 0,04 \text{ мг/м}^3$ .

Распределение концентраций пыли в городе Красноярске по результатам математического моделирования представлено на рис. 5. Превышение установленного норматива объясняется возникающим над городом куполом тепла, который способствует улавливанию различных загрязнителей, особенно небольших твердых частиц, наибольшие значения концентраций наблюдаются в Железнодорожном и Центральном районах.

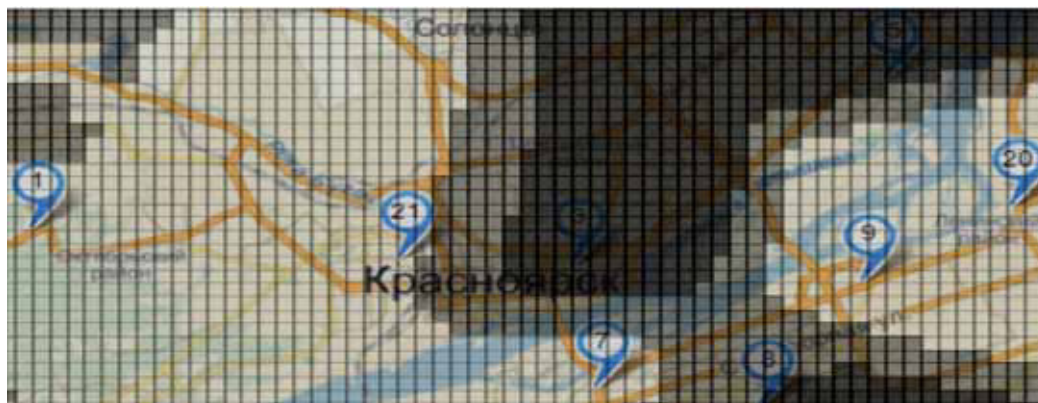


Рис. 4. Пространственное распределение  $\text{NO}_2$  в городе Красноярске 18.03.2014 г. (расчетные данные)

Fig. 4. Distribution of  $\text{NO}_2$  in Krasnoyarsk, 18.03.2014 (mathematical model)

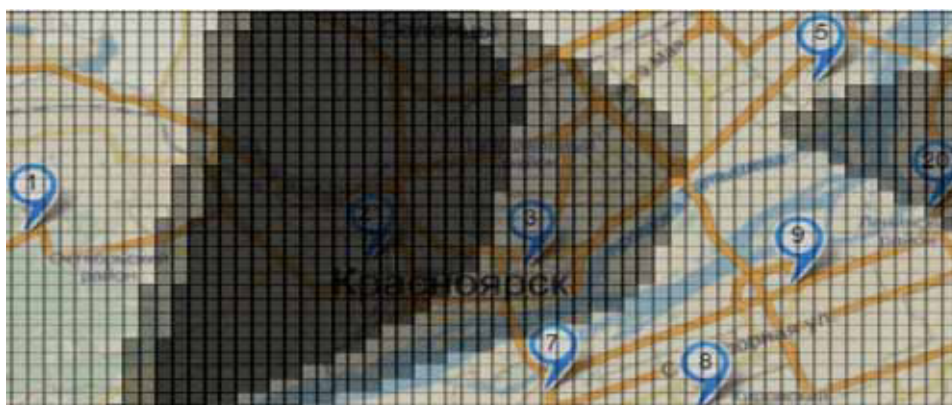


Рис. 5. Пространственное распределение пыли в городе Красноярске 15.02.2014 г. (расчетные данные)

Fig. 5. Distribution of dust in Krasnoyarsk, 15.02.2014 (mathematical model)

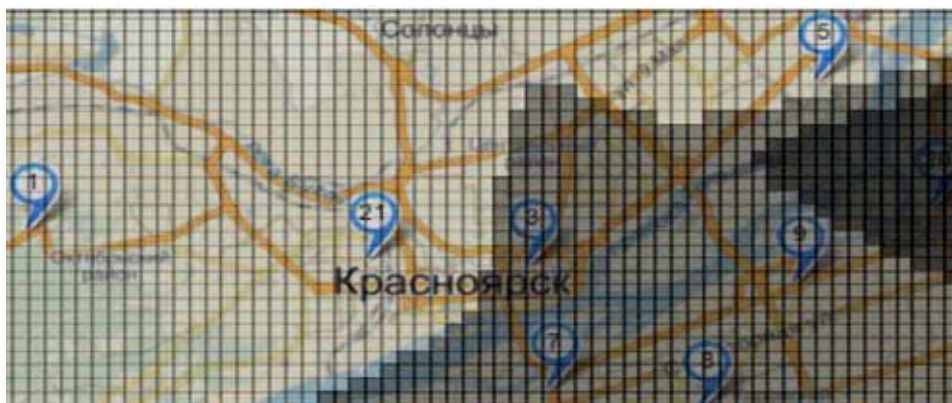


Рис. 6. Пространственное распределение формальдегида в городе Красноярске 19.06.2014 г. (расчетные данные)

Fig. 6. Distribution of formaldehyde in Krasnoyarsk, 19.06.2014 (mathematical model)

Тёмным цветом отображена область с наибольшей концентрацией пыли  $C_{\text{пыли}} > 0,38 \text{ мг/м}^3$ , серым цветом отображена область со средней концентрацией  $0,38 \text{ мг/м}^3 > C_{\text{пыли}} > 0,28 \text{ мг/м}^3$ , предельно допустимая среднесуточная концентрация по взвешенным веществам составляет  $C_{\text{пдксс}} = 0,15 \text{ мг/м}^3$ .

Распределение концентраций формальдегида в городе Красноярске по результатам математического моделирования представлено на рис. 6.

Формирование высоких концентраций формальдегида в атмосфере происходит в основном вследствие протекания окислительно-восстановительных реакций с участием метана, продуктов природного топлива, оксидов азота. При этом, чем выше температура воздуха, тем интенсивнее протекают реакции и выше концентрация формальдегида. На рис. 6 темным цветом отображена область с концентрацией формальдегида  $C_{\text{форм}} > 0,062 \text{ мг/м}^3$ , серым цветом – область с концентрацией  $C_{\text{форм}} > 0,052 \text{ мг/м}^3$ , предельно допустимая среднесуточная концентрация по формальдегиду составляет  $C_{\text{пдксс}} = 0,01 \text{ мг/м}^3$ , т. е. наблюдается значительное превышение установленного норматива практически во всех районах города. Наиболее высокие концентрации вещества наблюдаются в часы пик или в условиях фотохимического смога.

Для оценки точности модели использовался метод скользящего экзамена, при котором последовательно каждая  $i$ -я точка исходной обучающей выборки принимается в качестве контрольной ситуации с последующим исключением её из процесса обучения, и по оставшейся части строится дерево, с помощью которого и осуществляется прогнозирование. Результаты расчетов согласуются с данными натурных наблюдений, т. е. разработанная модель в общей мере отражает экологическую ситуацию в городе. По результатам проверки вышеописанным методом использование параметра плотности застройки улучшило качество построенной модели на 10–15 %.

Для оценки эффективности алгоритма моделирования использовалось значение ошибки модели, которое рассчитывалась по следующему алгоритму:

– построенная модель экологической обстановки с использованием данных всех постов наблюдения (как

основных, так и дополнительных) принимается за истину;

– поочередно исключается из модели по одному стационарному основному посту и рассчитывается, насколько модель стала грубее;

– усредняются полученные результаты снижения точности модели.

Усовершенствование модели с помощью учёта данных с семи дополнительных автоматизированных постов региональной наблюдательной сети мониторинга загрязнения атмосферного воздуха КГБУ «Центр реализации мероприятий по природопользованию и охране окружающей среды Красноярского края» позволило улучшить качество прогноза на 20–23 %.

**Заключение.** Настоящее исследование открывает перспективу формулировки и решения различных задач, имеющих непосредственное отношение к экологии города. Очевидна необходимость дальнейшего развития данного направления. Несмотря на очевидные преимущества передвижных постов наблюдения перед стационарными, на данный момент не существует единого способа построения их маршрутов. Далее авторами планируется разработка маршрутов движения передвижных постов наблюдения, что будет способствовать сокращению времени на принятие управленческих решений в области обеспечения качества экологических систем и, как следствие, сокращению уровня загрязнения атмосферного воздуха в городе.

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 18-47-240006 «Методы и информационные технологии оценки рисков развития социально-природно-техногенных систем промышленного региона».

**Acknowledgments.** This work was funded by Russian Foundation for Basic Researches, Government of Krasnoyarsk Territory, Krasnoyarsk Regional Fund of Science, as part of the research project “Methods and informational technologies of social-natural-technogenic system risk assessment for industrial region” No. 18-47-240006.

## Библиографические ссылки

1. Медведев А. В. Основы теории непараметрических систем. Идентификация, управление, принятие решений : монография / СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2018. 732 с.
2. Медведев А. В. Основы теории адаптивных систем : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2015. 526 с.
3. Оценка экологической ситуации с применением методов непараметрического моделирования / Е. Н. Бельская [и др.] // Экология и промышленность России. 2017. Т. 8. С. 54–58.
4. Применение методов непараметрического моделирования в решении задач экологического мониторинга / Е. Н. Бельская [и др.] // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17, № 1. С. 10–18.
5. Восстановление полей загрязняющих веществ в городской среде / Е. Н. Бельская [и др.] // Решетневские чтения : материалы XX Междунар. науч.-практ. конф. (09–12 нояб. 2016, г. Красноярск). В 2 ч. Ч. 2 / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. С. 286–288.
6. Оценка экологического состояния городской среды на основе ядерной аппроксимации / Е. Н. Бельская [и др.] // Безопасность в техносфере. 2017. Т. 6, № 4. С. 13–20.
7. Надарая Э. А. Непараметрическое оценивание плотности вероятностей и кривой регрессии. Тбилиси : Изд-во Тбилис. ун-та, 1983. 194 с.
8. Надарая Э. А. Непараметрические оценки кривой регрессии // Некоторые вопросы теории вероятностных процессов. 1965. Вып. 5. С. 56–68.
9. Кошкин Г. М., Пивен И. Г. Непараметрическая идентификация стохастических объектов PDF : монография. Хабаровск : Изд-во РАН. Дальневосточное отделение, 2009. 336 с.
10. Хардле В. Прикладная непараметрическая регрессия. М. : Мир, 1993. 349 с.
11. Цыпкин Я. З. Основы теории обучающихся систем. М. : Наука, 1970. 252 с.
12. Васильев В. А., Добровидов А. В., Кошкин Г. М. Непараметрическое оценивание функционалов от распределений стационарных последовательностей. М. : Наука, 2004. 508 с.
13. Экологический мониторинг окружающей среды / Ю. А. Комиссаров [и др.]. М. : Химия, 2005. 365 с.
14. Антропов К. М., Казмер Ю. И., Вараксин А. Н. Описание пространственного распределения загрязнения атмосферного воздуха промышленного центра методом LandUseRegression (обзор) // Экологические системы и приборы. 2010. № 1. С. 28–41.
15. Информационная система для моделирования распространения загрязнения атмосферного воздуха с использованием ArcGIS [Электронный ресурс] // Молодой ученый. URL: <http://www.moluch.ru/conf/tech/archive/4/895> (дата обращения: 14.07.2018).
16. tion, managements, decision-making]. Krasnoyarsk, Reshetnev University Publ., 2018, 732 p.
17. 2. Medvedev A. V. *Osnovi teorii adaptivnykh sistem* [Bases of the theory of adaptive systems]. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2015, 526 p.
18. 3. Bel'skaya E. N. et al. [Environmental assessment using by non-parametric modeling]. *Ecology and industry of Russia*. 2017, Vol. 8, P. 54–58 (In Russ.).
19. 4. Bel'skaya E. N. et al. [Application of non-parametric modeling in solving problems of environmental monitoring]. *Vestnik SibGAU*. 2016, Vol. 17, No. 1. P. 10–18 (In Russ.).
20. 5. Bel'skaya E. N. et al. *Vosstanovlenie polei zagriazniyashikh veshchestv v gorodskoi srede* [Reconstruction of air pollution fields in the urban territory]. *Reshetnev readings: materials of XX of the International scientific and practical conference*. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2016, Part 2, P. 286–287 (In Russ.).
21. 6. Bel'skaya E. N. et al. Urban environmental assessment with using nuclear approximation]. *Safety in a technosphere*. 2017, Vol. 6, No. 4, P. 13–20 (In Russ.).
22. 7. Nadaraya E. A. *Neparametricheskoe otsenivanie plotnosti veroyatnostei i krivoi regressii*. [Nonparametric estimation of density of probabilities and curve regression]. Tbilisi, Tbil. Un-t Publ., 1983, 194 p.
23. 8. Nadaraya E. A. [Nonparametric estimation of curve regression]. *Some questions of the theory of probabilistic*. 1965, Vol. 5, P. 56–68.
24. 9. Koshkin G. M., Piven I. G. *Neparametricheskaya identifikatsiya stokhasticheskikh ob'ektov PDF* [Nonparametric identification of stochastic objects PDF]. Khabarovsk, RAN Dal'nevostochnoe отделение Publ., 2009, 336 p.
25. 10. Hardle V. *Prikladnaya neparametricheskaya regressiya* [Applied nonparametric regression]. Moscow, Mir Publ., 1993, 349 p.
26. 11. Zipkin Ya. *Osnovy teorii obuchayushchikh sistem* [Bases of the theory of the trained systems]. Moscow, Nauka Publ., 1970, 252 p.
27. 12. Vasilyev V. A., Dobrovodov A. V., Cat's G. M. *Neparametricheskoe otsenivanie funktsionalov ot raspredeleniy statsionarnykh posledovatel'nostei* [Nonparametric estimation of functionalities from distributions of the stationary sequences]. Moscow, Nauka Publ., 2004, 508 p.
28. 13. Komissarov Ju. A. et al. *Ekologicheskyy monitoring okruzhaushey sredi* [Ecological monitoring of the environment]. Vol. 1. Moscow, Khimiya Publ., 2005, 365 p.
29. 14. Antropov K. M., Kazmer Y. I., Varaksin A. N. [Description of spatial distribution of pollution of atmospheric air of the industrial center by the Land Use Regression method (review)]. *Ekologicheskie sistemy i pribory*. 2010, No. 1, P. 28–41 (In Russ.).
30. 15. *Informatsionnaya sistema dlya modelirovaniya rasprostraneniya zagryazneniya atmosfornogo vozdukhha s ispolzovaniem ArcGIS* [Young scientist. Information system for the modeling of air pollution using ArcGIS] (In Russ.). Available at: <http://www.moluch.ru/conf/tech/archive/4/895/> (accessed: 14.07.2018).

## References

1. Medvedev A. V. *Osnovi teorii neparametricheskikh sistem. Identifikatsiya, upravlenie, prinyatiye resheny* [Bases of the theory of nonparametric systems. Identifica-

© Бельская Е. Н., Медведев А. В.,  
Михов Е. Д., Тасейко О. В., 2018

**Для цитирования:** Бренинг Д. В., Пашковская О. В., Сенашов С. И., Савостьянова И. Л. Математическое моделирование стоимости вторичного жилья в городе Красноярске в 2017 году // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 4. С. 581–588. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-581-588

**For citation:** Brening D. V., Pashkovskaya O. V., Senashov S. I., Savostyanova I. L. [Mathematical modeling of the cost of secondary housing in the city of Krasnoyarsk in 2017]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 4, P. 581–588 (In Russ.). Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-581-588

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОИМОСТИ ВТОРИЧНОГО ЖИЛЬЯ В ГОРОДЕ КРАСНОЯРСКЕ В 2017 ГОДУ

Д. В. Бренинг, О. В. Пашковская, С. И. Сенашов\*, И. Л. Савостьянова

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

\*E-mail: sen@sibsau.ru

*Собраны и проанализированы данные по стоимости вторичного жилья в городе Красноярске за 2017 г. Количество объектов – 1609 квартир. Рассмотрены количественные характеристики однокомнатных – четырехкомнатных квартир. Цель работы – выявить факторы, оказывающие существенное влияние на формирование цены квартиры, и построить зависимость стоимости квартиры от этих факторов. Математический аппарат для анализа рассматриваемых зависимостей – корреляционно-регрессионный анализ. Из-за значимого разброса данных этот массив разбит по группам квартир с разным количеством комнат. Результаты статистического анализа полученных совокупностей представлены в виде гистограмм частот. Проанализированы показатели, влияющие на стоимость квартиры. Показано, что существенными являются только 4 фактора: этаж, площадь общая, площадь жилая и площадь кухни. Вычисление проводилось с помощью Excel. Для каждой выборки были рассчитаны основные статистические характеристики. На их основе были сделаны статистические выводы о характере распределения совокупностей. Показано, что для совокупностей однокомнатных, двухкомнатных и трехкомнатных квартир медиана незначительно меньше среднего значения выборки, мода немного меньше медианы, отсутствует длинный хвост распределения. Поэтому среднее значение отражает «центральное значение». Кривая распределения имеет более высокую и острую вершину по сравнению с нормальным распределением. Для однокомнатных и двухкомнатных квартир отличие средней стоимости одного квадратного метра не является статистически значимым. Поэтому в группах одно- и двухкомнатных квартир средние цены одного квадратного метра примерно равны. Такой же эффект – для пары трехкомнатных и четырехкомнатных квартир. В остальных парах различия статистически значимы. Проведенный анализ показывает, что наиболее часто выставляемые на продажу квартиры имеют стоимость, близкую к средней. При разбиении совокупности квартир на группы по числу комнат получаются выборки, эмпирические распределения которых близки к нормальным, и, соответственно, построение регрессионных моделей для таких совокупностей обоснованно. Проведенное исследование подтверждает высокое влияние на цену квартиры, предлагаемой к продаже, общей площади и умеренное влияние остальных факторов. Построенные модели адекватно описывают опытные данные.*

*Ключевые слова:* стоимость жилья, МНК, линейная регрессионная многофакторная модель.

## MATHEMATICAL MODELING OF THE COST OF SECONDARY HOUSING IN THE CITY OF KRASNOYARSK IN 2017

D. V. Brening, O. V. Pashkovskaya, S. I. Senashov\*, I. L. Savostyanova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: sen@sibsau.ru

*In this article the authors collected and analyzed data on the cost of second housing in the city of Krasnoyarsk in 2017. The number of the objects for analysis accounted for 1609 apartments. The authors considered the quantitative characteristics of one-room, two-room, three-room and four-room apartments. The purpose of the work is to identify the factors that have a significant impact on the formation of the price of the apartment, and build a dependence of the cost of the apartment on these factors. The mathematical apparatus for the analysis of the considered dependences is correlation and regression analysis. Because of the significant spread of data, this array is divided into groups*



of apartments with different number of rooms. The results of statistical analysis of the obtained sets are presented in the form of frequency histograms. The indicators that affect the cost of the apartment are analyzed. It is shown that only 4 factors are essential: a floor, a total area, a living room and a kitchen. The calculation was performed using MS Excel. The main statistical characteristics for each sample were calculated in the article. On the basis of these characteristics statistical conclusions about the nature of the distribution of populations were made. The authors showed that the median for one-, two- and three-room apartment complexes is slightly less than the average value of the sample, the fashion is slightly less than the median, and there is no long tail of the distribution. And the average value reflects the "Central value". The distribution curve has a higher and sharper vertex than the normal distribution. For one-room and two-room apartments the difference between the average costs of one square meter is not statistically significant. Therefore, in groups of one- and two-bedroom apartments average prices per square meter are approximately equal. The same effect is for a pair of two-bedroom and four-bedroom apartments. In other pairs differences are statistically significant. The analysis shows that the most frequently offered for sale apartments have a cost close to the average. When dividing a set of apartments into groups by the number of rooms, samples are obtained, the empirical distributions of which are close to normal and, accordingly, the construction of regression models for such sets is justified. The study confirms the high impact on the price of the apartment offered for sale, the total area and the moderate influence of other factors. The constructed models adequately describe the experimental data.

**Keywords:** housing cost, LSM, linear regression multifactor model.

**Введение.** Предметом исследований выступают стоимость квартир, продававшихся в 2017 году в городе Красноярске, и факторы, влияющие на ее формирование. Были приняты к рассмотрению количественные характеристики однокомнатных, двухкомнатных, трехкомнатных и четырехкомнатных квартир.

Цель работы – выявить факторы, оказывающие существенное влияние на формирование цены квартиры, и построить зависимость стоимости квартиры от этих факторов. В качестве математического аппарата для анализа рассматриваемых зависимостей был выбран корреляционно-регрессионный анализ.

**Постановка задачи.** Для анализа были взяты данные из базы данных за 2017 о стоимости квартир в городе Красноярске [1]. Количество наблюдений – 1609. Эта работа продолжает серию статей авторов [2–15] и тесно связанные с ними тематикой работы других авторов. Из-за значимого разброса данных этот массив целесообразно изучать не в совокупности, а по группам квартир с разным количеством комнат. Для проведения анализа и получения необходимых зависимостей были рассмотрены совокупности однокомнатных, двухкомнатных, трехкомнатных и четырехкомнатных квартир. Результаты статистического анализа полученных совокупностей представлены в виде гистограммы полигонов частот (рис. 1–7).

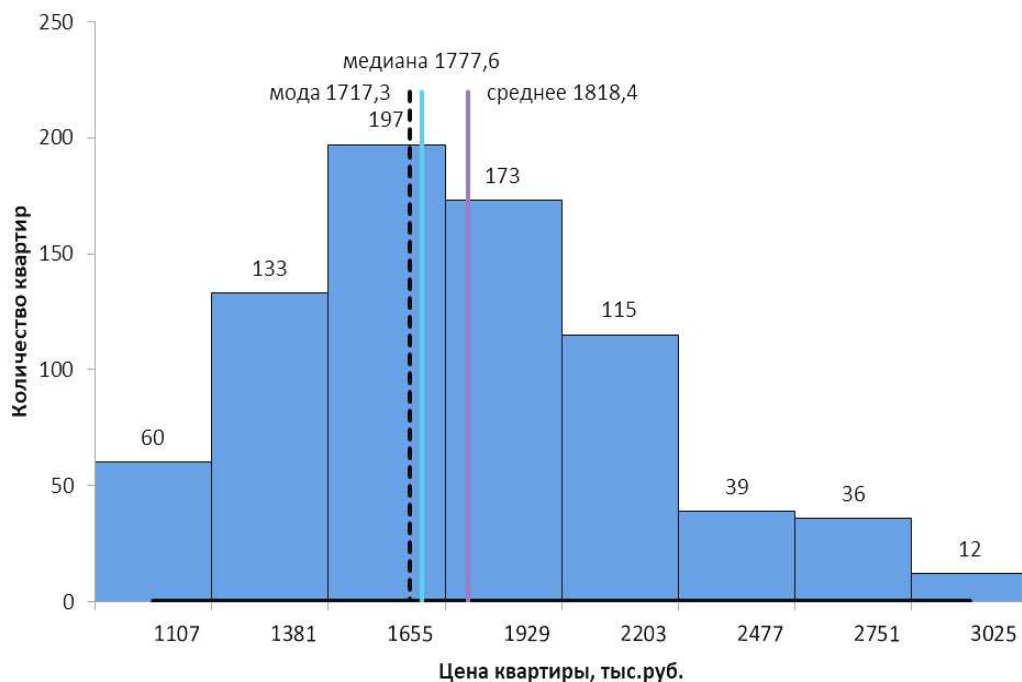


Рис. 1. Распределение однокомнатных квартир по цене

Fig. 1. Distribution of one-room apartments by price

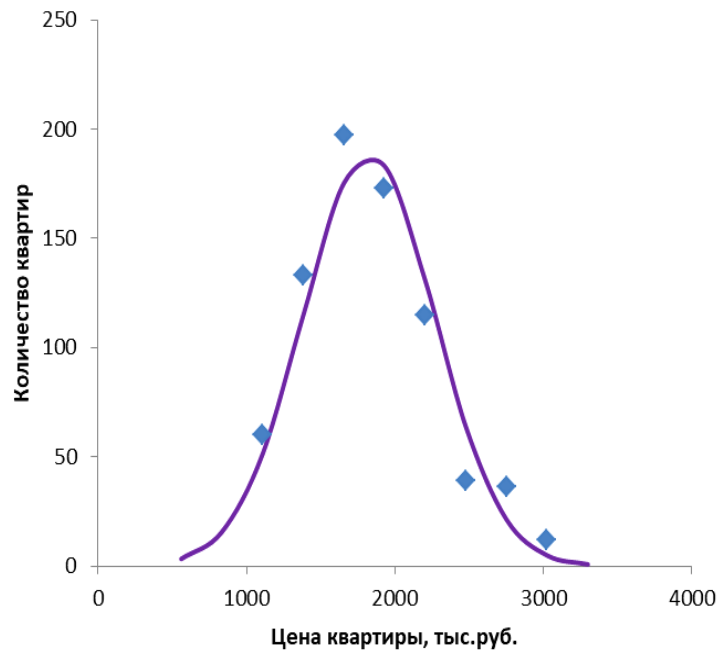


Рис. 2. Сравнение эмпирического распределения цены однокомнатных квартир с теоретическим (нормальным) распределением

Fig. 2. Comparison of the empirical distribution of the price of one-room apartments with a theoretical (normal) distribution

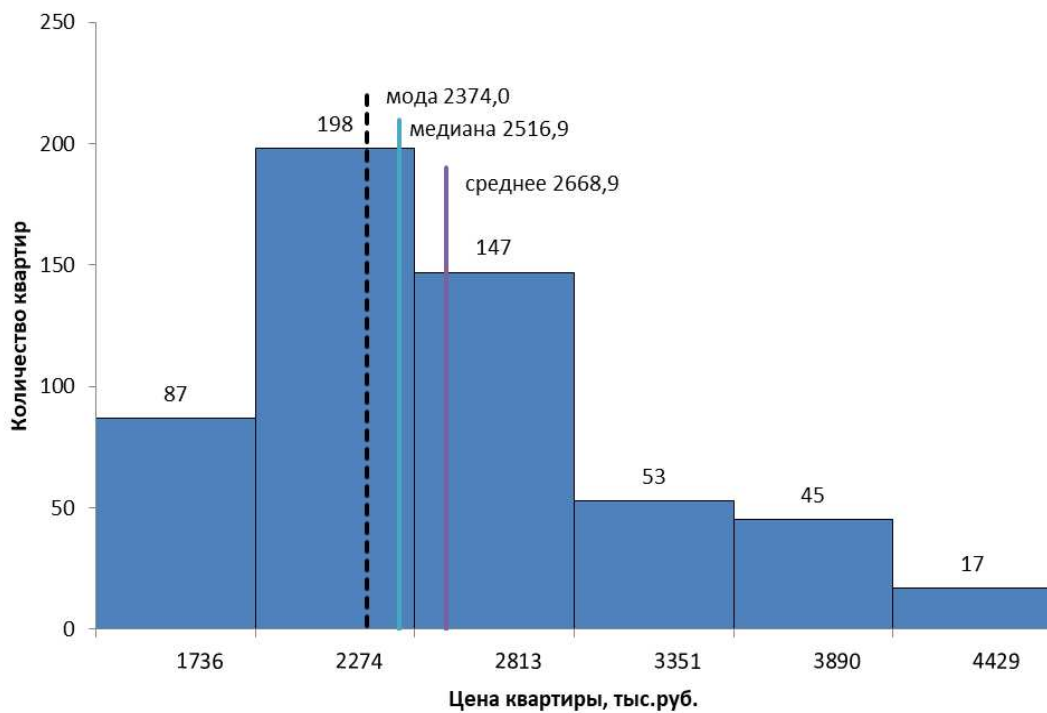


Рис. 3. Распределение двухкомнатных квартир по цене

Fig. 3. Distribution of two-room apartments by price

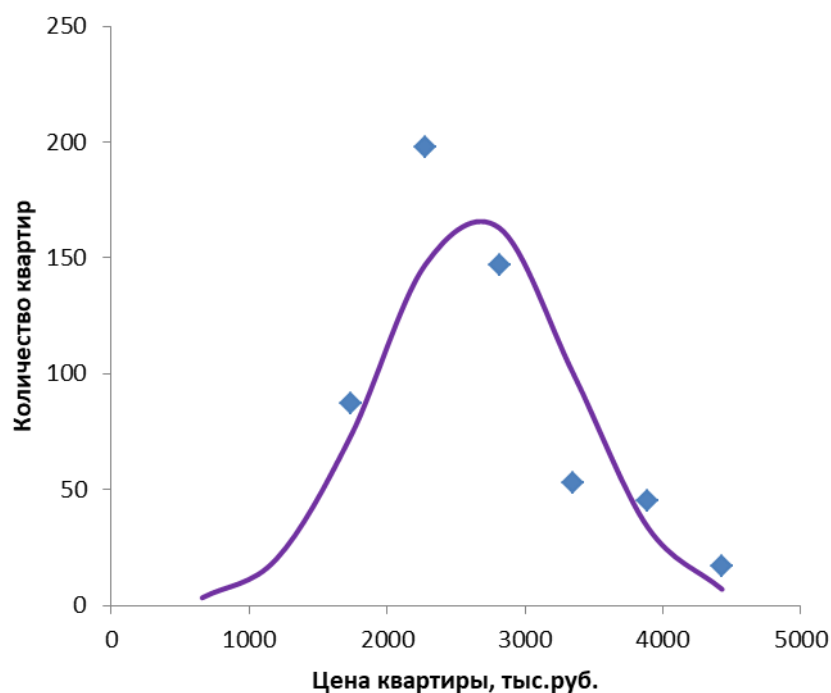


Рис. 4. Сравнение эмпирического распределения цены двухкомнатных квартир с теоретическим (нормальным) распределением

Fig. 4. Comparison of the empirical distribution of the price of two-room apartments with a theoretical (normal) distribution

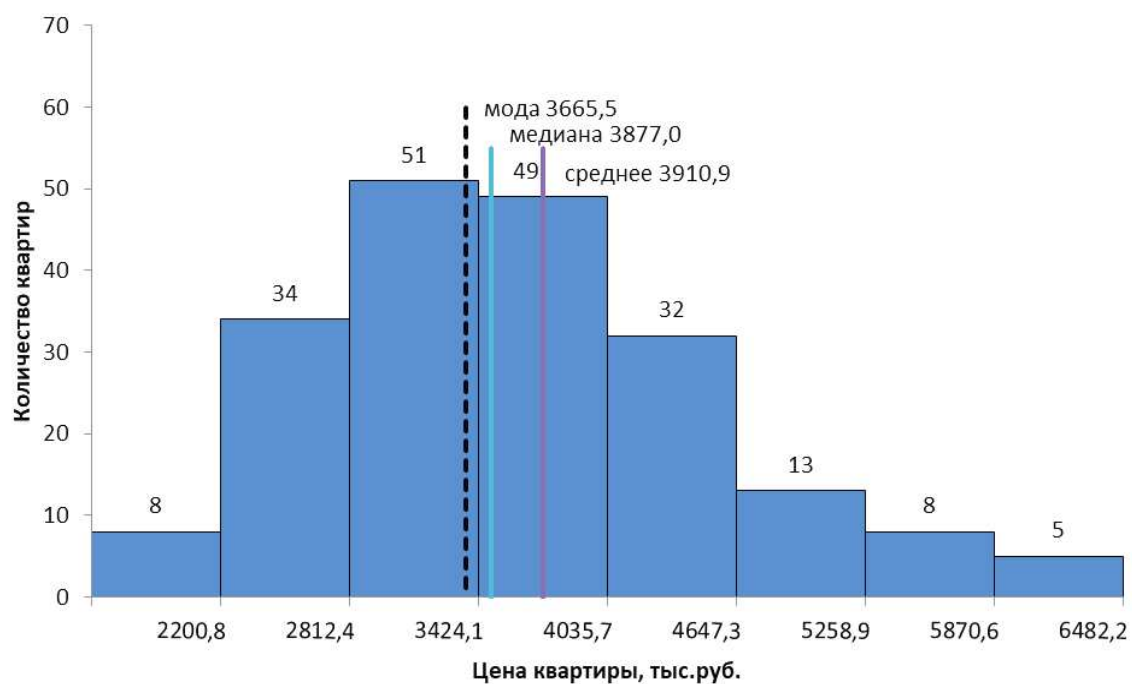


Рис. 5. Распределение трехкомнатных квартир по цене

Fig. 5. Distribution of three-room apartments by price

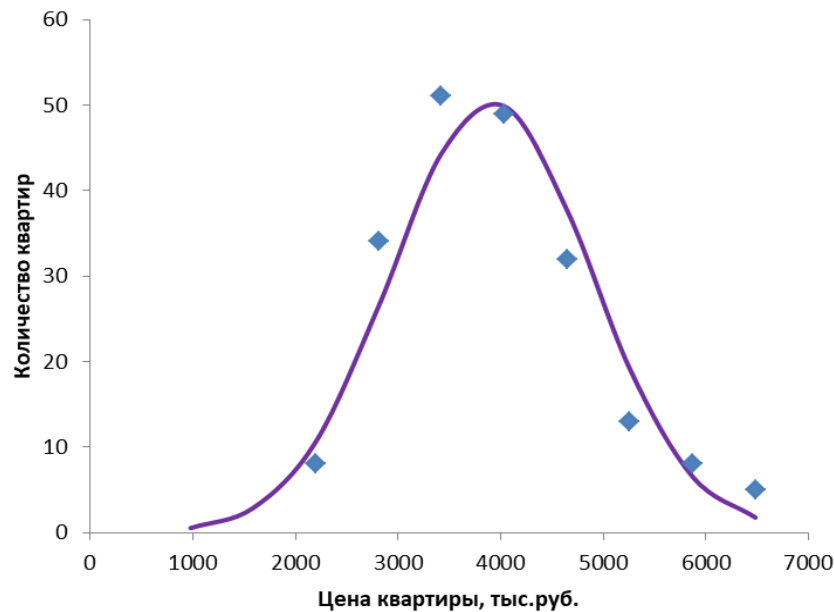


Рис. 6. Сравнение эмпирического распределения цены трехкомнатных квартир с теоретическим (нормальным) распределением

Fig. 6. Comparison of the empirical distribution of the price of three-room apartments with the theoretical (normal) distribution

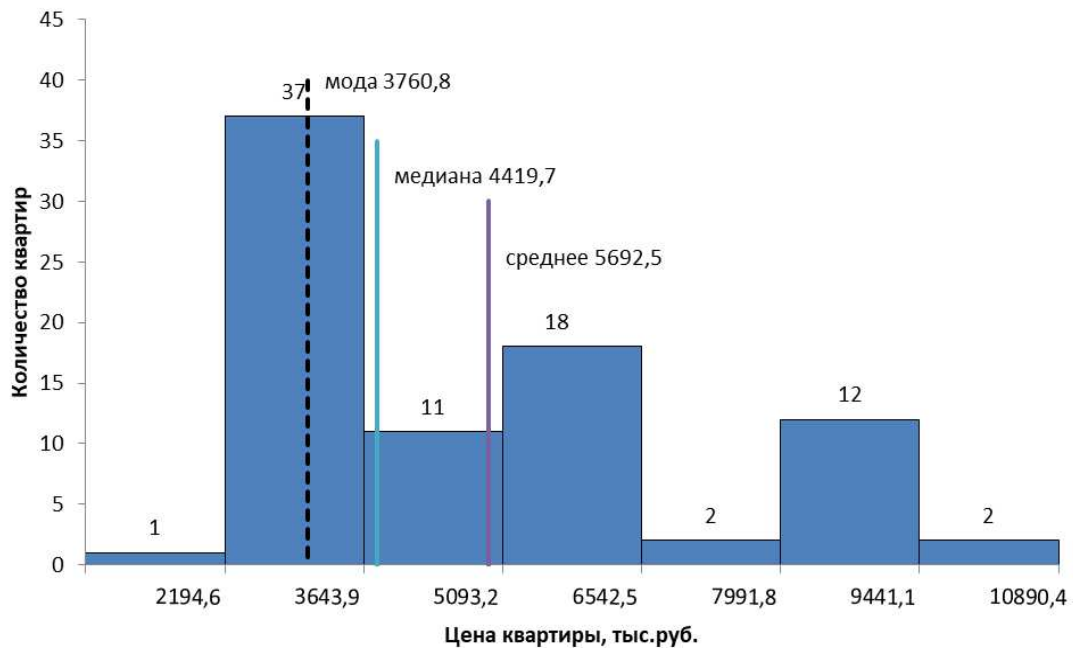


Рис. 7. Распределение четырехкомнатных квартир по цене

Fig. 7. Distribution of four-room apartments by price

**Факторы, влияющие на стоимость квартир.** Стоимость квартиры зависит от большого числа факторов и имеет стохастический характер, что обуславливается экономической обстановкой в целом. Оценка квартир должна основываться на анализе нескольких

их характеристик. При учете большого числа показателей квартир задача является достаточно обширной и трудоемкой. Наиболее важными представляются количественные данные, позволяющие математически выявить зависимость. Их и будем рассматривать.

В данной статье проанализированы количественные показатели, влияющие на формирование стоимости квартиры. Учтены четыре фактора: этаж, общая площадь, площадь жилая, площадь кухни. Применяемый эконометрический аппарат позволяет получать статистические закономерности для анализа зависимости между признаками и стоимостью квартиры. Вычисление проводилось с помощью табличного процессора Excel.

Для каждой выборки были рассчитаны основные статистические характеристики (табл. 1). На их основе были сделаны статистические выводы о характере распределения совокупностей. В ходе исследования возникла необходимость разбить совокупность квартир с 4 комнатами на две по стоимости: менее 8 миллионов рублей и более (см. рис. 7).

Проанализируем полученные статистические характеристики. Для совокупностей однокомнатных, двухкомнатных и трехкомнатных квартир медиана незначительно меньше среднего значения выборки, мода немного меньше медианы, отсутствует длинный хвост распределения. Поэтому среднее значение отражает «центральное значение». Кривая распределения имеет более высокую и острую вершину по сравнению с нормальным распределением. На графике частот видно, что незначительная асимметрия – правосторонняя, коэффициенты асимметрии – положительные. Эмпирические распределения близки к нормальному (см. рис. 2, 4 и 6).

**Регрессионный анализ.** Был проведен регрессионный анализ для каждой выборки. Инструмент анализа «Регрессия» применяется для подбора параметров уравнения регрессии с помощью метода наименьших квадратов. Регрессия используется для анализа воздействия на отдельную зависимую переменную значений одной или нескольких независимых переменных.

Для каждой совокупности построены уравнения регрессии. Для анализа общего качества уравнения линейной многофакторной регрессии был использован множественный коэффициент детерминации  $R^2$ . Множественный коэффициент детерминации определяет долю вариации результативного признака, обусловленную изменением факторных признаков, входящих в многофакторную регрессионную модель. Качество построенной регрессионной модели выражается степенью соответствия между исходными данными и теоретическими значениями.

Наряду с проверкой значимости уравнений регрессии в целом, проверена статистическая значимость каждого параметра на основе  $t$ -критерия Стьюдента. Если часть вычисленных коэффициентов регрессии не обладала необходимой степенью значимости, т. е. рассчитанные значения  $t$ -статистик данных коэффициентов были меньше порогового значения, то такие переменные были исключены из уравнения регрессии и построено укороченное уравнение. Все построенные уравнения занесены в табл. 2.

Таблица 1

Основные статистические характеристики совокупностей

Показатель	Число комнат				
	1	2	3	4	
				До 8 млн руб.	Свыше 8 млн руб.
Средняя цена, тыс. руб.	1818,4	2668,9	3910,9	4796,8	10107,2
Медиана, тыс. руб.	1777,6	2516,9	3877,0	4300,5	9898,0
Мода, тыс. руб.	1717,3	2374,0	3665,5	4342,9	9898,0
Стандартное отклонение, тыс. руб.	431,4	670,2	969,9	1341,2	655,1
Эксцесс	0,100	0,053	0,030	-0,590	3,143
Коэффициент асимметрии	0,613	0,774	0,562	0,577	2,059
Размах вариации, тыс. руб.	2192	3232	4893	6105	2020
Минимум, тыс. руб.	970	1466	1895	1470	9595
Максимум, тыс. руб.	3162	4698	6788	7575	11615
Объем совокупности	765	547	200	69	14

Таблица 2

Уравнения регрессии, отражающие зависимость цены квартиры от факторных признаков

Совокупность	Полное уравнение (в скобках указаны наблюдаемые значения $t$ -статистик)	«Укороченное» уравнение
Однокомнатные	$y = 15,39 - 0,62x_1 + 51,28x_2 - 7,36x_3 - 3,30x_4$ (-0,33) (20,29) (-2,69) (-0,97) $R^2 = 0,506$	$y = 37,10 + 49,67x_2 - 6,93x_3$ (27,86) (-2,59) $R^2 = 0,506$
Двухкомнатные	$y = -446,00 - 1,08x_1 + 57,37x_2 - 1,58x_3 + 0,65x_4$ (-0,34) (22,56) (-0,53) (1,99) $R^2 = 0,524$	$y = -476,00 + 56,92x_2 + 6,93x_4$ (24,17) (1,97) $R^2 = 0,526$
Трехкомнатные	$y = -765,05 - 9,31x_1 + 57,79x_2 + 5,95x_3 + 6,845x_4$ (-1,46) (12,00) (1,46) (0,90) $R^2 = 0,716$	$y = -945,45 + 63,39x_2$ (22,33) $R^2 = 0,714$
Четырехкомнатные	$y = -2570,25 - 26,28x_1 + 95,55x_2 - 21,54x_3 - 28,49x_4$ (-2,92) (17,37) (-3,39) (-3,75) $R^2 = 0,946$	–

Таблица 3

## Корреляция между ценой квартиры и факторными признаками

Совокупность	Общая площадь квартиры ( $X_2$ )		Площадь кухни ( $X_4$ )	
	Коэффициент корреляции	Теснота связи	Коэффициент корреляции	Теснота связи
Однокомнатные	$r_{yx_2} = 0,709$	Связь тесная	$r_{yx_4} = 0,480$	Связь умеренная
Двухкомнатные	$r_{yx_2} = 0,724$	Связь тесная	$r_{yx_4} = 0,141$	Связь слабая
Трехкомнатные	$r_{yx_2} = 0,846$	Связь тесная	$r_{yx_4} = 0,559$	Связь умеренная
Четырехкомнатные	$r_{yx_2} = 0,962$	Связь очень тесная	$r_{yx_4} = 0,230$	Связь слабая

Таблица 4

## Средняя цена одного квадратного метра жилья

Совокупность	Средняя цена, тыс. руб.	Общая средняя, тыс. руб.
Однокомнатные	47,48	49,04
Двухкомнатные	48,41	
Трехкомнатные	51,05	
Четырехкомнатные	52,79	

Регрессионные уравнения выражают зависимость цены квартиры – эндогенной переменной ( $Y$ ), от экзогенных переменных: этажа ( $X_1$ ), общей площади квартиры ( $X_2$ ), жилой площади ( $X_3$ ), площади кухни ( $X_4$ ).

Как показывает анализ построенных уравнений, существенное влияние на цену квартиры оказывают следующие факторы: между ценой квартиры ( $Y$ ) и общей площадью квартиры ( $X_2$ ) связь тесная, прямая; между ценой квартиры ( $Y$ ) и площадью кухни ( $X_4$ ) связь умеренная, прямая. Парные коэффициенты линейной корреляции между этими признаками представлены в табл. 3.

Для каждой совокупности квартир вычислили среднюю стоимость квадратного метра жилья (табл. 4).

С помощью  $t$ -критерия определили, что для однокомнатных и двухкомнатных квартир отличие средней стоимости одного квадратного метра жилья не является статистически значимым с вероятностью 95 % (равенство дисперсий не предполагается). Таким образом, можно считать, что в группах одно- и двухкомнатных квартир средние цены одного квадратного метра примерно равны. Такой же эффект – для пары трехкомнатных и четырехкомнатных квартир. В остальных парах: 2-комнатные и 3-комнатные, 2-комнатные и 4-комнатные, 1-комнатные и 3-комнатные, 1-комнатные и 4-комнатные, различия статистически значимы.

**Заключение.** Проведенный анализ показывает, что на цену квартиру оказывает влияние большое количество факторов, тем не менее, наиболее часто выставлены на продажу квартиры со стоимостью, близкой к средней. При разбиении совокупности квартир на группы по числу комнат получаются выборки, эмпирические распределения которых близки к нормальным, и, соответственно, построение эконометрических регрессионных моделей для таких совокупностей теоретически обосновано. Основное влияние на цену квартиры оказывает их площадь. Результаты проведенного исследования могут быть использованы для анализа явления и составления прогнозов.

## Библиографические ссылки

1. Квартиры Красноярска 2017. Рынок вторичного жилья : свид. 20186621065 / Д. В. Бренинг, И. Л. Савостьянова, С. И. Сенашов, И. В. Томаровская ; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО СибГУ им. М. Ф. Решетнева (RU). № 20186621065. Дата регистрации 12 июля 2018. Реестр баз данных. 1 с.
2. Моделирование стоимости жилья на вторичном рынке недвижимости в г. Красноярске в 2016 году / О. В. Пашковская [и др.] // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 788–796.
3. Сенашов С. И., Юферова Н. Ю., Грошак Е. В. Моделирование стоимости жилья в г. Красноярске : монография / СибГТУ. Красноярск, 2007. 204 с.
4. Сенашов С. И., Юферова Н. Ю., Вайтекунене Е. Л. Эконометрическое моделирование стоимости жилья в Красноярске : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2015. 178 с.
5. Сенашов С. И., Юферова Н. Ю., Сурнина Е. В. Информационная система оценки стоимости квартир на вторичном рынке жилья как инструмент управления инвестициями // Вестник СибГАУ. 2009. № 4(25). С. 219–223.
6. Cost estimation of information system of apartments at secondary housing markets as a management investment tool / S. I. Senashov [et al.] // Vestnik SibSAU. 2009. № 5(26). P. 154–157.
7. Актуальное моделирование недвижимости в Красноярске / С. И. Сенашов и [др.] // Вестник СибГАУ. 2013. № 2. С. 86–91.
8. Денисенко И. К., Сенашов С. И., Юферова Н. Ю. Моделирование стоимости жилья в Красноярске // Вестник Сиб. гос. технологич. ун-та. 2000. № 1. С. 185–190.
9. Медведева О. А., Сорокина О. П., Савостьянова И. Л. Моделирование стоимости жилья Советского района г. Красноярска за 2015 год // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : материалы III Междунар. науч.-практ. конф., посвященной Дню космонавтики. 2017. Т. 2 С. 374–377.

10. Simulation of the cost of residential properties in Krasnoyarsk for 2013–2014 / С. И. Сенашов [и др.] // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17, № 3. С. 830–836.

11. Методы оценки земельных участков / С. И. Сенашов [и др.] // Решетневские чтения. 2009. Т. 2, № 13. С. 549–650.

12. Сурнина Е. В., Сенашов С. И. Использование ГИС-технологий для оценки стоимости квартир // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2010. Т. 1, № 6. С. 444–445.

13. Сенашов С. И., Савостьянова И. Л. Эконометрическое моделирование стоимости жилья // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Красноярск, 2016. Т. 2. С. 235–236.

14. Савченко Л. М., Юзаева А. Г., Сенашов С. И. Моделирование стоимости жилья в г. Красноярске за 2013 год // Проспект Свободный-2016 : сб. материалов Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. 2016. С. 67–70.

15. Русакова А. А., Стародубцев А. А., Сенашов С. И. Моделирование стоимости жилья Центрального района города Красноярска // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : сб. материалов III Междунар. науч.-практ. конф. 2017. Т. 2. С. 398–401.

### References

1. Brening D. V., Savostyanova I. L., Senashov S. I., Tomarovskaya I. V. *Kvartiry Krasnoyarska 2017. Vtorichnyy rynek* [Flats of Krasnoyarsk 2017. Secondary market]. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh № 20186621065.

2. Pashkovskaya O. V. et al. *Modelirovanie stoimosti zhilya na vtorichnom rynke nedvizhimosti v g. Krasnoyarske v 2016 godu* [Modeling the cost of housing in the secondary real estate market in Krasnoyarsk in 2016]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 788–796 (In Russ.).

3. Senashov S. I., Yuferova N. Yu., Groshak E. V. *Modelirovaniye stoimosti zhilya v g. Krasnoyarske* [Simulation of the cost of residential property in the city of Krasnoyarsk]. Krasnoyarsk, SibGTU Publ., 2007, 204 p.

4. Senashov S. I., Yuferova N. Yu., Vaytekunene E. L. *Ekonometricheskoe modelirovaniye stoimosti zhilya v Krasnoyarske* [Econometric modeling of residential prop-

erty cost in Krasnoyarsk]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2015, 178 p.

5. Senashov S. I., Juferova N. Yu., Surnina E. V. [Information system of valuation of apartments on the secondary market as a tool for investment management]. *Vestnik SibGAU*. 2009, No. 4 (25). P. 219–223 (In Russ.).

6. Senashov S. I. et al. [Cost estimation of information system of apartments at secondary housing markets as a management investment tool]. *Vestnik SibGAU*. 2009, No. 5, P. 154–157 (In Russ.).

7. Senashov S. I. [Real-life simulation of real estate in Krasnoyarsk]. *Vestnik SibGAU*. 2013, No. 2, P. 86–91 (In Russ.).

8. Denisenko I. K., Senashov S. I., Juferova N. Yu. [Modeling the cost of housing in Krasnoyarsk] *Vestnik Sib. gos. tehnologich. un-ta*. 2000, No. 1, P. 185–190 (In Russ.).

9. Medvedeva O. A., Sorokina O. P., Savostyanova I. L. [Modeling the cost of housing in the Soviet district of Krasnoyarsk in 2015]. *Aktulnye problemy aviatsii i kosmonavтики*. 2017, Vol. 2, P. 374–377 (In Russ.).

10. Senashov S. I., Savostyanova I. L., Yuzaeva A. G., Savchenko L. M. [Simulation of the cost of residential properties in Krasnoyarsk for 2013–2014]. *Vestnik SibGAU*. 2016, Vol. 17, No. 3, P. 830–836 (In Russ.).

11. Senashov S. I., Surnina E. V., Puzanova G. A., Filyushina E. V. [Methods of valuation of land]. *Reshetnevskie chteniya*. 2009, Vol. 2, No. 13, P. 549–650 (In Russ.).

12. Surnina E. V., Senashov S. I. [The use of GIS technology for estimation of cost of apartments]. *Aktulnye problemy aviatsii i kosmonavтики*. 2010, Vol. 1, No. 6, P. 444–445 (In Russ.).

13. Senashov S. I., Savostyanova I. L. [Econometric modeling of the cost of housing]. *Lesnoy i khimicheskiy komplekсы – problemy i resheniya*. 2016, Vol. 2, P. 235–236 (In Russ.).

14. Savchenko L. M., Yusaeva A. G., Senashov S. I. [Modeling the cost of housing in the city of Krasnoyarsk in 2013]. *Prospekt Svobodnyy-2016*. 2016, P. 67–70 (In Russ.).

15. Rusakova A. A., Starodubtsev A. A., Senashov S. I. [Modeling the cost of housing in the Central district of Krasnoyarsk]. *Aktulnye problemy aviatsii i kosmonavтики*. 2017, Vol. 2, P. 398–401 (In Russ.).

© Бренинг Д. В., Пашковская О. В.,  
Сенашов С. И., Савостьянова И. Л., 2018

УДК 519.68

Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-589-597

**Для цитирования:** Осипов П. А., Осипова Я. С., Хоркуш А. В., Вдовых П. Е., Верхотурова М. В. Заполнение пропусков во входных и выходных данных с помощью алгоритма непараметрической идентификации // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 4. С. 589–597. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-589-597

**For citation:** Osipov P. A., Osipova Y. S., Khorkush A. V., Vdovych P. E., Verkhoturva M. V. [Filling the gaps in the input and output data using the algorithm of nonparametric identification]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 4, P. 589–597 (In Russ.). Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-589-597

## ЗАПОЛНЕНИЕ ПРОПУСКОВ ВО ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

П. А. Осипов\*, Я. С. Осипова, А. В. Хоркуш, П. Е. Вдовых, М. В. Верхотурова

Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий  
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26

\*E-mail: uoo-ikit@mail.ru

*Задача идентификации систем, т. е. определение структуры и параметров систем по наблюдениям, является одной из основных задач современной теории и техники автоматического управления. Точность решения задачи идентификации напрямую зависит от качества исходных данных (выборки наблюдений). Однако данные могут содержать в себе различные недостатки, в частности, пропуски.*

*Пробелы (пропуски) в данных возникают вследствие множества причин, таких как невозможность наблюдения, отсутствие необходимых инструментов и т. п. Самый простой метод работы с такими данными – исключение из таблицы показателя (столбец) или объекта (строки) с пробелом. При большом количестве пропусков в данных этот подход приводит к уменьшению точности модели из-за сокращения объема выборки. Важно отметить, что в описанном случае сложность решения задачи идентификации повышается, особенно когда плотность пропусков высока, их расположение нерегулярно, а данных недостаточно (крайне мало).*

*Целью работы является повышение точности решения задачи идентификации дискретно-непрерывных многомерных процессов по выборкам наблюдений с пропусками. Для достижения поставленной цели использовались методы математической статистики, анализа данных, математического моделирования.*

*Описан алгоритм непараметрической оценки кривой регрессии в дискретно-непрерывном процессе в задаче заполнения пропусков матрицы наблюдений. Также на основе этого алгоритма строится модель. Были проведены два вычислительных эксперимента. Первое исследование проведено в условиях наличия пропусков в выходной переменной матрицы наблюдений. Второй эксперимент проходил при наличии пробелов во входных переменных. Исследования проводились при различных объемах выборки. По итогам работы алгоритма при различных условиях приведены некоторые выводы.*

*Результаты работы могут быть полезны при создании систем управления многомерными дискретно-непрерывными процессами.*

*Ключевые слова: непараметрическая идентификация, оценка кривой регрессии, моделирование, анализ данных, пропуски в данных.*

## FILLING THE GAPS IN THE INPUT AND OUTPUT DATA USING THE ALGORITHM OF NONPARAMETRIC IDENTIFICATION

P. A. Osipov\*, Y. S. Osipova, A. V. Khorkush, P. E. Vdovych, M. V. Verkhoturva

Siberian Federal University, Institute of Space and Information Technology  
26, Kirensky Str., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation

\*E-mail: uoo-ikit@mail.ru

*The task of identifying systems, that is, determining the structure and parameters of systems from observations, is one of the main tasks of a modern theory and technology of automatic control. The accuracy of solving the identification problem directly depends on the quality of the initial data (sample of observations). However, the data may contain various shortcomings, in particular, gaps.*

*Gaps in the data are due to a variety of reasons, such as inability to observe, lack of necessary tools, and so on. The easiest method of working with such data is to exclude from the table an indicator (column) or an object (line) with a space. With a large number of gaps in the data, this approach leads to a reduction in the accuracy of the model due to a reduction in the sample size. It is important to note that in the described case the complexity of solving*



the identification problem increases, especially when the density of passes is high, their location is irregular, and the data is insufficient (very little).

The aim of the paper is to improve the accuracy of solving the problem of identifying discrete-continuous multidimensional processes from samples of observations with gaps. To achieve this goal, methods of mathematical statistics, data analysis, and mathematical modelings were used.

In the article the algorithm of a non-parametric estimation of the regression curve in a discrete-continuous process in the task of filling out the admissions of the observation matrix is described. Moreover, a model is built based on this algorithm. Two computational experiments were carried out. The first experiment was conducted in the presence of gaps in the output variable matrix of observations. The second experiment was conducted with gaps in the input variables. The experiments were conducted at different sample sizes. Based on the results of the algorithm under various conditions, conclusions are given.

The results of the work can be useful in creating control systems for multidimensional discrete-continuous processes.

**Keywords:** nonparametric identification, regression curve estimation, modeling, data analysis, data gaps.

**Введение.** В теории автоматического управления принципы построения системы управления разрабатывались на основе заданной модели. Со временем оказалось, что во многих случаях модель, выбранная при проектировании, значительно отличается от реального объекта, что существенно уменьшало эффективность разработанной системы. В связи с этим возникло новое направление в науке, связанное с построением модели на основании наблюдений, полученных в условиях функционирования объекта по его входным и выходным переменным. Это направление известно сегодня как идентификация систем. Теории и методам идентификации посвящено большое количество работ в отечественной и зарубежной литературе, и в этом направлении разработаны свои принципы, подходы и методы [1–6]. Эти подходы нашли широкое применение в различных областях науки и техники, в том числе в биологии, медицине, авионавтике, экономике, промышленности.

Я. З. Цыпкин отмечает, что задача идентификации систем (определение структуры и параметров систем по наблюдениям) является одной из основных задач современной теории и техники автоматического управления. Эта задача возникает при изучении свойств и особенностей объектов с целью последующего управления ими либо при создании адаптивных систем, в которых на основе идентификации объекта вырабатываются оптимальные управляющие воздействия [5].

В книге Эйхоффа [6] дано следующее определение: «Задача идентификации формулируется следующим образом: по результатам наблюдений над входными и выходными переменными системы должна быть построена оптимальная в некотором смысле модель, т. е. формализованное представление этой системы».

В исходных данных часто возникают пропуски. Пробелы (пропуски) в данных возникают вследствие множества причин, таких как невозможность наблюдения, отсутствие необходимых инструментов и т. п. Самый простой метод работы с такими данными – исключение из таблицы показателя (столбец) или объекта (строки) с пробелом. При большом количестве пропусков в данных этот подход приводит к уменьшению точности модели из-за сокращения объема выборки. Важно отметить, что в описанном случае сложность решения задачи идентификации

повышается, особенно когда плотность пропусков высока, их расположение нерегулярно, а данных недостаточно (крайне мало).

В данной работе реализован один из алгоритмов заполнения пропусков в данных. На сегодняшний день разработано множество методов заполнения пропусков в данных. В работах [2–7] приводятся результаты работы этих методов в различных условиях. Методы заполнения пропусков реализованы в некоторых пакетах прикладных математических программ (например, SPSS Statistic). Задача оценки влияния применения этих методов на точность решения задачи идентификации является актуальной.

**Постановка задачи.** На рис. 1 представлена общая схема исследуемого процесса, принятая в теории идентификации.

Представленная схема состоит из двух блоков: «Объект», «Модель». На рис. 1 используются следующие обозначения:  $A$  – неизвестный оператор объекта;  $u(t) = (u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)) \in \Omega(u) \subset R^m$  – векторное входное воздействие объекта размерностью  $m$ ;  $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)) \in \Omega(x) \subset R^n$  – векторная выходная переменная объекта размерностью  $n$ ; выполняется условие  $m \geq n$ ;  $t$  – непрерывное время;  $\Delta t$  – дискретность контроля входных-выходных переменных процесса;  $\xi(t)$  – векторная случайная помеха;

блоки контроля переменных  $H^u$ ,  $H^x$  подвержены воздействию случайных помех  $h^u(t)$  и  $h^x(t)$ ;  $u_i$  и  $x_i$  – измерения переменных  $u(t)$  и  $x(t)$  в дискретные моменты времени. Выборка измерений входных-выходных переменных процесса  $\{u_i, x_i, i = \overline{1, s}\}$ , где  $s$  – объем выборки. Измерения входных-выходных переменных объекта поступают на блок «Модель», где на основании заданного алгоритма находятся значения выхода модели  $x_{st}$ . Все случайные факторы, действующие в каналах измерения и на процесс, имеют нулевые математические ожидания и ограниченные дисперсии.

Рассматриваемый процесс относится к классу дискретно-непрерывных, т. е. по своей природе процесс является непрерывным, однако входные-выходные переменные процесса контролируются через дискретные моменты времени.

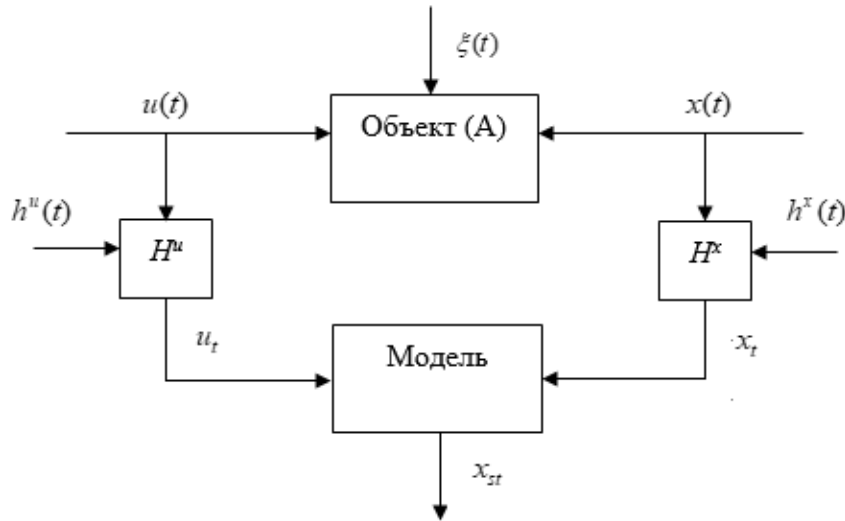


Рис. 1. Общая схема исследуемого процесса

Fig. 1. General scheme of the explored process

При построении модели с помощью методов идентификации используются экспериментальные данные. Ведется регистрация входных и выходных сигналов системы, и модель формируется в результате обработки соответствующих данных.

Формирование модели по наблюдениям включает:

- 1) данные;
- 2) множество моделей-кандидатов;
- 3) правило оценки степени соответствия испытуемой модели данным наблюдений.

Для построения модели важно иметь полные экспериментальные данные (наблюдения), но на практике это встречается крайне редко, т. е. такие данные имеют пропуски. Точность решения задачи идентификации зависит от качества данных. Если удалять строки из матрицы наблюдений, которые имеют пропуски, очевидно, что число строк будет меньше, соответственно, точность модели снизится. Поэтому существует задача заполнения таких пробелов в матрице наблюдений.

**Непараметрический алгоритм оценки кривой регрессии.** Существуют параметрические и непараметрические методы идентификации. Методы параметрической идентификации требуют большого объема априорной информации. Часто возникают случаи, когда априорная информация об объекте очень бедна, поэтому структуру объекта нельзя определить с требуемой точностью. Непараметрические методы не ориентированы на указанные параметрические семейства, имеют более универсальную структуру и более широкую область применения [7; 8]. В условиях малой априорной информации целесообразно использовать методы непараметрической идентификации [9; 10].

С другой стороны, необходимо решать большое количество дополнительных задач: выбор структуры системы, задание класса моделей, оценивание степени и формы влияния входных переменных на выходные и др. [11]. Один из вариантов построения модели в условиях непараметрической неопределенности –

это применение непараметрической оценки кривой регрессии. Вид такой оценки в многомерном случае имеет вид [12]

$$\hat{x}_s(u) = \frac{\sum_{i=1}^s x_i \prod_{j=1}^m \Phi\left(\frac{u^j - u_i^j}{C_s}\right)}{\sum_{i=1}^s \prod_{j=1}^m \Phi\left(\frac{u^j - u_i^j}{C_s}\right)}, \quad (1)$$

где  $u = (u_1, u_2, \dots, u_m)$  –  $m$ -мерный вектор входных воздействий объекта;  $x$  – выходная величина;  $\Phi\left(C_s^{-1}(u^j - u_i^j)\right)$  – ядерная колоколообразная функция;  $C_s$  – коэффициент размытости ядра. Ядерная функция  $\Phi(\cdot)$  и коэффициент размытости ядра  $C_s$  удовлетворяют следующим условиям сходимости:

$$\begin{aligned} C_s > 0; &\Rightarrow \Phi\left(C_s^{-1}(u^j - u_i^j)\right) < \infty; \\ \lim_{s \rightarrow \infty} C_s &= 0; \Rightarrow C_s^{-1} \int_{\Omega(u)} \Phi\left(C_s^{-1}(u^j - u_i^j)\right) dx = 1; \\ \lim_{s \rightarrow \infty} s C_s^m &= \infty; \Rightarrow \lim_{s \rightarrow \infty} C_s^{-1} \Phi\left(C_s^{-1}(u^j - u_i^j)\right) = \delta(u^j - u_i^j), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\delta(u^j - u_i^j)$  – дельта-функция Дирака [13]. Ядерная функция имеет различные формы: треугольное ядро, параболическое ядро, кубическое ядро и др. Важно отметить, точность восстановления функции регрессии по наблюдениям с пропусками несущественно зависит от формы ядра и определяется практическими соображениями исследователя. В данных вычислительных экспериментах используется треугольное ядро, которое имеет вид

$$\Phi\left(\frac{x - x_i}{C_s}\right) = \begin{cases} 1 - |C_s^{-1}(x - x_i)|, & |C_s^{-1}(x - x_i)| \leq 1 \\ 0, & |C_s^{-1}(x - x_i)| > 1 \end{cases}. \quad (3)$$

Для вычислительных экспериментов был выбран объект, описываемый следующей структурой:

$$x_i = 0,5 \cdot u_1 + 2 \cdot u_2^2 + u_3^{\frac{2}{3}}. \quad (4)$$

Следует отметить, что данный вид зависимости (4) известен только в рамках данных вычислительных экспериментов. Сразу отметим, что ошибка моделирования  $W$  считается по формуле

$$W = \frac{1}{S} \left( \sum_{i=1}^S |x_i - \hat{x}_i| \right). \quad (5)$$

Проведенные эксперименты по заполнению пропусков в данных разделены на три этапа.

**Этап I.** На данном этапе имеем полностью заполненную матрицу наблюдений с входными переменными  $u_1, u_2, u_3$  и выходом  $x_i$ . С помощью формулы (1) находим значения оценки  $\hat{x}_i$  и настраиваем коэффициент размытости  $C_s$ , т. е. значение, при котором ошибка  $W$  минимальна. То есть параметр размытости  $C_s$  определяется путем решения задачи минимизации квадратичного показателя соответствия выхода объекта и выхода модели, основанного на методе «скользящего экзамена», когда в модели (1) исключается  $i$ -я переменная, предъявляемая для экзамена:

$$R(c_s) = \sum_{k=1}^s \left( x_k - x_s(u_k, c_s) \right)^2 = \min_{c_s}, k \neq i. \quad (6)$$

Важно отметить, что  $C_s$  был взят в промежутке от 0,1 до 5 с шагом 0,1.

**Этап II.** Добавляем пропуски по определенному правилу. Удаляем из матрицы наблюдений строки с пробелами. Далее выполняем то же самое, что на первом этапе.

**Этап III.** На данном этапе восстанавливаем значения пропущенных данных в первом эксперименте по формуле (1), а во втором – по формуле

$$u_m = \frac{\sum_{i=1}^s u_{ii} \Phi \left( \frac{x_k - x_i}{C_s} \right) \prod_{j=1, j \neq i}^m \Phi \left( \frac{u_{jk} - u_{ji}}{C_s} \right)}{\sum_{i=1, i \neq k}^s \Phi \left( \frac{x_k - x_i}{C_s} \right) \prod_{j=1, j \neq i}^m \Phi \left( \frac{u_{jk} - u_{ji}}{C_s} \right)}. \quad (7)$$

Значения пробелов заполнены, матрица наблюдений снова становится полной. Далее выполняем то же самое, что на первом этапе.

Рассмотренные этапы были реализованы на выборках  $S = 300; 600; 900; 1200; 1500; 1800; 2100$ .

Далее рассмотрим результаты вычислительных экспериментов.

**Первый вычислительный эксперимент.** В рассматриваемом эксперименте пропуски находятся в выходных данных (во всех значениях  $x_i$ , кроме каждого третьего). Дискретность таких пропусков объясняется особенностью контроля выхода. Это означает, что одни переменные процесса измеряются в один промежуток времени, другие – в другой. На практике часто встречаются данные с различной дискретностью контроля выхода, например в процессах сжигания угля в котлоагрегате энергоблока, кислородно-конвертерной плавки стали.

Значения входных переменных сгенерированы случайным образом в промежутке от 0 до 3 с точностью 0,00001.

**Этап I.** Найдены значения оценки  $\hat{x}_i$  при заполненной матрице наблюдений.

**Этап II.** Удалены строки с пробелами из матрицы наблюдений. В результате выборка уменьшилась в 3 раза. Снова находим значения оценки  $\hat{x}_i$ .

**Этап III.** Восстановлены пропущенные значения в матрице наблюдений.

Результаты данного вычислительного эксперимента представлены в табл. 1.

После изучения табл. 1 следуют следующие выводы:

1. При увеличении выборки  $S$  уменьшается ошибка моделирования (5). Это говорит о том, что чем больше текущая информация, тем точнее модель.

2. Результаты 2 этапа во всех случаях хуже итогов 1 и 3 этапов. Очевидно, что выборка на 2 этапе меньше остальных, поэтому ошибка (5) больше ( $W_{1s} < W_{2s}$ ,  $W_{3s} < W_{2s}$ ;  $C_{s1} < C_{2s}$ ,  $C_{s3} < C_{s2}$ ).

3. Результаты на 3 этапе во всех случаях лучше итогов 1 этапа ( $W_{3s} < W_{1s} < W_{2s}$ ). В большинстве случаев  $C_{s1} = C_{s3}$ , в остальных случаях – отличие в одну десятую, это говорит о правильности реализации алгоритма.

На рис. 2 представлен график зависимости ошибки  $W$  от объема выборки  $S$ .

Важно отметить, что с увеличением выборки уменьшается ошибка моделирования (5). Поэтому чем больше данных, тем точнее будет результат.

Вышеописанные выводы доказывают эффективность применения непараметрического метода для заполнения пропусков и построения модели при малой априорной информации.

**Второй вычислительный эксперимент.** В отличие от первого эксперимента, теперь пропуск находится во входных данных, а именно, в каждой 5-й строке в случайной переменной  $u_1$  или  $u_2$ , или  $u_3$ .

Рассматриваемый эксперимент будет проведен с разными входными данными. В первом случае между входами есть некоторые зависимости:

$$u_2 = 0,5 \cdot u_1 + 0,1 \cdot g, \quad (8)$$

$$u_3 = 0,5 \cdot u_1 + 0,3 \cdot u_2 + 0,05 \cdot g, \quad (9)$$

где  $g$  – случайным образом сгенерированное число в промежутке от 0 до 3 с точностью 0,001.

Коэффициент корреляции на всех выборках составляет примерно 0,97. Во втором случае данные сгенерированы случайным образом в промежутке от 0 до 3.

**Этап I.** Найдены значения оценки  $\hat{x}_i$  при заполненной матрице наблюдений.

**Этап II.** Удалены строки с пробелами из матрицы наблюдений. Тем самым выборка сокращается на 20 %. Снова находим значения оценки  $\hat{x}_i$ .

**Этап III.** Восстановлены пропущенные значения в матрице наблюдений.

Результаты данного вычислительного эксперимента представлены в табл. 2.

Подведем некоторые выводы по табл. 2. В данном эксперименте от общего объема выборки пропусков не так много, поэтому процедура удаления строк с пробелами не дает существенного отличия от ре-

зультатов 1-го этапа (в пределах пяти сотых). Интересно следующее: по результатам 3-го этапа ошибка (5) увеличивается даже в сравнении со 2-м этапом.

Таблица 1

Результаты вычислительного эксперимента

Структура модели: $x_1 = a_1 u_1 + a_2 u_2^2 + a_3 u_3^{\frac{2}{3}}$						
S	1 этап		2 этап		3 этап	
	$W_1$	$C_{s1}$	$W_2$	$C_{s2}$	$W_3$	$C_{s3}$
300	0,5249346	0,6	0,86835486	0,8	0,34579805	0,6
600	0,40851948	0,5	0,6613773	0,6	0,2906845	0,5
900	0,32048658	0,4	0,52412224	0,6	0,25944132	0,5
1200	0,27469125	0,4	0,43487462	0,5	0,20380524	0,4
1500	0,25636882	0,4	0,40102375	0,5	0,19891156	0,4
1800	0,2437991	0,4	0,37384215	0,5	0,19284262	0,4
2100	0,22616474	0,3	0,3535294	0,5	0,18599847	0,4

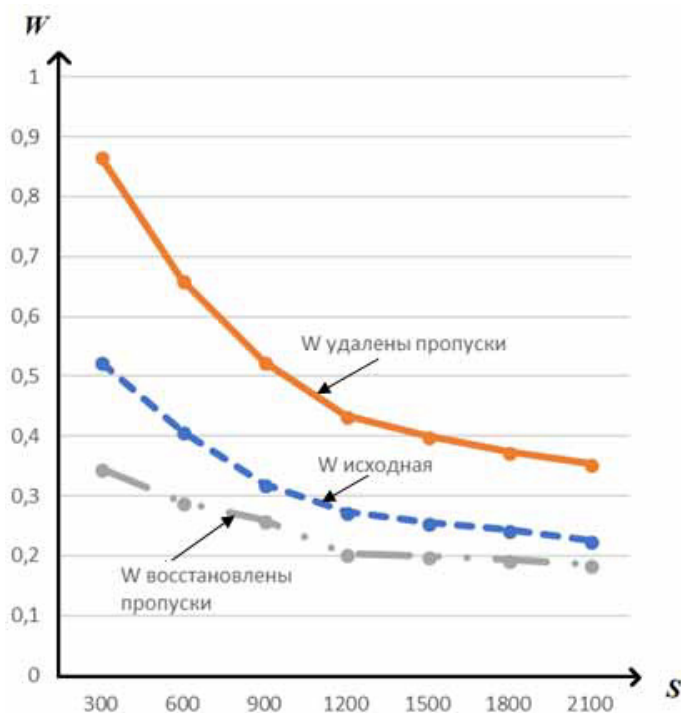


Рис. 2. График зависимости относительной ошибки (5) от объема выборки на разных этапах экспериментов

Fig. 2. The graph of dependence of the relative error (5) on the sample size at different stages of the experiments

Таблица 2

Результаты вычислительного эксперимента с зависимыми между собой входами с пропусками в каждой 5-й строке матрицы наблюдений

Структура модели: $x_1 = a_1 u_1 + a_2 u_2^2 + a_3 u_3^{\frac{2}{3}}$						
S	1 этап		2 этап		3 этап	
	$W_1$	$C_{s1}$	$W_2$	$C_{s2}$	$W_3$	$C_{s3}$
300	0,10365894	0,2	0,107344694	0,2	0,17787787	0,3
600	0,09081579	0,2	0,093733266	0,2	0,1875585	0,3
900	0,045822605	0,1	0,04874478	0,1	0,12278164	0,2
1200	0,03565259	0,1	0,040589087	0,1	0,12119869	0,2

Таблица 3

**Результаты вычислительного эксперимента 3-го и 4-го этапа с пропуском  
во входных переменных в каждой пятой строке**

Структура модели: $x_1 = a_1 u_1 + a_2 u_2^2 + a_3 u_3^{\frac{2}{3}}$				
S	3 этап		4 этап	
	$W_1$	$C_{s1}$	$W_2$	$C_{s2}$
300	0,17787787	0,3	1,3138921	0,9
600	0,1875585	0,3	1,2184308	0,9
900	0,12278164	0,2	1,1859775	0,85
1200	0,12119869	0,2	1,0735321	0,8

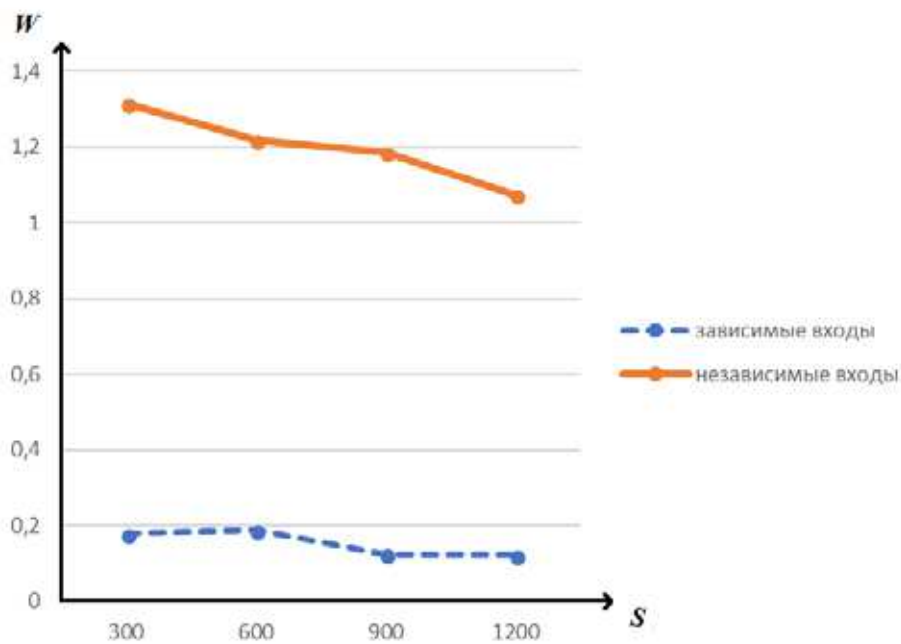


Рис. 3. График зависимости  $W$  от  $S$  в модели (4) при наличии пропуска в каждой пятой строке матрицы наблюдений на входе

Fig. 3. The graph of the dependence of  $W$  on  $S$  in the model (4) with the presence of a gap in each 5 line of the observation matrix at the input

Также был проведен этот же эксперимент, но с двумя входными переменными. Картина сохранилась, по результатам 3-го этапа ошибка (5) увеличивается даже в сравнении со 2-м этапом.

Данные результаты говорят о том, что эффективность применения этого алгоритма к данным, содержащим пропуски по входным переменным, значительно ниже, чем к данным с пропусками по выходам.

Далее эксперимент был повторен с независимыми между собой входными данными. Пусть это будет 4-й этап. Результаты 3-го и 4-го этапа представлены в табл. 3.

На рис. 3 представлен график зависимости  $W$  от  $S$  в модели (4), визуализирующий данные из табл. 3.

По вышеописанным данным следует вывод, что при независимых между собой входах результаты в несколько раз хуже, чем при зависимых. Это говорит о том, что использование непараметрического алго-

ритма для восстановления пропусков на входах при независимых между собой значениях в матрице наблюдений нецелесообразно использовать (или использовать, но в задачах, не требующих большой точности). Предполагается, что в строках и столбцах имеется избыточность, т. е. между свойствами могут быть зависимости, а объекты могут быть похожи между собой. Если избыточность не наблюдается, то все строки и столбцы имеют одинаковый вес при прогнозировании и смысл локальности алгоритма теряется, что и происходит при независимых данных [14].

Далее проведем исследование, аналогичное прошлому эксперименту. Но теперь будет пропуск в каждой 3-й строке в случайной переменной  $u_1$  или  $u_2$ , или  $u_3$ .

Результаты проведенного исследования представлены в табл. 4.

Результат на 3-м этапе хуже, чем на первом и втором (почти всегда), но разрыв между результатами относительно небольшой.

На рис. 4 представлен график зависимости ошибки (5) от объема выборки текущего и прошлого эксперимента с зависимыми между собой данными в матрице наблюдений для модели (4).

В данном эксперименте по сравнению с прошлым пробелов в матрице наблюдений больше. По графикам очевидно, что ошибка (5) меньше в текущем эксперименте, т. е. получается так, что при малой апри-

орной информации непараметрические алгоритмы имеют высокую эффективность.

Далее эксперимент был повторен с независимыми между собой входными данными. Пусть это будет 4-й этап. Результаты 3-го и 4-го этапа представлены в табл. 5.

Визуализация результатов табл. 5 представлена на рис. 5.

Таблица 4

Результаты вычислительного эксперимента с зависимыми между собой входами с пропусками в каждой 3-й строке матрицы наблюдений

Структура модели: $x_1 = a_1 u_1 + a_2 u_2^2 + a_3 u_3^{\frac{2}{3}}$						
S	1 этап		2 этап		3 этап	
	$W_1$	$C_{s1}$	$W_2$	$C_{s2}$	$W_3$	$C_{s3}$
300	0,10365894	0,2	0,11760777	0,2	0,10815763	0,2
600	0,09081579	0,2	0,09333572	0,2	0,09623865	0,2
900	0,045822605	0,1	0,056772906	0,1	0,08182337	0,2
1200	0,03565259	0,1	0,047689456	0,1	0,07308948	0,2

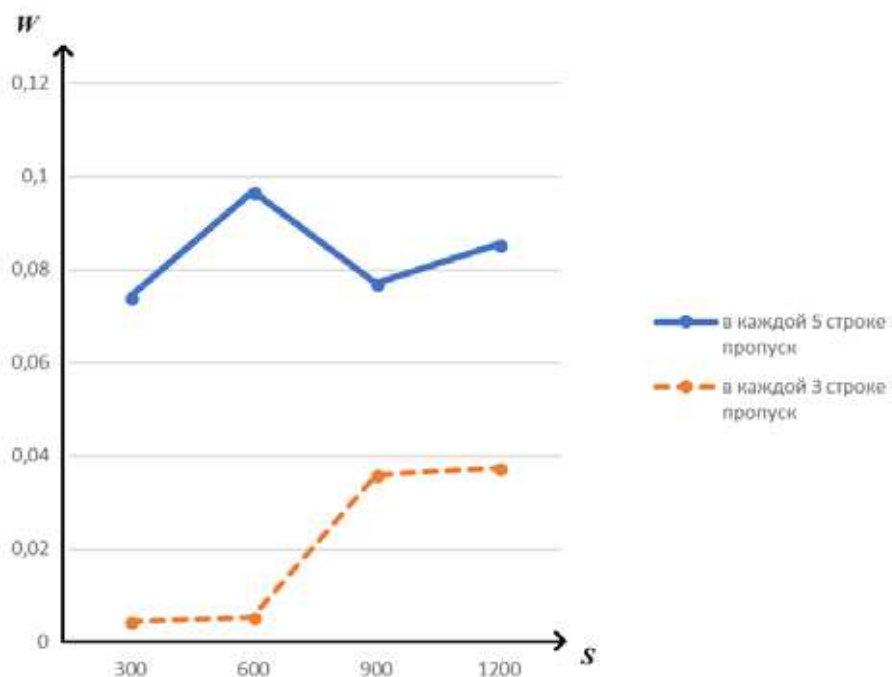
Рис. 4. График зависимости  $W$  от  $S$  проведенных экспериментов в модели (4)Fig. 4. The graph of the dependence of  $W$  on  $S$  of the experiments carried out in model (4)

Таблица 5

Результаты вычислительного эксперимента 3-го и 4-го этапа с пропуском во входных переменных в каждой третьей строке

Структура модели: $x_1 = a_1 u_1 + a_2 u_2^2 + a_3 u_3^{\frac{2}{3}}$				
S	3 этап		4 этап	
	$W_1$	$C_{s1}$	$W_2$	$C_{s2}$
300	0,10815763	0,2	0,6380898	0,9
600	0,09623865	0,2	0,4356285	0,6
900	0,08182337	0,2	0,3983642	0,6
1200	0,07308948	0,2	0,3711715	0,6

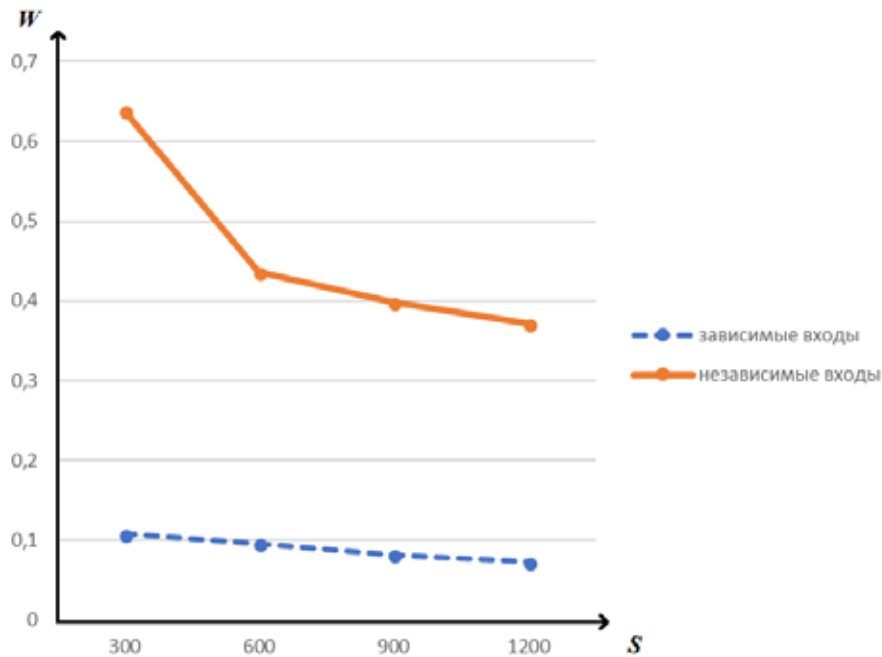


Рис. 5. График зависимости ошибки (5) от объема выборки в модели (4)

Fig. 5. The graph of the dependence of the error (5) on the sample size in the model (4)

Анализируя графики и табл. 5, еще раз можно убедиться в том, что при независимых между собой входах результаты в несколько раз хуже, чем при зависимых. Использование непараметрического алгоритма для восстановления пропусков при случайных входных значениях в матрице наблюдений нецелесообразно.

**Заключение.** Вышеописанные выводы доказывают эффективность применения непараметрического алгоритма для заполнения пропусков и построения модели при малой априорной информации. Ошибка моделирования (5) по заполненной матрице наблюдений с помощью рассматриваемого алгоритма оказалась меньше, чем по исходной.

Эффективность применения непараметрического алгоритма к данным, содержащим пропуски по входным переменным, значительно ниже, чем к данным с пропусками по выходам. Также важно отметить, что при зависимых входных данных результат работы алгоритма будет намного точнее, что описано в гипотезе избыточности [15].

В дальнейшем планируется исследование Zet-алгоритма, а именно, его применение в задаче заполнения пропусков в данных. Также будет проведено сравнение результатов работы Zet-алгоритма с алгоритмом непараметрической оценки кривой регрессии.

#### Библиографические ссылки

1. Карлов И. А. Методы восстановления пропущенных значений с использованием инструментария DataMining // Вестник СибГАУ. 2011. № 7 (40). С. 29–33.

2. Льюнг Л. Идентификация систем. М. : Наука, 1991. 423 с.

3. Райбман Н. С. Что такое идентификация. М. : Наука, 1970. 119 с.

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

5. Эйхгофф П. Основы идентификации систем управления. М. : Мир, 1975. 681 с.

6. Кесман К. Дж. Идентификация системы. Введение. Лондон : Спрингер, 2011. 351 с.

7. Рубан А. И. Методы анализа данных. Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2004. 319 с.

8. Шуленин В. П. Математическая статистика : учебник. Ч. 2. Непараметрическая статистика. Томск : Изд-во НТЛ, 2012. 388 с.

9. Корнеева А. А., Медведев А. В. К анализу данных в задаче идентификации // Кибернетика и высокие технологии XXI века : тр. XIII Междунар. науч.-техн. конф. 2012. Т. 1. С. 52–62.

10. Семенов А. Д., Артамонов Д. В., Брюхачев А. В. Идентификация объектов управления. Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. 211 с.

11. Медведев А. В. Анализ данных в задаче идентификации // Компьютерный анализ данных моделирования. 1995. Т. 2. С. 201–206.

12. Хардле В. Прикладная непараметрическая регрессия. М. : Мир, 1993. 349 с.

13. Надарая Э. А. Непараметрическое оценивание плотности вероятностей и кривой регрессии. Тбилиси : Изд-во Тбилис. ун-та, 1983. 194 с.

14. Гассер Т. Ядровая оценка функции регрессии. Гейдельберг : Спрингер, 1979. С. 23–68.

15. Загоруйко Н. Г. Методы распознавания и их применение. М. : Советское радио, 1972.

## References

1. Karlov I. A. [Methods for restoring missing values using the DataMining toolkit]. *Vestnik SibGAU*. 2011, Vol. 161, No. 7 (40), P. 29–33 (In Russ.).
2. L'yung L. *Identifikatsiya sistem* [Identification of systems]. Moscow, Nauka Publ., 1991, 423 p.
3. Raybman N. S. *Chto takoe identifikatsiya* [What is identification]. Moscow, Nauka Publ., 1970, 119 p.
4. Tsypkin Ya. Z. *Adaptatsiya i obuchenie v avtomaticheskikh sistemakh* [Adaptation and training in automatic systems]. Moscow, Nauka Publ., 1968, 400 p.
5. Eykhhoff P. *Osnovy identifikatsii sistem upravleniya* [Basics of Identification of Management Systems]. Moscow, Mir Publ., 1975, 681 p.
6. Keesman Karel J. *Sistema identifikatsii. Vvedenie* [System identification. An introduction]. London, Springer, 2011, 351 p.
7. Ruban A. I. *Metody analiza dannykh* [Methods of data analysis: a tutorial]. Krasnoyarsk, IPTs KGTU Publ., 2004, 319 p.
8. Shulenin V. P. *Matematicheskaya statistika. Ch. 2. Neparametricheskaya statistika* [Math statistics. Part 2. Nonparametric statistics]. Tomsk, NTL Publ., 2012, 388 p.
9. Korneyeva A. A., Medvedev A. V. [To the analysis of data in the identification problem] *Kibernetika i vysokie tekhnologii XXI veka: trudy XIII mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Cybernetics and high technologies of the XXI century: proceedings of the XIII international scientific and technical conference]. Voronezh, 2012, P. 52–62 (In Russ.).
10. Semenov A. D., Artamonov D. V., Bryukhachev A. V. *Identifikatsiya ob'ektov upravleniya* [Identification of management objects: a tutorial]. Penza, publishing house of the Penza state university, 2003, 211 p.
11. Medvedev A. V. [Analysis of data in the identification problem]. *Komp'yuternyy analiz dannykh modelirovaniya*. 1995, Vol. 2, P. 201–206 (In Russ.).
12. Khardle V. *Prikladnaya neparametricheskaya regressiya* [Applied nonparametric regression]. Moscow, Mir Publ., 1993, 349 p.
13. Nadaraya E. A. *Neparametricheskoe otsenivanie plotnosti veroyatnostey i krivoy regressii* [Nonparametric estimation of probability density and regression curve]. Tbilisi, Izdatel'stvo Tbilisskogo universiteta Publ., 1983, 194 p.
14. Gasser T. *Yadrovaya otsenka funktsii regressii* [Kernel estimation of regression function]. Heidelberg, Springer, 1979, P. 23–68.
15. Zagoruyko N. G. *Metody raspoznavaniya i ikh primeneniye* [Methods of recognition and their application]. Moscow, Sovetskoe Radio Publ., 1972.

© Осипов П. А., Осипова Я. С., Хоркуш А. В.,  
Вдовых П. Е., Верхотурова М. В., 2018



UDC 004.932.2

Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-598-604

**For citation:** Pyataev A. S. [3d tree modeling algorithm]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 4, P. 598–604. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-598-604

**Для цитирования:** Пятаев А. С. Алгоритм моделирования трехмерных деревьев // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 4. С. 598–604. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-598-604

### 3D TREE MODELING ALGORITHM

A. S. Pyataev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technologies  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: pyataev.alex@gmail.com

*Nowadays tree modeling algorithms are used in different fields of activity: from computer games to the plantation forest management. Tree modeling algorithm parameters can depend on different factors: it could be features of landscape, climate or geographical location. Depending on the tasks to be solved, the detail level of the created model is chosen. Forest management tasks often do not require a high detail level, it is sufficient to construct a schematic plantation model. For computer games the creation of photorealistic models is required.*

*The paper proposes an algorithm of 3D tree modeling which consists of the following steps: first step – building a tree framework (modeling the growth of a tree and adding new nodes), while under the framework is meant a set of three-dimensional vectors with attributive data for each vector; then building a tree and overlaying textures. The trunk and branches of the modeled tree are approximated by truncated cones, the axes of which are the vectors of the frame. The tree model constructing algorithm is iterative. Every iteration is a tree growth stage. Thus, the tree is gradually grown to the required level. The developed algorithm allows modeling trees of different state categories. The feature of the proposed algorithm is the possibility of constructing a three-dimensional tree model with any detail level. For example, for coniferous trees it is possible to built a tree up to each needle.*

*Keywords: tree modeling, growth model 3D.*

### АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ДЕРЕВЬЕВ

А. С. Пятаев

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

*Моделирование деревьев в настоящее время находит применение в различных областях деятельности человека: от компьютерных игр до моделирования роста деревьев в насаждениях. Особенности построения модели дерева зависят от факторов местности и климатических условий произрастания. В зависимости от решаемых задач выбирается степень детализации создаваемой модели. Для задач лесопользования зачастую не требуется высокая степень детализации, здесь достаточно построить схематичную модель насаждения. Для компьютерных игр требуется создание фотореалистичных моделей.*

*Предложен алгоритм построения трехмерной модели дерева. Алгоритм состоит из следующей последовательности шагов: построение каркаса дерева (моделирование роста дерева и добавление новых узлов), при этом под каркасом понимается набор трехмерных векторов с атрибутивными данными по каждому вектору; построение дерева и наложение текстур. Ствол и ветви моделируемого дерева аппроксимируются усеченными конусами, осями которых являются векторы каркаса. Отличительной чертой предложенного алгоритма является возможность построения трехмерной модели дерева с любой степенью детализации. Например, для деревьев хвойных пород можно смоделировать дерево вплоть до каждой хвоинки.*

*Ключевые слова: моделирование дерева, модель роста, 3D.*

**Introduction.** Modeling of trees is actively used in solving forecasting problems. Thus, in [1] the forecast of forest recovery after a fire is built, in [2] the calculation of forest survival in the long term is carried out, the authors [3] build a forecast of grape harvest using a model of vine

growth. At the same time, the features of the growth of the tree depend not only on the breed, but also on the growing conditions. That is, when building a model of a particular tree, it is necessary to take into account climatic features and the influence of the terrain. Realistic models

of trees can be built on the basis of data obtained from aircraft using active optical systems [4–6]. Also, tree models are used in many computer games. The paper [7] proposes a growth model of larch Ruprecht (*Larix principis-rupprechtii*) for forest management planning tasks. Such tasks often do not require a high level of detail. The coarsened tree model is represented by three primitives: two cones and a cylinder (fig. 1).

Fig. 1 parameters:  $H$  – tree height;  $D$  – diameter of tree trunk at chest level;  $CW$  – maximum width of the crown;  $CL$  – total crown height;  $CH$  – height to the widest part of the crown;  $h_1, h_2, h_3, h_4$  – is the height of the lower part of the trunk, the height of the top of the cone, the height of the bottom cone and the height of the cylinder respectively;  $R_2$  – is the radius of the base of the upper cone;  $R_3$  and  $R_4$  – are the radii of the bases of the lower cone;  $R_5$  – is the radius of the cylinder. Two cones imitate a coarsened crown, a cylinder – barrel. The proposed methods establish changes in the diameter of the bases and the height of the cone, as well as changes in the diameter and height of the cylinder, depending on the age and degree of dominance of the tree in the plantation. The paper [8] proposes methods for modeling vegetation and landscape scenes based on a combination of three-dimensional laser scanning data and two-dimensional digital image data. For inventory methods based on individual trees, such features as the height of the tree, the shape and volume of the crown, diameter of the trunk are calculated.

The paper [9] suggests the interactive way of modeling of a tree which is based on the interaction of the user with the system. At the first stage, the system creates several pretending models from the contour of the tree created by the user.

From these models the user selects the most suitable trees. These selected trees are then automatically processed by the system to create new candidate models. A typical example is shown in fig. 2.

Thus, the tasks that require modeling of trees can be very diverse: from computer games to modeling the growth of trees in plantations. Depending on the problem to be solved, one or another method of tree modeling and its level of detail are chosen [10–13].

**An algorithm for constructing a tree in three-dimensional space.** The tree model is described as a classical tree-like dynamic structure of data representation. Each node of this structure describes one element of the tree and contains a number of parameters: a reference to the parent node; type; coordinates of the beginning and end of the node; its thickness. It is possible to extend this structure for different tree species and categories. Modeling of tree growth is similar to the two-dimensional case with the correction for three-dimensionality [14].

Construction of a three-dimensional model of the tree takes place in several stages:

1. The construction of the tree frame:
  - modeling tree growth;
  - adding new nodes.
2. Building a tree on the frame and applying textures.

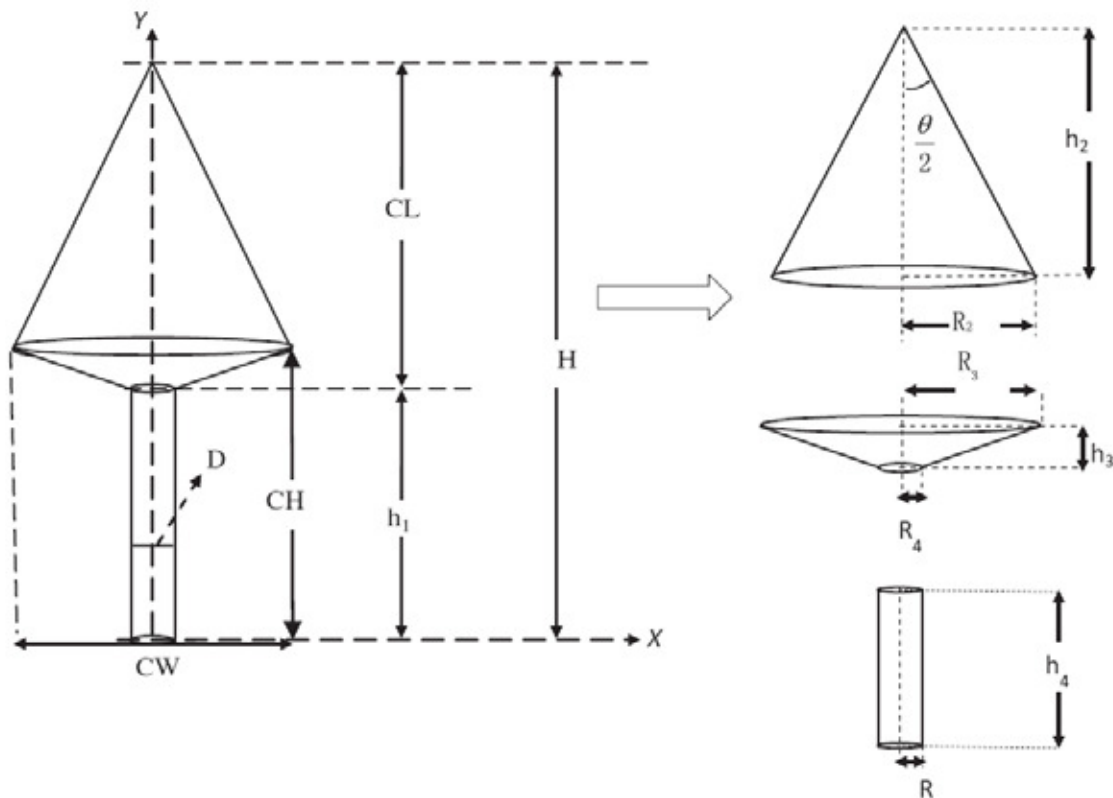


Fig. 1. *Larix principis-rupprechtii* model

Рис. 1. Представление модели *Larix principis-rupprechtii*

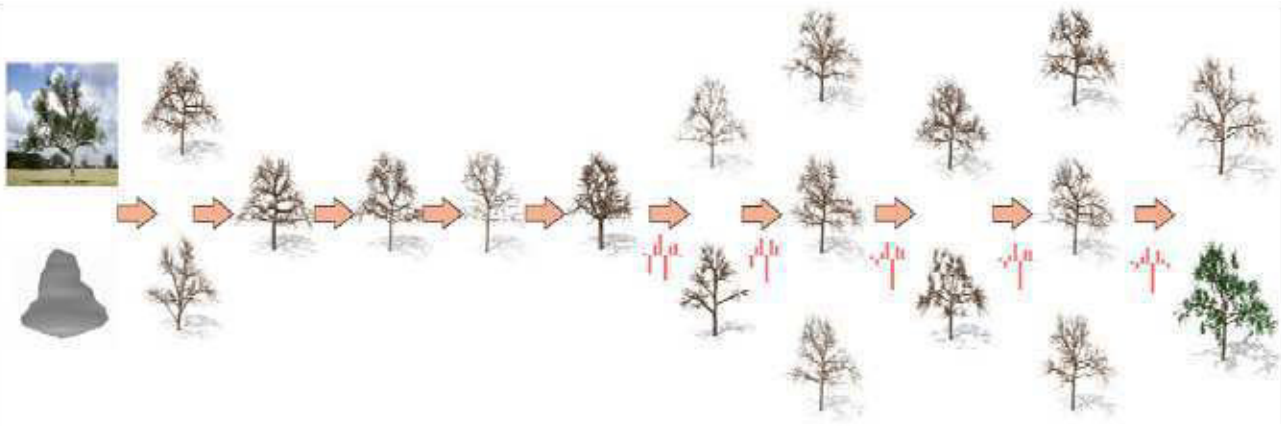


Fig. 2. Stages of tree modeling procedure

Рис. 2. Этапы процедуры моделирования дерева

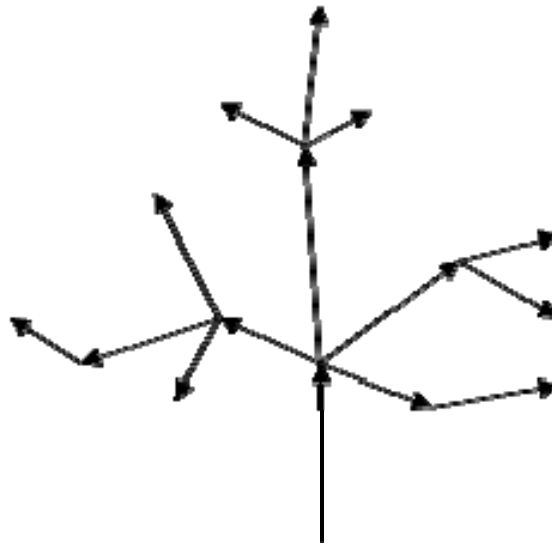


Fig. 3. Wireframe tree model

Рис. 3. Каркас дерева

Under the tree frame we understand a set of three-dimensional vectors with the attribute data for each vector (fig. 3).

The algorithm for constructing a tree model is iterative. Each iteration is a stage of tree growth (fig. 4). Thus, the tree is gradually grown to the required level.

When constructing a three-dimensional frame of the tree, at the time of adding new nodes, it is convenient to use a spherical coordinate system.

So a new node  $\vec{v}$  is created by deflecting from the parent node  $\vec{u}$  by an angle  $\theta$  and turning around it by an angle  $\varphi$  (fig. 5). Right-handed coordinate system is used in this case.

The rotation of the coordinate system by angles  $\theta$  and  $\varphi$  is obtained from the composition of rotations around the  $\vec{OY}$  and  $\vec{OZ}$  axes. The order of turns is the following:

1) turn about an axis  $\vec{OY}$  through an angle of  $\theta$ ;

2) turn about an axis  $\vec{OZ}$  through an angle of  $\varphi$ .

The matrix of rotation of the coordinate system through angles  $\theta$  and  $\varphi$  has the form:

$$M(\theta, \varphi) = M_z(\varphi) \cdot M_y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta \cdot \cos\varphi & -\sin\varphi & \sin\theta \cdot \cos\varphi \\ \cos\theta \cdot \sin\varphi & \cos\varphi & \sin\theta \cdot \sin\varphi \\ -\sin\varphi & 0 & \cos\theta \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Let  $(\theta_v, \varphi_v)$  – the rotation angles of the new node  $\vec{v}$  relative to the parent node  $\vec{u}$ . But the node  $\vec{u}$ , in its turn, is also rotated by some angles, denoting them  $(\theta_u, \varphi_u)$  relative to the axis  $\vec{OZ}$  in the base coordinate system. They are calculated by formulas of transition from spherical coordinate system to Cartesian.

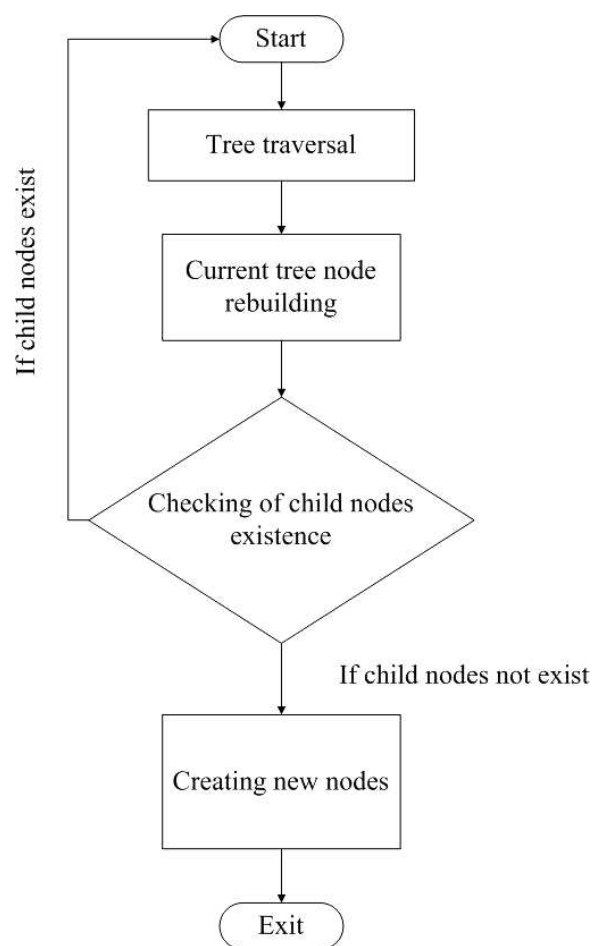


Fig. 4. Tree growth modeling algorithm

Рис. 4. Алгоритм моделирования роста дерева

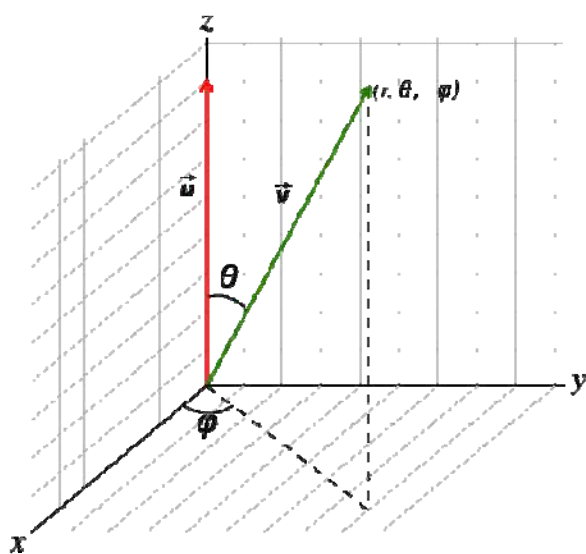


Fig. 5. New node creating stage

Рис. 5. Построение нового узла каркаса дерева

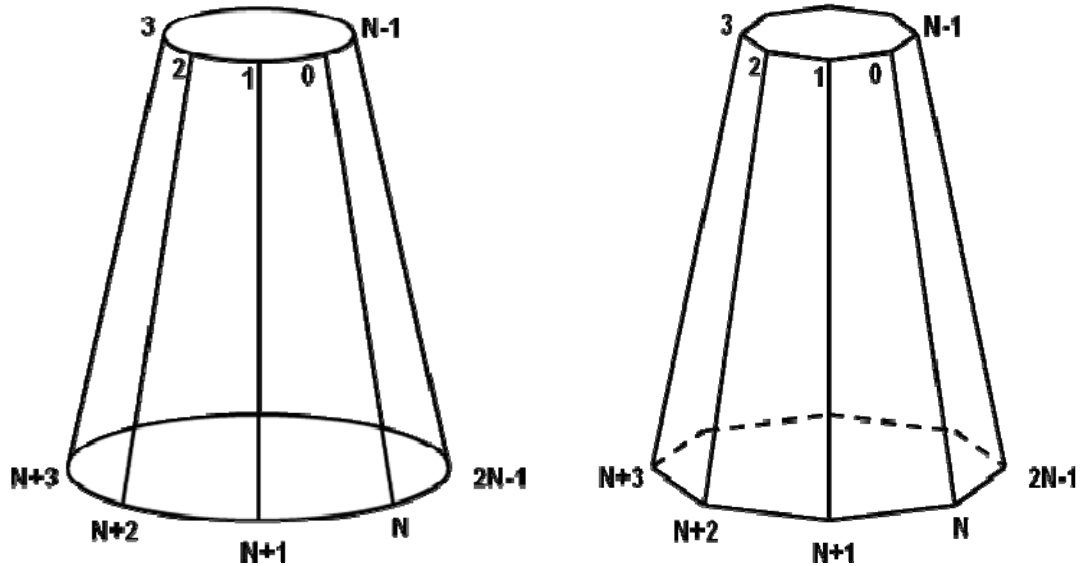


Fig. 6. Cone performance in X3D

Рис. 6. Представление конуса в X3D

Thus, the resulting rotation matrix will be calculated by the formula:

$$M = M(\theta_u, \varphi_u) \cdot M(\theta_v, \varphi_v). \quad (2)$$

Accordingly, the coordinates of the new node  $\bar{v}$  in the base Cartesian coordinate system can be calculated by the formula:

$$\begin{pmatrix} x_v \\ y_v \\ z_v \end{pmatrix} = M \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ L \end{pmatrix}, \quad (3)$$

where  $L$  is the length of the new tree node.

To visualize a three-dimensional tree model based on the constructed framework, we will use the VRML three-dimensional image description language or its descendant X3D [15]. A straight truncated cone is constructed on the basis of the frame of each node. Radii of bases – the arithmetic mean between the parameters of the width of the current node and the neighbor on this base. The axis of the cone is the vector of the node.

A straight truncated cone in X3D, from a mathematical point of view, is a regular truncated pyramid (fig. 6).

Such a pyramid is described as follows:

The <IndexedFaceSet> section lists the order of the vertex points that make up the faces and bases of the pyramid. The upper base of such a pyramid will have a description:

$$0 \ 1 \ 2 \ \dots \ N-2 \ N-1 \ -1, \quad (4)$$

where  $-1$  is the face description separator.

The <Coordinate> section lists the coordinates of these vertex points as follows:

$$x_1 \ y_1 \ z_1, \ x_2 \ y_2 \ z_2, \ \dots \ x_{2N-1} \ y_{2N-1} \ z_{2N-1}. \quad (5)$$

The following sequence of steps is used to construct the cone:

1. The coordinates of the bases are calculated, the center of the lower base lies at the point  $(0, 0, 0)$ , and the top at the point  $(0, 0, L)$ , where  $L$  is the length of the tree node.

2. The angles  $\theta$  and  $\varphi$  for the node vector are calculated.

3. The coordinates of the cone are recalculated taking into account the rotation matrix  $M(\theta, \varphi)$  according to the statement (1).

An example of a tree based on this algorithm is shown in fig. 7.

Thus, using the considered approach to modeling trees, you can build a tree model with any degree of detail. For example, for coniferous trees, you can model a tree up to each needle.

**Conclusion.** The paper proposes an algorithm for constructing a tree model, which is iterative and each iteration is a stage of tree growth. The algorithm is based on the idea of modeling a tree by its gradual “growing” to the required level. The trunk and branches of the simulated tree are approximated by truncated cones, the axes of which are the frame vectors. For visualization of the constructed three-dimensional model of a tree the language of the description of three-dimensional images of 3D is used. Using the developed approach it is possible to model trees with any degree of detail and different categories of state.

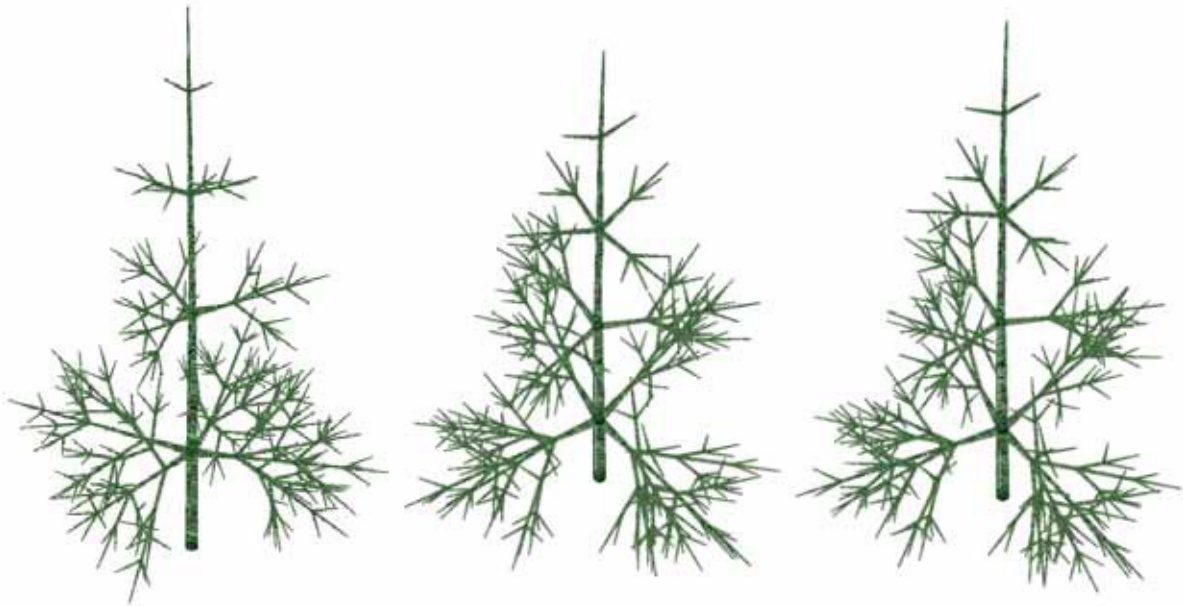


Fig. 7. 3D tree with textures

Рис. 7. Трехмерное дерево с наложенными текстурами

### References

1. Lindsay M. Grayson, Robert A. Progar, Sharon M. Hood Predicting post-fire tree mortality for 14 conifers in the PacificNorthwest, USA: Model evaluation, development, and thresholds. *Forest Ecology and Management*. 2017, Vol. 399, P. 213–226.
2. Christopher Thurnher, Mario Klopff, Hubert Hasenauer MOSES – A tree growth simulator for modelling stand response inCentral Europe. *Ecological Modelling*. 2017, Vol. 349, P. 58–76.
3. Alberto Bressan, Michele Palladino, Wen Shen Growth models for tree stems and vines. *Journal of Differential Equations*. 2017, Vol. 263, P. 2280–2316.
4. Shaojun Hu, Zhengrong Li, Zhiyi Zhang, Dongjian He,Michael Wimmer Efficient Tree Modeling from Airborne LiDAR Point Clouds. *Computers & Graphics*. 2017. Doi:10.1016/j.cag.2017.04.004.
5. Robert Beyera, Dominik Bayerc, Véronique Letortb, Hans Pretzschc, Paul-Henry Cournède Validation of a functional-structural tree model using terrestrial Lidar data. *Ecological Modelling*. 2017, Vol. 357, P. 55–57.
6. Markku Ekerblom, Pasi Raumonon, Raisa Makipaa, Mikko Kaasalainen Automatic tree species recognition with quantitative structure models. *Remote Sensing of Environment*. 2017, Vol. 191, P. 1–12.
7. Yan-yun Han, Bao-guo Wu, Kai-yi Wang, En-ying Guo, Chen Dong, Zhi-bin Wang Individual-tree form growth models of visualization simulation for managed Larix principis-rupprechtii plantation. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016, Vol. 123, P. 341–350.
8. Favorskaya M. N. [Landscape scenes modeling based on laser scanning data and digital aerial photographs]. *V materialakh vserossiyskoy konferentsii «Obrabotka prostranstvennykh dannykh v zadachakh monitoringa prirodnnykh i antropogennykh protsessov»* [Proc. of the all-Russian conf. “Spatial data processing in the tasks of monitoring natural and anthropogenic processes”]. Novosibirsk, 2017, P. 39–43 (In Russ.).
9. Yinhui Yang, Rui Wang, Hongxin Zhang, Hujun Bao ExploreTree: Interactive tree modeling in semantic trait space with online intent learning. *Graphical Models*. 2017, Vol. 000, P. 1–13.
10. Mihajlenko I. M. [Plant growth mathematical modeling based on experimental data]. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya*. 2007, No. 1, P. 103–111.
11. Omelko A. M. [Mathematical model of tree growth in the stands of dark coniferous species]. *Biologicheskie issledovaniya na gornotaezhnoy stantsii*. 2006, No. 10, P. 86–98 (In Russ.).
12. Omelko A. M. [An L-Systems Based Model of Growth of Conifer Tree Growth]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal*. 2006, No. 2, P. 181–188 (In Russ.).
13. Omelko A. M., Yakovleva A. N. Crown Shape Prediction Model for Picea ajanensis and Abies Nephrolepis Trees in Young Dark Coniferous Stands. *Forest science and technology*. 2006, Vol. 2, No. 2, P. 129–136.
14. Pyataev A. S. [Tree modelling Algorhythm based on Lindenmayer sistem]. *V materialakh 20 mezhdunarodnoy konferentsii “Tsifrovaya obrabotka signalov i ee primeneniye”* [The 20-th International Conference “Digital signal processing and its applications”]. 2018 (In Russ.).
15. Web 3D Consortium. Available at: <http://www.web3d.org/> (accessed: 10.06.2018).

### Библиографические ссылки

1. Lindsay M. Grayson, Robert A. Progar, Sharon M. Hood. Predicting post-fire tree mortality for 14 conifers in the PacificNorthwest, USA: Model evaluation, development, and thresholds // *Forest Ecology and Management*. 2017, Vol. 399, P. 213–226.

2. Christopher Thurnher, Mario Klopff, Hubert Hasenauer. MOSES – A tree growth simulator for modelling stand response in Central Europe // *Ecological Modelling*. 2017. Vol. 349. P. 58–76.
3. Alberto Bressan, Michele Palladino, Wen Shen. Growth models for tree stems and vines // *Journal of Differential Equations*. 2017. Vol. 263. P. 2280–2316.
4. Efficient Tree Modeling from Airborne LiDAR Point Clouds / Shaojun Hu [et al.] // *Computers & Graphics*. 2017. DOI: 10.1016/j.cag.2017.04.004.
5. Validation of a functional-structural tree model using terrestrial Lidar data / Robert Beyera [et al.] // *Ecological Modelling*. 2017. Vol. 357. P. 55–57.
6. Automatic tree species recognition with quantitative structure models / Markku Ekerblom [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 191. P. 1–12.
7. Individual-tree form growth models of visualization simulation for managed *Larix principis-rupprechtii* plantation / Yan-yun Han [et al.] // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016. Vol. 123. P. 341–350.
8. Фаворская М. Н. Моделирование ландшафтных сцен на основе данных лазерного сканирования и цифровых аэрофотоснимков // *Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов : материалы Всерос. конф.* 2017. С. 39–43.
9. ExploreTree: Interactive tree modeling in semantic trait space with online intent learning / Yinhui Yang [et al.] // *Graphical Models*. 2017. Vol. 000. P. 1–13.
10. Михайленко И. М. Математическое моделирование роста растений на основе экспериментальных данных // *Сельскохозяйственная биология*. 2007. № 1. С. 103–111.
11. Омелько А. М. Математическая модель роста дерева в древостое темнохвойных пород // *Биологические исследования на горнотаежной станции*. 2006. № 10. С. 86–98.
12. Омелько А. М. Модель роста деревьев темнохвойных пород на основе *L*-систем // *Сибирский экологический журнал*. 2006. № 2. С. 181–188.
13. Omelko A. M., Yakovleva A. N. Crown Shape Prediction Model for *Picea ajanensis* and *Abies Nephrolepis* Trees in Young Dark Coniferous Stands // *Forest science and technology*. 2006. Vol. 2, No. 2. P. 129–136.
14. Пятаев А. С. Алгоритм моделирования роста деревьев на основе *L*-систем // *Цифровая обработка сигналов и ее применение : материалы XX Междунар. конф.* 2018.
15. Web 3D Consortium [Электронный ресурс]. URL: <http://www.web3d.org/> (дата обращения: 10.06.2018).

© Pyataev A. S., 2018



UDC 621.9.004.12

Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-605-612

**For citation:** Frolova E. A. [Multilevel evaluation of quality interactive electronic technical manuals for aviation technology]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 4, P. 605–612. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-605-612

**Для цитирования:** Фролова Е. А. Многоуровневая оценка качества интерактивных электронных технических руководств для авиационной техники // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 4. С. 605–612. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-605-612

## MULTILEVEL EVALUATION OF QUALITY INTERACTIVE ELECTRONIC TECHNICAL MANUALS FOR AVIATION TECHNOLOGY

E. A. Frolova

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation  
67, Bolshaya Morskaya Str., Saint Petersburg, 190000, Russian Federation  
E-mail: frolovaelena@mail.ru

*The method of multi-level quality assessment of interactive electronic technical manuals (IETM) for aircraft contains the main approaches, methodological and logical-mathematical tools for the implementation of multiparameter evaluation of the quality of electronic content of these manuals. The paper postulated that the goal of assessing the quality of IETM for aviation equipment is to obtain a consolidated conclusion on the degree of satisfaction of the need to create interactive electronic technical manuals in the conditions of vagueness of the initial expert data used for evaluation.*

*It is shown that the quality assessment of interactive electronic technical manuals for the operation and repair of aviation equipment is obviously linked to non-numeric or “soft” measurements, due to the fuzzy nature of the initial qualimetric data obtained from an expert. In this version, “measurement” should be understood as a manipulation in which some strictly ordered quality gradations correlate in accordance with the IETM for the operation and repair of aviation equipment properties. In the role of quantitative measurement results, not only real numbers are considered, but also other algebraic groups that necessarily have an order relation between their elements, that is, a similarity of the inequality relation between numbers.*

*The multi-level quality assessment of interactive electronic technical manuals for aeronautical engineering consists of the following steps: 1. Imagery of numerical vectors of values of elementary quality indicators; 2. Calculation of ranks that determine the significance of quality indicators in their compositions based on fuzzy and (or) insufficient initial data on the compositional significance of more particular indicators in the composition of more aggregated indicators; 3. Calculation of elementary indicators values and ratings of importance based on numerical vectors, for the analyzed performance of IETM on the operation and repair of aircraft, the values of the integral quality indicator, as the weighted arithmetic average of mathematical similar to a particular indicators.*

**Keywords:** *interactive electronic technical manuals, aviation technology, multi-level assessment, quality parameters.*

## МНОГОУРОВНЕВАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИНТЕРАКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РУКОВОДСТВ ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Е. А. Фролова

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения  
Российская Федерация, 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67  
E-mail: frolovaelena@mail.ru

*Метод многоуровневой оценки качества интерактивных электронных технических руководств (ИЭТР) для авиационной техники содержит основные подходы, методологические и логико-математические инструменты осуществления многопараметрического оценивания качества электронного контента указанных руководств. Постулировано, что цель оценки качества ИЭТР для авиационной техники есть получение сводного заключения о достигнутой степени удовлетворения потребностей в создании интерактивных электронных технических руководств в условиях нечеткости начальных экспертных данных, используемых для оценки.*

*Показано, что оценка качества интерактивных электронных технических руководств по эксплуатации и ремонту авиационной техники, очевидно, увязана с нечисловыми или «мягкими» измерениями, в силу нечеткого характера начальных квалиметрических данных, получаемых от эксперта. В таком варианте измерение*



следует понимать как манипуляцию, при которой свойствам ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники ставятся в соответствие некоторые строго упорядоченные градации качества. В роли количественных результатов измерения рассматриваются не только действительные числа, но и другие алгебраические группы, обязательно имеющие отношение порядка между своими элементами, т. е. подобие отношения неравенства между числами.

Многоуровневая оценка качества интерактивных электронных технических руководств для авиационной техники состоит из следующих этапов: 1) построение численных векторов значений элементарных показателей качества; 2) расчет рангов, определяющих значимость показателей качества в их композициях по получаемым в ходе экспертизы нечетким и(или) недостаточным исходным данным о композиционной значимости более частных показателей в составе более сводных показателей; 3) расчет на основе численных векторов значений элементарных показателей и оценок рангов значимости для анализируемого исполнения ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники значения интегрального показателя качества как взвешенно-среднего арифметического значения математически аналогичных более частных показателей.

**Ключевые слова:** интерактивные электронные технические руководства, авиационная техника, многоуровневое оценивание, параметры качества.

**Introduction.** The aim of assessing the quality of IETM for aircraft is to obtain a consolidated opinion on the achieved degree of satisfaction of the needs for the creation of interactive electronic technical manuals, in the conditions of the fuzziness of the initial expert data used for evaluation. The assessment of the quality of the IETM on operation and repair of aviation equipment is the determination of their compliance with the requirements of a predetermined network of indicators of this quality.

**Mathematical basis for setting quality indicators for multi-level assessment.** Assessment of the quality of interactive electronic technical manuals (IETM) on operation and repair of aviation equipment is the determination of their compliance with the requirements of a predetermined network of indicators of this quality [1]. If the indicator is a complex nesting of other, simpler indicators (aggregated indicator), then the one-time act of analysis and evaluation of quality develops into a multi-step sequence of qualimetric evaluation. The aggregated indicators in this qualimetric evaluation will be compositionally formed from more simple indicators, resulting in the formation of hierarchical network of indicators. In such a hierarchical network at the terminal level, as a rule, there are indicators that can be directly measured or expertly evaluated, quantitatively or qualitatively. Such indicators of the terminal level of the hierarchical network of indicators of assessment of quality of IETM on operation and repair of aircraft are called elementary. Their set is denoted by  $\{q_i\}$ . At higher levels of the hierarchical network of quality assessment of IETM on operation and repair of aviation equipment compositionally complex, called aggregated, indicators  $\{q_{ij}\}$  are established, aggregating weighted composition of indicators, from the composition of elementary indicators and(or) other aggregated indicators. Root vertex of the specified hierarchical network results is an integral index  $Q_0$ , that is the quality of the IETM on operation and repair of aircraft.

As part of this hierarchical network, the compositional or aggregate importance of any quality indicator  $q_i$  for the assessment of the integral indicator  $Q_0$  will be different. Accordingly, for the numerical fixing of composite or aggregate indicator of the importance  $q_i$  in the convolution of the nearest aggregated indicator according to the structure of the hierarchical network of indicators, the weight coefficient  $w_{m,n}$  is entered – the local rank

of the  $m$ -th indicator in the  $n$ -th convolution,  $w_{m,n} \in (0,1)$ ;  $w_{m,n} \in R$ . In addition, for each aggregated indicator the normalization condition must be satisfied:

$$\sum_m w_{m,n} = 1.$$

Accordingly, the numerical value of the rank of each elementary or intermediate aggregated index  $q_i$  in the convolution of the integral index  $Q_0$ , according to the hierarchical network of indicators, is determined by the weighting factor  $b_m^*$  – the global rank of the  $m$ -th index in the convolution of the integral  $Q_0$ . Respectively

$$b_m^* = \prod_{q_m}^{Q_0} w_{m,n},$$

where  $b_m^* \in (0,1)$ ;  $b_m^* \in R$ .

The specific features of the definition of input information from the expert group for measuring or evaluating local and global ranks determines the classification basis for identifying of the corresponding particular methods within the framework of the developed method of qualimetric assessment of IETM on operation and repair of aviation equipment. The basic feature of the separation of a particular sub-method is a specific feature of obtaining expert information at the input [2; 3]. As a rule, the role of this feature includes the dimension and character of the scale for instrumental measurement or qualitative and quantitative assessment of elementary indicators, a form for taking into account the fuzziness of the input expert data, differences in the mathematical convolution of intermediate aggregated and elementary indicators into the assessment of an integrated indicator. Algorithmic-qualimetric essence of quality assessment is initially reduced to the definition of a set of properties (individual qualities) of the object being evaluated – IETM on operation and repair of aviation equipment. The values of the estimates for these properties are evaluated on a scale.

Assessment of the quality of IETM on operation and repair of aircraft is associated with non-numeric or “soft” measurements. “Measurement” should be understood as a manipulation in which the properties of the IETM on operation and repair of aircraft equipment are correlated in accordance with some strictly ordered gradations of quality. With this approach, not only real numbers are considered in the role of quantitative measurement results, but

also other algebraic groups, necessarily having an order relation between their elements, a number of specialized scales of measurement and evaluation of the quality properties.

Objectively predetermined use of soft, non-numeric measurements in assessing the quality of IETM on operation and repair of aircraft specifies the fact that particular and aggregated indicators from a single hierarchical network of quality assessment indicators can be assessed or measured on scales (nominal, ordinal, ratios, differences), accordingly, the numerical values of these measurements and estimates will be set on different algebraic groups.

According to [4–8], it was established that for the categorical features peculiar to the IETM on operation and maintenance of aviation technology quality assessment the rational form of convolution of the integral evaluation criterion would be the additive linear criterion of the normalized form:

$$Q = \sum_{i=1}^n w_i q_i.$$

The above-shown application of heterogeneous scales of soft measurements or evaluation of elementary indicators leads to such a nature of the data that is input to the method, that this character is understood as insufficiency or deficiency of the input information [9]. This affects the algorithm for calculating the local ranks  $\{w_i\}$ , which play the role of accounting for the different values of the input data in the developed method of assessing the quality of IETM on operation and repair of aircraft. Based on the foregoing, the mathematical apparatus of randomized aggregated indicators [10–14] was adopted for the mathematical basis of the developed qualimetric method.

Aggregated and integral indicators of quality of IETM on operation and repair of aircraft are calculated through the normalized additive convolution of the elementary indicators included in the corresponding network of indicators [15]. Basing on this, it is possible to evaluate  $k$  alternative options for the implementation or projects of IETM on operation and repair of aircraft. It is assumed that their sets of estimates for elementary indicators are represented by numerical vectors  $q^{(j)} = (q_1^{(j)}, \dots, q_m^{(j)})$ ,  $i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, k$ . Each such numerical vector is a multiparametric assessment of the corresponding alternative implementation of IETM on operation and repair of aircraft in the form of a family of values of elementary indicators  $q = (q_1, \dots, q_m)$ . Further, it is assumed that on the community of all evaluated realizations of IETM, quantitatively described by the indicated numerical vectors of evaluations by elementary indicators, the relation of strict dominance is given:

$$(q^{(r)} \triangleright q^{(s)}) \Leftrightarrow ((\forall i q_i^{(r)} \geq q_i^{(s)}) \wedge (\exists j q_j^{(r)} > q_j^{(s)})). \quad (1)$$

The expression describing condition (1) should be considered as follows: IETM  $q^{(r)}$  is superior IETM  $q^{(s)}$  in the considered indicator when it is not less preferable by each component of the elementary index ( $q_i^{(r)} \geq q_i^{(s)}$ ) and there is an elementary or more particular aggregated indicator for which the first IETM is preferable to the second ( $(q_j^{(r)} > q_j^{(s)})$ ). The ordering of the analyzed IETM on operation and repair of aircraft will be a strict ordering

in accordance with (1). Accordingly, together with the strict ordering relationship by preference, it is necessary to introduce a non-strict order relation:

$$(q^{(r)} \geq q^{(s)}) \Leftrightarrow ((q^{(r)} \triangleright q^{(s)}) \vee (\forall i q_i^{(r)} = q_i^{(s)})). \quad (2)$$

In this case, it is possible to determine the relation of strict order through the relation of non-strict order:

$$(q^{(r)} \triangleright q^{(s)}) \Leftrightarrow ((q^{(r)} \geq q^{(s)}) \wedge (q^{(r)} \neq q^{(s)})). \quad (3)$$

When carrying out the ordering of IETM on operation and repair of aircraft using the dominance ratio, a significant complexity arises – the presence of a large number of objects of assessment  $q_i^{(r)}, q_i^{(s)}$ , which are not comparable in relation to the non-strict order (2). The probability of comparability with respect to (2) of these random vectors is determined by the expression

$$P\{(\tilde{q}^{(r)} \geq \tilde{q}^{(s)}) \vee (\tilde{q}^{(s)} \geq \tilde{q}^{(r)})\} = \frac{1}{2^{m-1}}. \quad (4)$$

From (4) it can be concluded that the ability to find comparable multi-criteria quality assessments of IETM on operation and repair of aviation technology decreases rapidly with an increase in the number of analyzed indicators. So, if IETM is estimated by  $m = 11$  indicators then the probability that a pair of randomly selected electronic manuals is comparable in all indicators at once is less than one thousandth. To ensure the comparability of multiparameter quality assessments aggregated indicators are used the essence of which is to form elementary indicators  $q = (q_1, \dots, q_m)$  along a vector of some aggregated indicator  $Q_k$ , which is a function  $Q = Q(q) = Q(q_1, \dots, q_m)$  of a vector of elementary exponents  $q$  satisfying the condition of monotonicity in the form

$$\begin{aligned} \forall q^{(j)}, q^{(l)} \in \{q : q = (q_1, \dots, q_m), q_i \in [0, 1]\} \\ \{q^{(j)} \triangleright q^{(l)}\} \Rightarrow \{Q(q^{(j)}) \geq Q(q^{(l)})\}. \end{aligned} \quad (5)$$

In turn, the most powerful aggregated indicator is an integral indicator of  $Q$ .

**Synthesis and ranking of a multi-level tree of assessment indicators.** In the most general form the function of synthesis or convolution of elementary indicators in the aggregated ones for IETM on the operation and repair of aviation equipment takes the form

$$Q_\phi(q; w) = Q_\phi(q_1, \dots, q_m; w_1, \dots, w_m) = \phi^{-1} \left( \sum_{i=1}^m w_i \phi(q_i) \right).$$

Conducting the substitution of stretched / compressed values  $\alpha_i q_i^{(0)}$ ,  $i = 1, \dots, m$  in the convolution formula allows synthesizing the following expression

$$\begin{aligned} Q_\times(\alpha_1 q_1^{(0)}, \dots, \alpha_m q_m^{(0)}; w) = \\ = \left( \prod_{i=1}^m \alpha_i^{w_i} \right) \times \left( \prod_{i=1}^m q_i^{w_i} \right) = A Q_\times(q_1^{(0)}, \dots, q_m^{(0)}; w). \end{aligned} \quad (6)$$

Basing on expression (6) the following conclusions can be made: if elementary indicators are measured or assessed on the scale of relations, then the multiplicative aggregated indicator is measured or estimated on the scale of relations with stretching / compression  $A$ .

Defining and marking the so-called “difference scale shift”, setting the beginning of reference as  $q_i = 0$  and the end, as  $q_i = 1$ , is much easier than choosing the coefficient of stretching / compression of the ratio scale. This is the main reason for choosing the additive normalized synthesizing function in the proposed method for estimating IETM on the operation and repair of aircraft. In the mathematical apparatus of the method of quality assessment of IETM on operation and repair of aviation equipment, it is precisely the additive normalized convolutions  $Q_i(q; w)$  of elementary indicators that are used to calculate the aggregated and integral estimates of these electronic manuals.

An example of the synthesis of a multi-level tree of indicators for the assessment of IETM on operation and repair of aircraft is presented in fig. 1. We consider: some list of five indicators, and initial values of quality characteristics, compositionally included in the aggregated and

integral quality indicators of IETM on operation and repair of aviation equipment, as well as a set of vectors of values of elementary quality indicators of nine realizations of a specific IETM from various competing development organizations for which a noticeable difference in technological approaches, development methods, software implementation, etc. is stated. It is implied that the vectors of values of the elementary indicators of the quality of IETM was conducted according to the originally specified five basic indicators  $z_1, \dots, z_n$ . From the initial two tables in fig. 1 it follows that all elementary indicators  $z_1, \dots, z_5$  are estimated (i. e. “softly measured”) on the scale of names, except for the indicator  $z_5$ , which is estimated on the ordinal scale. In the framework of the example, it is obvious that in order to ensure further integral convolution, it is necessary to evaluate all the considered indicators on the ordinal scale: *<Satisfies; rather satisfies than does not satisfy; Does not satisfy>*.

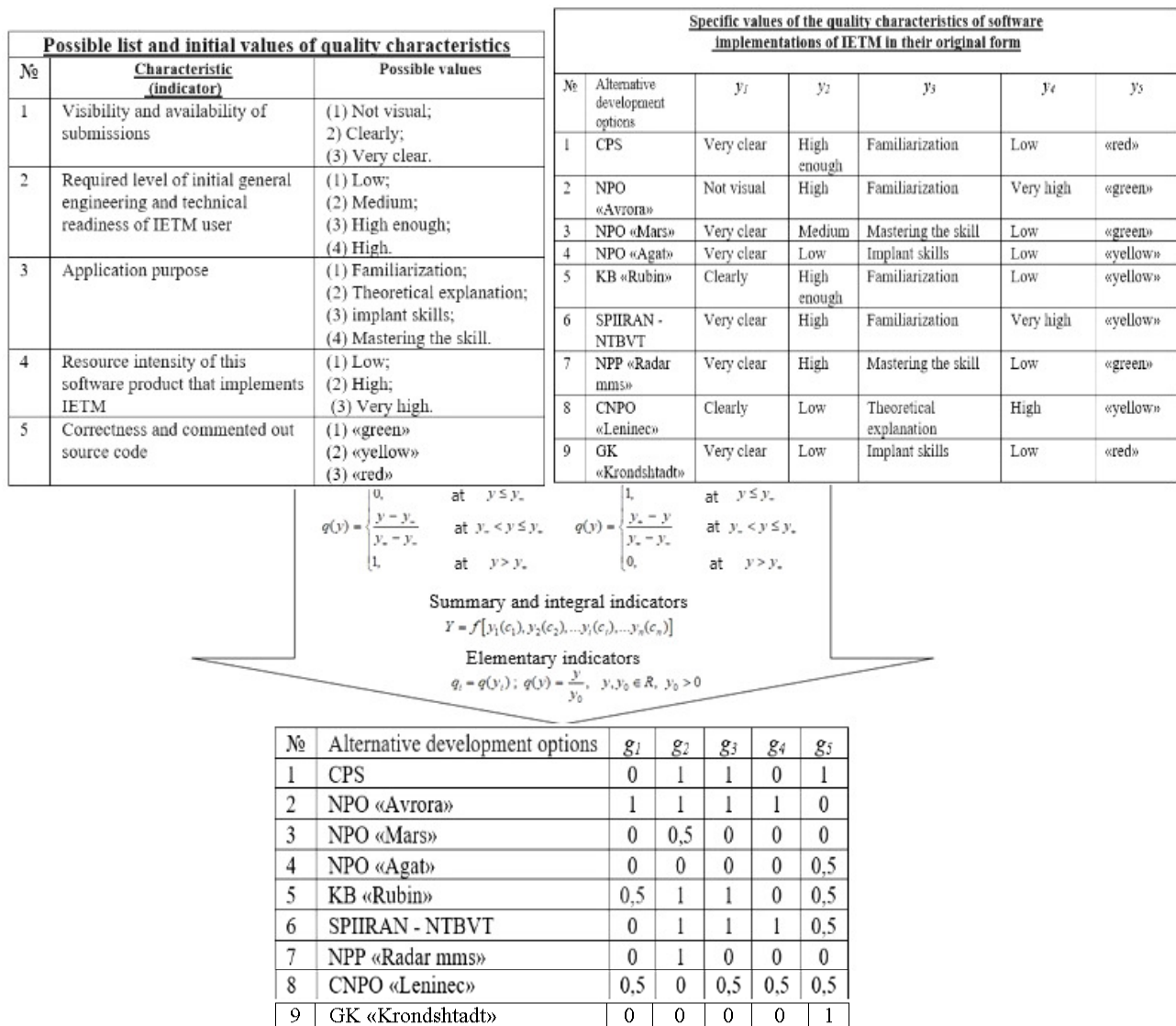


Fig. 1. An example of setting IETM quality indicators when synthesizing a multi-level tree of assessment indicators

Рис. 1. Пример задания показателей качества ИЭТР при синтезе многоуровневого дерева показателей оценки

Let us assume that, in the framework of the considered example, the experience of experts allowed the scaling of the values shown in fig. 1 to the indicated ordinal scale.

The obtained values of the elementary indicators  $y_1, \dots, y_5$  of the quality of the IETM have exactly the ordinal character. This means that they are not real numbers and arithmetic operations cannot be performed on them. To carry out such operations, the indicated values of the elementary exponents  $y_1, \dots, y_5$  must be given a numerical form. In other words, it is necessary to specify the mapping  $x = \varphi(y)$  of the gradations of the index  $y$  to the set of real numbers  $R^1$ . This mapping should preserve the order of the gradations. From the infinite family of admissible assignments of ordinal scales, on which the parameters  $y_1, \dots, y_5$  are measured, in the framework of the example a simple transformation was initially chosen, resulting in the above mentioned ordinal scale to a decreasing number of natural numbers, respectively:  $\langle 3, 2, 1 \rangle$ . On the basis of this conversion, the values  $x_1, \dots, x_5$  of the indicators are obtained, directly estimated on the scale of real numbers  $R^1$  and rolled up into quality aggregated indicators of IETM on the operation and repair of aircraft.

Traditionally, both in the framework of the given example of estimating elementary indicators  $x_1, \dots, x_5$ , and in the established practice of evaluating other combinations of elementary indicators of IETM on operation and repair of aircraft, the use of linear normalization is accepted and practically justified. This allows getting the values of elementary indicators  $q_1, \dots, q_5$  in the form reduced to the  $(0, 1)$  interval, as shown in the table in the lower part of fig. 1. for the observed example. Each of the rows in the table at the bottom of fig. 1 is a multiparametric estimate of  $q = (q_1, \dots, q_5)$  vector characteristics of IETM on operation and repair of aircraft of specific performance from a particular contractor.

Determining the values of the ranks that determine the significance of the IETM quality indicators in their compositions from the fuzzy and (or) insufficient initial data obtained during the examination. It consists in building a family of all possible numerical vectors of significance ranks, taking into account fuzzy (expert) data on the priority of the relevant indicators, and calculating a aggregated numerical vector of ranks of significance. This device provides for the construction of a numerical grid for  $m$  IETM quality indicators with discrete step  $n$ . Further, this grid is thinned out according to fuzzy data  $I$  from experts on the priority of certain indicators. Formally, such initial data are presented in the form of a system of inequalities. As a result of exceptions from the initial digital grid of numerical vectors that do not correspond to fuzzy (expert) data  $I$ ,  $n$  numerical vectors remain, after normalization of which it becomes possible to calculate the ranks of compositional significance for  $m$  IETM quality indicators. In other words, ranks of significance are defined as the algebraic average over each of the  $m$  indicators on the set of  $n$  thinned vectors of  $N$  initial number vectors. Each rank of significance, taking into account the fuzziness of the data set for the thinning of the original digital grid, is calculated as a random variable: that is, the mathematical expectation of the value of the rank of significance is determined

$$\bar{w}_i = M \tilde{w}_i = \frac{1}{N(m, n)} \sum_{t=1}^{N(m, n)} w_i^{(t)} = \frac{\sum_{t=1}^{N(m, n)} w_i^{(t)}}{m}, \quad (7)$$

and the corresponding value of the variance of a random variable or standard quadratic deviation as a measure of the accuracy of this significance rank value

$$\begin{aligned} s_i &= \sqrt{D \tilde{w}_i} = \sqrt{\frac{1}{N(m, n)} \sum_{t=1}^{N(m, n)} [w_i^{(t)} - \bar{w}_i]^2} = \\ &= \sqrt{\frac{m-1}{m^2(m+1)} + \frac{1}{n} \frac{m-1}{m(m+1)}}. \end{aligned} \quad (8)$$

The proposed mathematical and algorithmic tools for taking into account the compositional importance of simpler indicators for assessing the quality of IETM in the composition of more complex ones using ranks of significance determined by the methods of "soft computing", make it possible to take into account any fragmentary and fuzzy expert data on the comparative weight of individual indicators in the aggregated ones. This provides the developed method of evaluation with the necessary flexibility when working with the initial heterogeneous information of qualimetric evaluation.

The procedure of ranking indicators in the compositions, as a fundamental component of the method for assessing the quality of IETM on operation and repair of aviation equipment, can be illustrated with an example for three simpler indicators ( $m = 3$ ) that are combined into a composition of a more complex indicator. The ranking results are presented in the right table in fig. 2.

Analyzing the presented example of the implementation of the procedure of ranking indicators in the compositions of more complex quality indicators of IETM on operation and repair of aviation equipment, it is necessary to pay attention that the mathematical consideration of the fuzziness and noise of the input qualimetric data  $I$  makes it possible to increase the accuracy of estimates of the ranks of the importance of elementary indicators  $\bar{w}_i(I)$ ,  $i = 1, \dots, m$ , in aggregated and integral indicators,  $\bar{Q}_+^{(j)}$ ,  $j = 1, \dots, k$ . In practice, this is reflected in a decrease in the standard deviation of  $s_i(I)$  and  $S^{(j)}(I)$ , as well as an increase in the reliability of the ranking of elementary and aggregated indicators in the compositions (direct to 1 the probabilities of dominance of  $p(r, s; I)$ ,  $r, s = 1, \dots, m$  and  $P(j, l; I)$ ,  $j, l = 1, \dots, k$ ).

**The procedure for calculating the values of indicators of quality assessment IETM.** The calculation of the values of indicators for assessing the quality of IETM on operation and repair of aircraft in the conditions of the primary application of the procedure for ranking indicators in compositions of more complex quality indicators has a number of specific features:

- when determining the ranks of significance on the basis of direct, estimated input data on the priorities of simpler indicators of evaluation;
- in determining the ranks of significance based on expert sampling of data consisting of examples of previously evaluated implementations of IETM;
- when determining the ranks of significance based on fuzzy initial data on the priority of elementary and aggregate indicators in the composition of the integral;

– when determining the ranks of significance based on a multi-level hierarchical network of indicators.

The structure of the procedure for calculating the values of the quality assessment indicators of IETM on operation and repair of aviation equipment is shown in generalized form in fig. 3

The considered procedure for assessing IETM on the operation and repair of aircraft, depending on the methods of obtaining input expert data, is as follows:

a) quality assessment in determining ranks of significance based on direct, estimated input data on the priorities of simpler assessment indicators;

b) assessment of quality in determining the ranks of significance based on an expert sample of data consisting of examples of previously evaluated implementations of the IETM;

c) quality assessment in determining the ranks of significance based on fuzzy initial data on the priority of elementary and aggregated indicators in the composition of the integral;

d) quality assessment in determining the ranks of significance based on a multi-level hierarchical network of indicators.

The generalized scheme for calculating the values of the IETM quality assessment indicators, for evaluating specific implementations of these manuals, includes three main steps:

1. Construction of numerical vectors of values of elementary quality indicators.

2. Calculation of ranks that determine the significance of quality indicators in their compositions according to fuzzy and (or) insufficient initial data on the compositional significance of more particular indicators in the composition of more aggregated indicators.

3. Calculation of the integral quality indicator, as a weighted arithmetic average of mathematically analogous more particular indicators on the basis of numerical vectors of values of elementary indicators and ratings of significance for the analyzed performance of IETM on operation and repair of aviation equipment values.

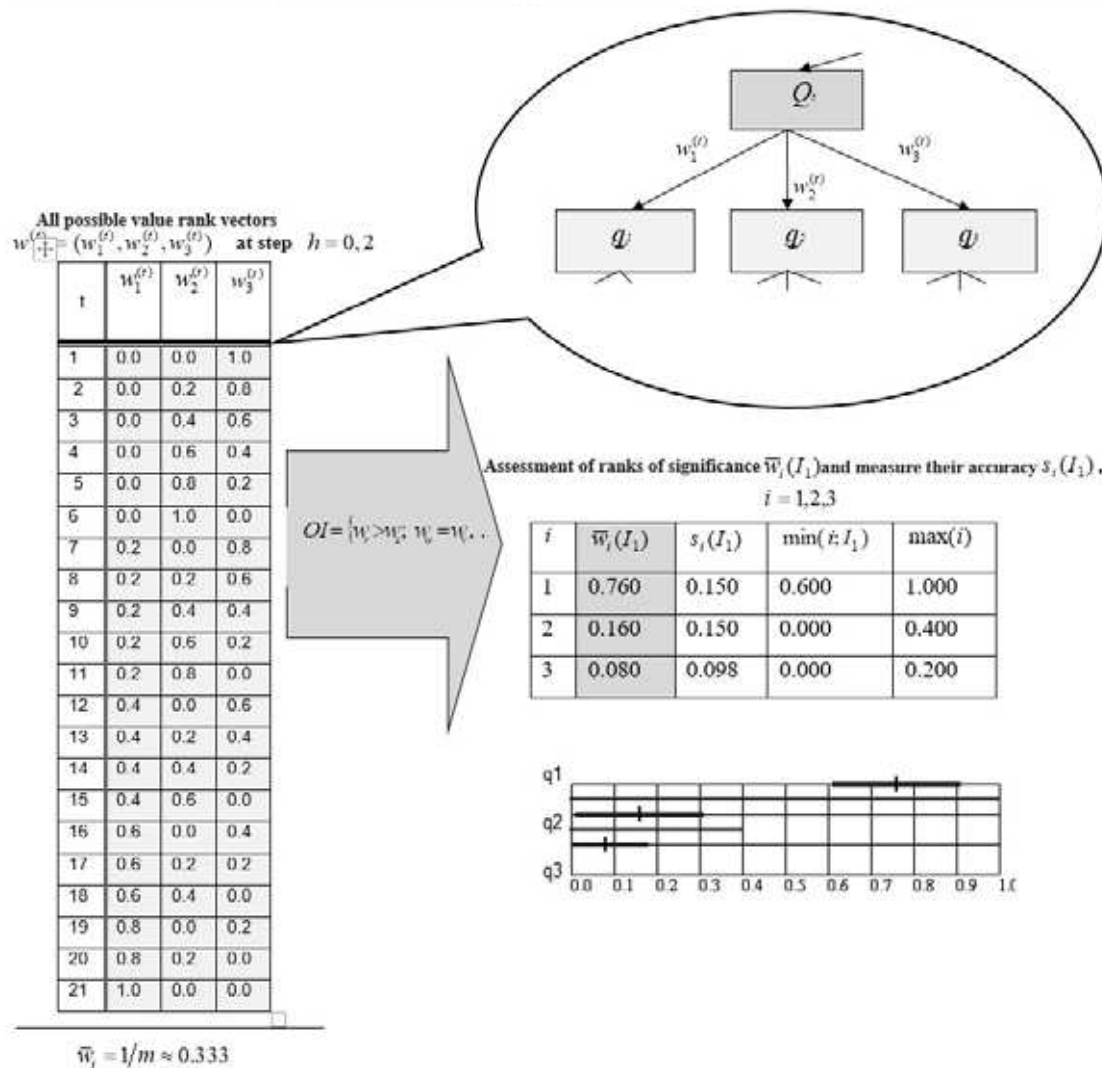


Fig. 2. An example of the procedure of ranking indicators implementation in the compositions of more complex indicators of quality

Рис. 2. Пример реализации процедуры ранжирования показателей в композициях более сложных показателей качества

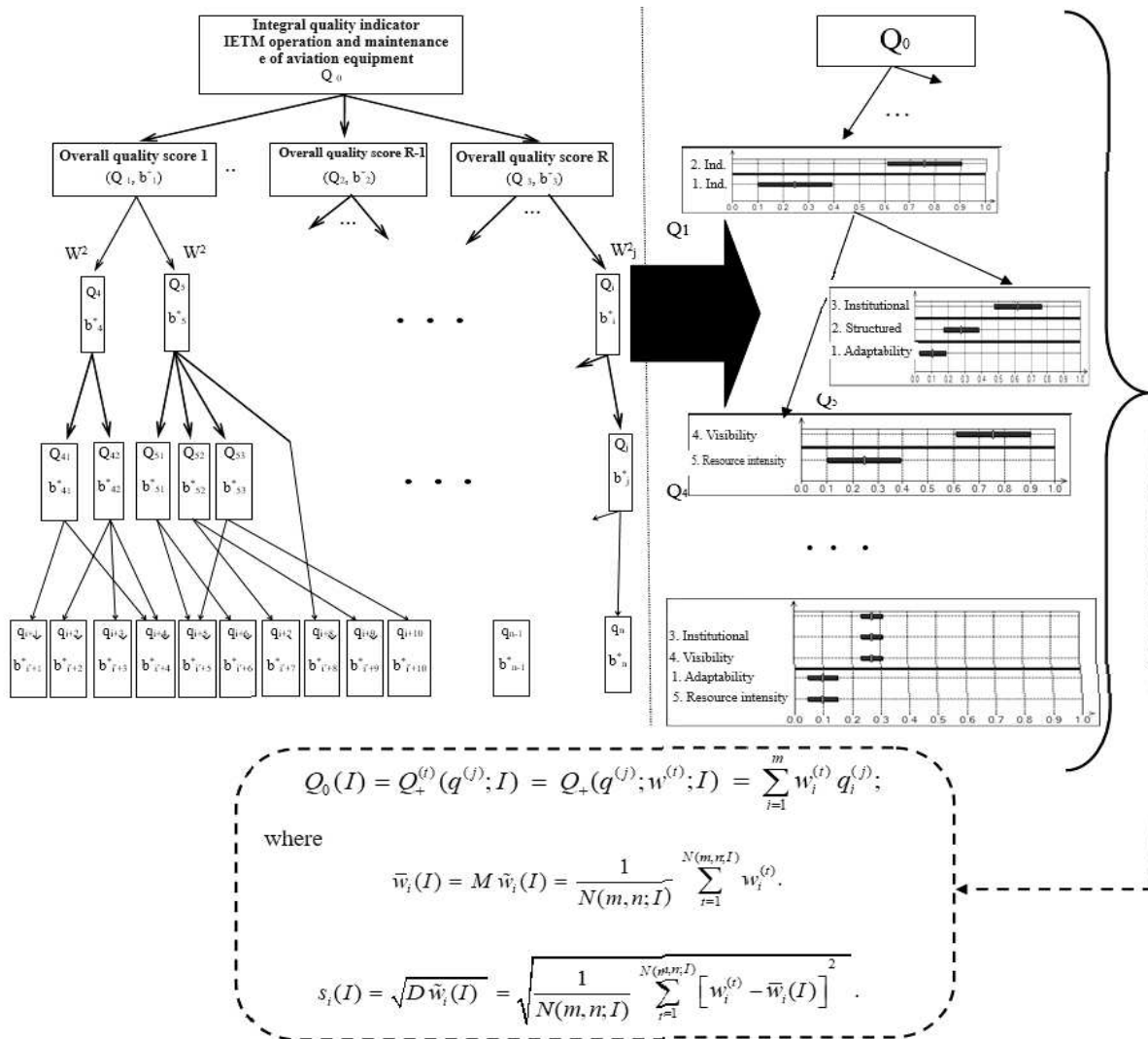


Fig. 3. A generalized presentation of the structure of the procedure for calculating the values of IETM quality assessment indicators

Рис. 3. Обобщенное представление структуры процедуры расчета значений показателей оценки качества ИЭТР

The described generalized scheme for calculating the values of quality assessment indicators is the essence of the developed quality assessment method of IETM on operation and repair of aircraft equipment. It allows you to generalize the previously described and disclosed procedures for scaling and randomizing ranks of the significance of quality assessment indicators for the specified IETM logically.

**Conclusion.** The proposed method of multilevel quality assessment of IETM on aviation technology, based on the use of a mathematical soft computing apparatus for processing primary qualimetric data obtained from experts and making it possible to draw conclusions about the achieved quality level of created IETM on the operation and repair of aviation equipment.

## References

1. Frolova E. A. [Scientific-methodical concept of quality management of interactive electronic technical

manuals on operation and repair of aviation equipment]. *Voprosy radioelektroniki*. 2018, No. 10, P. 66–74 (In Russ.).

2. Michurin S. V., Semenova E. G., Frolova E. A. [Formal presentation of spatial process management quality indicators]. *Conditions alternative to the development of modern economic systems management, innovation. Proceedings of the International scientific and practical conference*. 2016, P. 182–192.

3. Ivakin Ya. A., Semenova E. G., Morozov S. A., Smirnova M. S. [The hierarchy of indicators for assessing the quality of software and hardware complexes of data processing and storage centers]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizajna. Seriya 1. Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2017, No. 5, P. 65–68 (In Russ.).

4. Boem B. U. et al. *Kharakteristiki kachestva programmnogo obespecheniya* [Software quality characteristics]. Moscow, Mir Publ., 1981, 312 p.

5. Onishchenko V. Ya. [Classification and comparative assessment of risk factors]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2008, No. 7(54), P. 28–37 (In Russ.).
6. Krui M., Galei D., Mark R. *Osnovy risk-menedzhmenta* [Fundamentals of risk management]. Moscow, Yurait Publ., 2011, 400 p.
7. Daiitbegov D. M., Kalmykov O. V., Cherepanov A. I. *Programmnoe obespechenie statisticheskoi obrabotki dannykh* [Software for statistical data processing]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1984, 211 p.
8. Semenova E. G., Frolova E. A. *Strukturirovanie trebovaniy k pokazatelyam funkcionirovaniya bortovykh kompleksov* [Structuring requirements for performance indicators of airborne systems]. GUAP, 2004, VINITI, 12.02.2004 244-V2004. 9 p.
9. Semenova E. G., Smirnova M. S., Tushavi V. A. Decision making support system in multi-objective issues of quality management in the field of information technology. *Research Journal of Applied Sciences*. 2014, Vol. 9, Iss. 12, P. 1078–1081.
10. Khovanov N. V. *Metod randomizirovannykh svodnykh pokazatelei* [The method of randomized summary indicators]. St. Petersburg, SPbGU Publ., 1999, 86 p.
11. Khovanov N. V., Mikhailov M. V., Khovanov N. V. *Otsenka slozhnykh finansovo-ekonomicheskikh ob'ektov s ispol'zovaniem sistemy podderzhki prinyatiya reshenii ASPID-3W* [Evaluation of complex financial and economic objects using the ASPID-3W decision support system]. St. Petersburg, Izdatel'stvo Sankt-Peterburgskogo Gosudarstvennogo Universiteta Publ., 2004, 63 p.
12. Popovich, V. V., Ivakin, Y. A., Shaida, S. S. Theory of search for moving objects. *Oceans Conference Record (IEEE)*. 2002, No. 3, P. 1319–1329.
13. Bromfield M. A., Walton T., Wright D., Rusby M. Evaluation of cots solutions to support flight operations quality assurance in business/corporate aviation. *Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*. 2018, No. AIAA 2018-3197, 13 p.
14. Liao J., Zang Y., Zhou Z., Luo X. Quality evaluation method and optimization of operating parameters in crop aerial spraying technology. *Nongye Gongcheng Xuebao / Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2015, No. 31, P. 38–46.
15. Michurin S. V., Michurin S. V., Smirnova M. S. [The structure of the system of requirements for a qualitative assessment of situational spatial process management]. *Voprosy radioelektroniki*. 2016, No. 6, P. 33–35 (In Russ.).
- tions alternative to the development of modern economic systems management, innovation: Proceedings of the International scientific and practical conference. 2016. С. 182–192.
3. Иерархия показателей оценки качества программно-аппаратных комплексов центров обработки и хранения данных / Я. А. Ивакин [и др.] // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Сер. 1 «Естественные и технические науки». 2017. № 5. С. 65–68.
4. Характеристики качества программного обеспечения / Б.У. Бозм [и др.]. М. : Мир, 1981. 312 с.
5. Онищенко В. Я. Классификация и сравнительная оценка факторов риска // Безопасность труда в промышленности. 2008. № 7(54). С. 28–37.
6. Круи М., Галэй Д., Марк Р. Основы риск-менеджмента / пер. Н. Сологуб. М. : Юрайт, 2011. 400 с.
7. Дайитбеков Д. М., Калмыков О. В., Черепанов А. И. Программное обеспечение статистической обработки данных. М. : Финансы и статистика, 1984. 211 с.
8. Семенова Е. Г., Фролова Е. А. Структурирование требований к показателям функционирования бортовых комплексов // ГУАП. 2004. Деп. в ВИНТИ 12.02.2004. № 244-B2004. 9 с.
9. Semenova E. G., Smirnova M. S., Tushavi V. A. Decision making support system in multi-objective issues of quality management in the field of information technology // *Research Journal of Applied Sciences*. 2014. Vol. 9, iss. 12, 2014, P. 1078–1081.
10. Хованов Н. В. Метод рандомизированных сводных показателей. СПб. : Изд-во СПбГУ, 1999. 86 с.
11. Хованов Н. В., Колесов Д. Н., Михайлов М. В. Оценка сложных финансово-экономических объектов с использованием системы поддержки принятия решений АСПИД-3W. СПб. : Изд-во Санкт-Петербургского государственного университета, 2004. 63 с.
12. Popovich V. V., Ivakin Y. A., Shaida S. S. Theory of search for moving objects // *Oceans Conference Record (IEEE)*. 2002. № 3. P. 1319–1329.
13. Evaluation of cots solutions to support flight operations quality assurance in business/corporate aviation / M. A. Bromfield [et al.] // *Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*. № AIAA 2018-3197. 2018. 13 p.
14. Quality evaluation method and optimization of operating parameters in crop aerial spraying technology / J. Liao [et al.] // *Nongye Gongcheng Xuebao / Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2015. № 31. P. 38–46.
15. Мичурин С. В., Ивакин Я. А., Смирнова М. С. Структура системы требований квалитетической оценки ситуационного управления пространственными процессами // *Вопросы радиоэлектроники*. 2016. № 6. С. 33–35.

#### Библиографические ссылки

1. Научно-методическая концепция менеджмента качества интерактивных электронных технических руководств по эксплуатации и ремонту авиационной техники / Е. А. Фролова [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 10. С. 66–74.
2. Фролова Е. А., Мичурин С. В., Семенова Е. Г. Формальное представление показателей качества управления пространственными процессами // Condi-

UDC 621.9.004.12

Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-613-621

**For citation:** Frolova E. A., Ivakin Ya. A., Smirnov A. O. [Method of quality anomalies detection in interactive electronic technical manuals for aircraft maintenance and repair]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 4, P. 613–621. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-613-621

**Для цитирования:** Фролова Е. А., Ивакин Я. А., Смирнов А. О. Метод выявления аномалий качества интерактивных электронных технических руководств по эксплуатации и ремонту авиационной техники // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 4. С. 613–621. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-613-621

## METHOD OF QUALITY ANOMALIES DETECTION IN INTERACTIVE ELECTRONIC TECHNICAL MANUALS FOR AIRCRAFT MAINTENANCE AND REPAIR

E. A. Frolova\*, Ya. A. Ivakin, A. O. Smirnov

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation  
67, Bolshaya Morskaya Str., Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

\*E-mail: frolovaelena@mail.ru

*The purpose of developing a method for detecting quality anomalies of interactive electronic technical manuals (IETM) in application to aircraft maintenance and repair is an objective, purposeful interpretation of assessment of the specified quality. This method is a combination of the corresponding logical-mathematical model of such anomalies designed for subject content logic circuits (SCLC), and the algorithm of its performance in the technological process of compiling interactive electronic manuals.*

*The IETM model of quality anomalies provides the analysis of the SCLC structure as some basic graph and regards the anomaly as a more specific graph. The specific graph is a graphical description of various partial distortions of the logic presented in the form of SCLC. Such a representation of quality anomaly of IETM for aircraft maintenance and repair – by a graph isomorphically nested in the structure of its SCLC – allows to reduce the detection of such anomalies to the mathematico-algorithmic problem of detection or search for the corresponding isomorphic subgraph in the configuration of the corresponding logic circuit. This allows to detect persistable structural embeddings characterizing logical errors in the feeding of electronic content to IETM for aircraft maintenance and repair from the list / database of predetermined anomalous logic substructures.*

*The proposed method for detecting IETM quality anomalies in application to aircraft maintenance and repair is both a methodological toolkit and an extensive basis for design of suitable software models for automatic procedures of valid structure and content correction in concrete interactive electronic technical manuals.*

*Keywords: interactive electronic technical manuals, aircraft, graph, quality anomalies.*

## МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ КАЧЕСТВА ИНТЕРАКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РУКОВОДСТВ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ И РЕМОНТУ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Е. А. Фролова\*, Я. А. Ивакин, А. О. Смирнов

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения  
Российская Федерация, 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67

\*E-mail: frolovaelena@mail.ru

*Целью разработки метода выявления аномалий качества интерактивных электронных технических руководств (ИЭТР) по эксплуатации и ремонту авиационной техники является предметная целенаправленная интерпретация результатов оценки указанного качества. Данный метод представляет собой совокупность соответствующей логико-математической модели таких аномалий, разработанной применительно к логическим схемам предметного контента (ЛСПК), и алгоритма её применения в рамках технологического процесса создания интерактивных электронных руководств.*

*Модель аномалии качества ИЭТР предусматривает рассмотрение структуры ЛСПК как некоторого базового графа, а аномалии – как более частного графа. Такой более частный граф представляет собой графическое описание различных частных искажений логики, описываемой в виде ЛСПК. Такая репрезентация аномалии качества ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники графом, изоморфно вложенным в структуру его ЛСПК, позволяет свести выявление указанных аномалий к математико-алгоритмической задаче распознавания или поиска соответствующего изоморфного подграфа в структуре соответствующей логической*



схемы. Это позволяет обнаружить и распознать устойчивые структурные вложения, характеризующие логические ошибки подачи электронного контента в ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники из перечня (базы) заранее определённых аномальных логических подструктур.

Предлагаемый метод выявления аномалий качества ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники представляет собой как методологический инструментарий, так и мощную базу для создания соответствующих образцов программных решений по автоматизации процедур корректной корректировки структуры и контент-наполнения рассматриваемых интерактивных электронных технических руководств.

*Ключевые слова:* интерактивные электронные технические руководства, авиационная техника, граф, аномалии качества.

**Introduction.** The purpose of quality assessment of IETM for aviation technology is to come to a general conclusion on the obtained degree of meeting the demands for interactive electronic technical manuals within the context of unclear initial expert data used for evaluation [1–5]. Assessment of quality of IETM for aircraft maintenance and repair means stating their compliance with the requirements of the already existing database of that quality indications.

The proposed method of detecting quality anomalies of the IETM in question is a combination of corresponding logical-mathematical model of such anomalies, developed for application to the subject content logic circuits (SCLC) [6; 7] and the algorithm of its performance in the technological process of designing interactive electronic manuals.

**Anomaly representation by a graph isomorphically nested in SCLC configuration of IETM.** The scientific and methodological concept of quality management of IETM for aircraft maintenance and repair implies that quality improvement of software technology for the specific electronic manuals is achieved by applying available qualimetric toolkits for software and information products [8; 9]. Particular attention is paid to quality improvement of IETM content, the factual material describing the subject area of maintenance and repair of specific aircraft models [10–12]. In turn, the SCLC method that provides the sufficient quality level for IETM design offers the developers a means specially focused on IETM for aircraft maintenance and repair content quality [13]. However, designing electronic content for IETM with the use of SCLC does not guarantee the absence of its quality anomalies. If the method of multi-level quality assessment of IETM for aircraft shows a low level of quality achieved in the design process, it will be necessary to improve this quality. Thus, there appears the problem of anomalies detection in the electronic content of the evaluated IETM. It is for solving this problem that the method of quality anomalies detection of IETM for aircraft maintenance and repair is aimed at. These IETM were originally developed on the basis of the corresponding SCLC.

The model of quality anomalies of IETM provides the analysis of the SCLC configuration as some basic graph and regards the anomaly as a more specific graph [13]. The specific graph is a graphical description of various partial distortions of the logic presented in the form of SCLC.

There is quite a number of typical logic distortions in the design of IETM electronic content, in the sequence of frame appearance, etc. The most common examples are logical ring, transitive closure, non-specified fact (condition execution failure). In other words, the SCLS structure

is regarded as a basic graph, within which a subgraph isomorphic to the given one is determined. Here graph isomorphism is understood as equivalence ratio for a set of graphs [14; 15]. The graph, to which the subgraph within the basic graph that displays SCLC configuration relates as isomorphic, graphically specifies the corresponding type of content logical anomaly in IETM for aircraft maintenance and repair (anomalies of the logic of subject content representation as regards the SCLC).

The process of representation of the anomaly in the form of a graph isomorphically nested in the configuration of SCLC of IETM (when the description of the specified anomaly model is formalized by applying mathematical methods of the graph theory technique) takes the form shown in fig. 1. Strictly speaking, the algorithm for detection of an anomaly graph isomorphically embedded in SCLC of IETM, as related to the general method of detecting quality anomalies in IETM for aircraft maintenance and repair, will not undergo significant logical and structural changes. The algorithm initially specifies SCLC decomposition procedures and methods detecting embedded anomalous structures (based on the graph theory technique). The complexity of this approach is due to the fact that the task of quality anomalies detection in SCLC of IETM is regarded here as a problem of graph isomorphic nesting detection (or isomorphism to a subgraph); the existing algorithms of solving the problem reflect exponential time complexity of software implementation [15].

The problem of graph isomorphism detection has a correct interpretation in the subject area of designing IETM for aircraft maintenance and repair. In particular, there exists a set of effective algorithms for detection within a complex graph, such as SCLC configuration in a real, operational IETM for aircraft maintenance and repair, a subgraph isomorphic to the specified one (subgraph-quality anomaly) [15]. There are 2 classes of algorithms for such detection. Class 1 is the implementation of hierarchy principle for the so-called non-exhaustive algorithms that recursively improve their performance in the way of scope and precision of the parameter analysis of vertices and / or edges invariant to graph isomorphism, and, accordingly, called invariants. Class 2 of the algorithms relates to implementation of the same algorithm hierarchy principle, but in the way of exhaustion at one of the search steps of the so-called isomorphic permutation. The worst parameters are demonstrated by algorithms implementing the so-called total direct exhaustion. They can be applied only to SCLC of limited scale. At the same time, the solution of the problem of isomorphic nesting of subgraph into SCLC graph of IETM for aircraft maintenance and repair is trivial in regard to software tools and is described in [14; 15].

Thus, the representation of IETM for aircraft maintenance and repair quality anomaly by a graph isomorphically nested in the configuration of its SCLC allows to reduce detection of the specified anomalies to the mathematico-algorithmic problem of detecting the specified isomorphic subgraph in the corresponding logic scheme. Then it becomes possible to detect typical structural embeddings that characterize logic errors in the feeding of electronic content to IETM for aircraft maintenance and repair from the list / database of predetermined anomalous logic substructures.

**Concretization of the graph model of IETM quality anomaly developed on the basis of logic schemes of the subject content.** Analysis of presentation of IETM content quality anomalies as an isomorphic embedding of a graph reflecting the corresponding SCLC configuration showed that the graphs defining these anomalies may have a diverse and complex form.

The classification of mathematical methods for detecting graph isomorphism, i.e. methods for solving the problem of detection of a graph isomorphic to a specified one, is shown in fig. 2 [15]. As the choice of graph fragments of the same type is varied, the invariants are divided into three classes: local, quasi-global and global.

The solution of the subtask of invariant detection is carried out on the basis of the statement proved by the graph theory – graph  $G$  is isomorphically embedded into graph  $G'$  if and only if  $\varphi(G \hookrightarrow G') \geq |G|$  [14].

Concretization of IETM quality anomaly graph model developed on the basis of SCLC involves determining the best mathematical method for solving the problem of isomorphic graph nesting that conforms to constraints of the subject area of IETM for aircraft maintenance and repair quality management.

**Algorithm for detecting isomorphic nesting of a quality anomaly graph in SCLC configuration of IETM.** The algorithm for solving the problem of detection of isomorphic graph nesting that conforms to constraints of the subject area of IETM for aircraft maintenance and repair quality management, as stated in the classification of methods given above, is implemented on the basis of compound method of directed exhaustion. It combines the main advantages offered by directed exhaustion methods that employ local, quasi-global and global invariants. The suggested algorithm makes use of the following invariants:

- number of vertices  $n(L)$ ;
- number of edges  $m(L)$ ;
- power vector  $S(L) = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ , which, in particular, yields numerical invariants  $s(L) = \min S(L, x)$  and  $s'(L) = \max S(L, x)$ ;
- outdegree  $S^-(x)$ ;
- indegree  $S^+(x)$ ;
- adjacency matrix  $A(L)$ .

In the design of the algorithm the following assumptions and limitations were adopted:

- it is assumed that the vertices (edges) of the graphs have the same properties, i. e. in the algorithm weighting factors of the vertices (edges) are neglected. The reason is that for different types of graphs there will be different requirements for weighting factors;
- all vertices should be numbered;
- only directed graphs are considered: when analyzing undirected graphs, it is necessary to specify one edge as two, i. e. as connecting vertices in both directions;
- “unconnected” vertices are not considered, i. e. each object must have at least one link with another object.

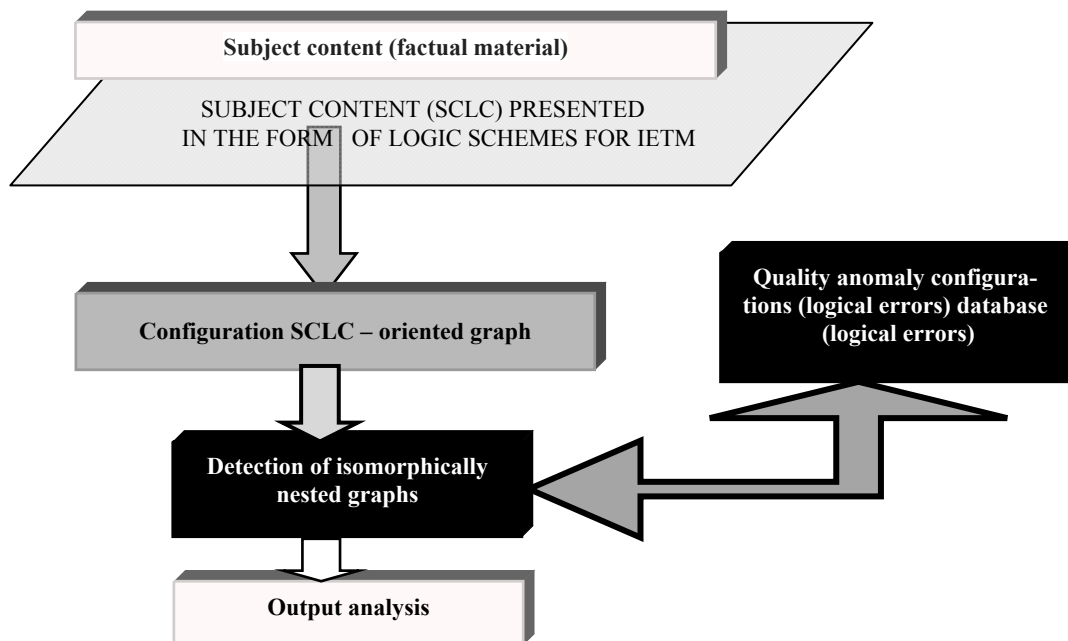


Fig. 1. Key steps of anomaly representation by a graph isomorphically nested in SCLC configuration of IETM

Рис. 1. Основные этапы представления аномалии графом, изоморфно вложенным в структуру ЛСПК ИЭТР

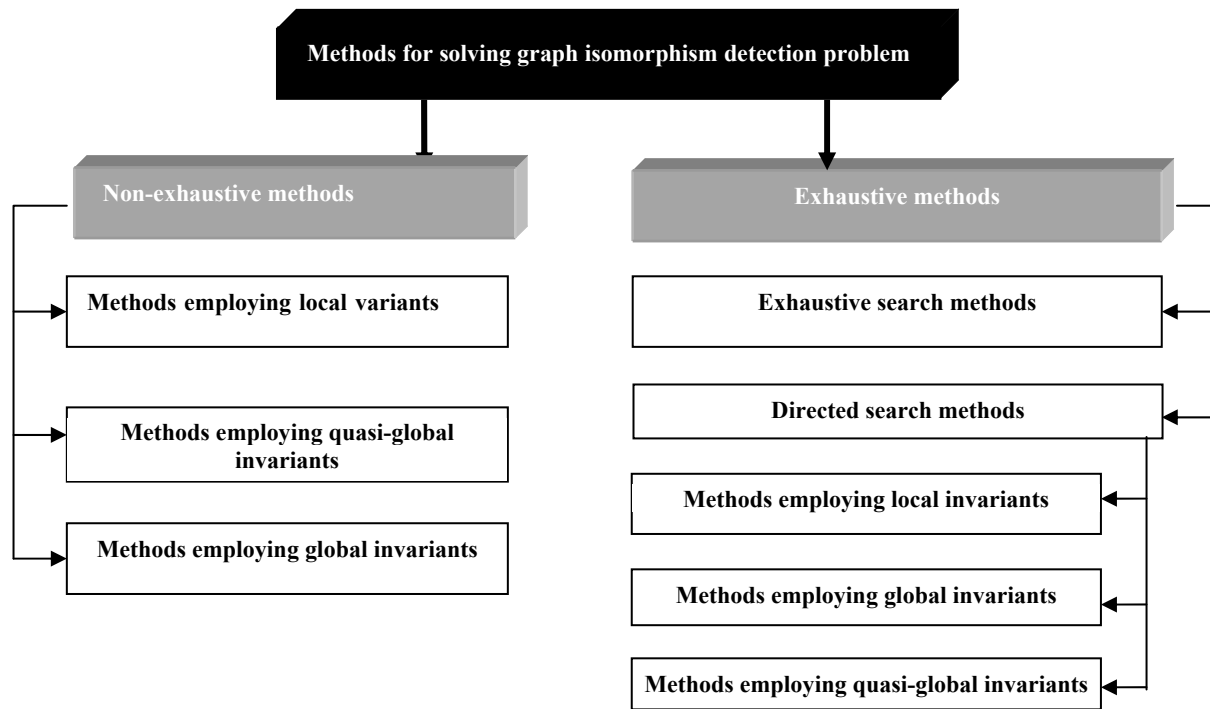


Fig. 2. Classification of graph isomorphism detection methods

Рис. 2. Классификации методов установления изоморфизма графов

The methodological basis of the proposed algorithm for solving the problem of isomorphic graph nesting is the thesis that logic circuits  $S_1 = \{A_1, R_1\}$  and  $S_2 = \{A_2, R_2\}$  in combination outline a constraints system that affects a set of hypothetically possible solutions and significantly reduces it. Here it is not an exhaustion of solution variants, which would lead to  $N$ -factorial searches, but application of a constraints system by a specific algorithm onto a specially devised field; inside this field, as a result of a sequence of actions aimed at meeting the requirements of the constraints system, a ready-made solution is formed. This variant may look like a permutation matrix for graphs of the same dimension. What can be assumed is as follows: a field with a set of hypothetically possible permutations can be presented in the form of  $n \times m$  matrix; for  $n$  and  $m$  – the number of graph vertices, respectively. Such a matrix should be correctly called further as possible permutations matrix. So, as an illustrative example, in fig. 3 there are two graphs –  $G_1$  and  $G_2$ , and the corresponding adjacency matrices. The subgraph of  $G_1$  isomorphic to  $G_2$  is highlighted in gray. Permutation matrix for  $G_2$  graph and the subgraph of  $G_1$  isomorphic to  $G_2$  is shown in fig. 4. Still, the invariant of isomorphic permutation remains the same:

$$\varphi = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & A \\ 1 & 7 & 8 & 4 & 5 & A & 2 & 3 & 6 & 9 \end{pmatrix}.$$

The essence of the algorithm suggested for detection of isomorphic nesting of a quality anomaly graph in SCLC configuration of IETM can be adequately presented by solving a problem of an isomorphic nesting of

graphs as shown in fig. 4. Adjacency matrices and possible permutations matrices for this pair of graphs are shown in fig. 5. In the matrix of possible permutations  $C$ , in the first column, there is an enumeration of all graph  $B$  vertices, and in the first string – of all graph  $A$  vertices. The number of possible permutations is entered in  $N+1$  column.

The initial completion of a matrix of possible permutations is carried out by analyzing indegrees and outdegrees of the original graphs according to the rule: vertex can  $B_i$  correspond to vertex  $A_j$  only if indegrees and outdegrees of this vertex are greater than or equal to those of vertex  $A_j$ . Thus, the initial filtering of solution variants is performed. Mathematically, this is formalized and written as:

$$C_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } s(B, b_i) \leq s(A, a_j) \text{ and } s(B, b_j) \leq s(A, a_j), \\ 0, & \text{in other variants.} \end{cases}$$

Further adjustment of the matrix is performed by imposing the following system of constraints:

1. Graphs cannot be isomorphic if there is at least one null string in “Number of possible permutations” column.

2. In case of one-to-one correspondence of vertices  $B_i$  and  $A_j$  ( $B_i \leftrightarrow A_j$ ), there can be no other symbols ‘1’ in column  $j$  of possible permutations matrix ( $C$ ). To meet this restrictive condition, it is necessary to eliminate from column  $j$  of the matrix the so-called “extra” characters ‘1’. As the stated correspondence may turn out false for a certain vortex, the elimination of characters ‘1’ from the ma-

trix must be performed so that a possibility to restore the matrix at a certain step still remained. The *Mirage* variable is introduced for this purpose: its value changes after each cycle of imposing a constraints system on the possible permutations matrix. Consequently, the operations to be made can mathematically be represented as follows: if

$C[N+1, i] = 1$  and  $C[j, i] = '1'$ , the element  $C[k, i]$  of value '1' (for  $k = 1 \dots m; k \neq i$ ) is assigned the current value of *Mirage* variable. If all the values of the matrix "number of possible permutations" are greater than 1, to find a quick solution, it is necessary to start work at the lowest value string.

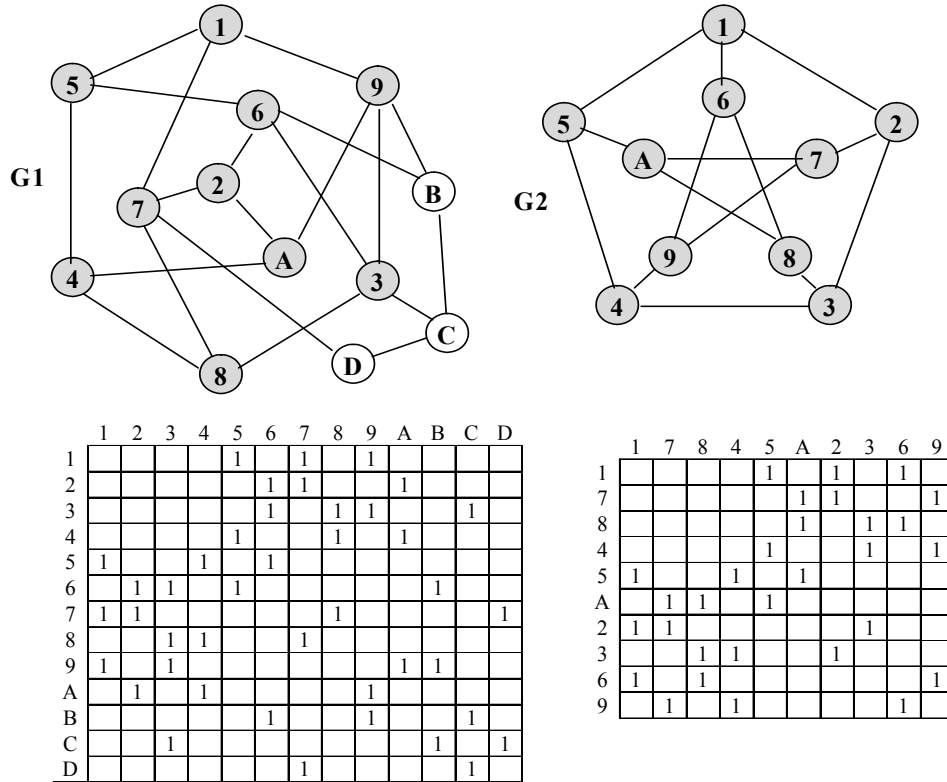


Fig. 3. An illustrative example of an isomorphic graph nesting

Рис. 3. Частный пример изоморфного вложения графов

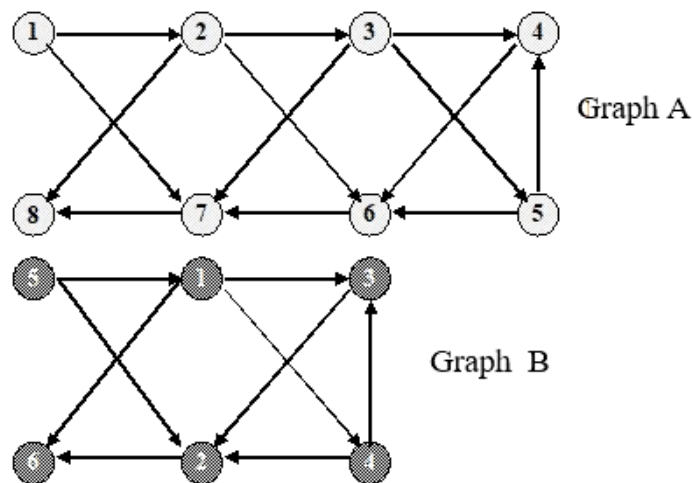


Fig. 4. Example of detection of a quality anomaly graph isomorphic nesting in SCLC configuration of IETM

Рис. 4. Пример распознавания изоморфного вложения графа – аномалии качества на структуре ЛСПК ИЭТР

Adjacency matrix of graph A:

	1	2	3	4	5	6	7	8	$S(x)$
1	0	1	0	0	0	0	1	0	2
2	0	0	1	0	0	1	0	1	3
3	0	0	0	1	1	0	1	0	3
4	0	0	0	0	0	1	0	0	1
5	0	0	0	1	0	1	0	0	2
6	0	0	0	0	0	0	1	0	1
7	0	0	0	0	0	0	0	1	1
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$S^+(x)$	0	1	1	2	1	3	3	2	

Adjacency matrix of graph B:

	1	2	3	4	5	6	$S(x)$
1	0	0	1	1	0	1	3
2	0	0	0	0	0	1	1
3	0	1	0	0	0	0	1
4	0	1	1	0	0	0	2
5	1	1	0	0	0	0	2
6	0	0	0	0	0	0	0
$S^+(x)$	1	3	2	1	0	2	

Possible permutations matrix (matrix C):

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	Number of permutations
B1	0	1	1	0	0	0	0	0	2
B2	0	0	0	0	0	1	1	0	2
B3	0	0	0	1	0	1	1	0	3
B4	0	1	1	0	1	0	0	0	3
B5	1	1	1	0	1	0	0	0	4
B6	0	0	0	1	0	1	1	1	4

Fig. 5. Adjacency matrices of graphs and of possible permutations

Рис. 5. Матрицы смежности графов и возможных подстановок

And the first of the previously unused cells of the corresponding string is assigned the so-called “focus”, i. e. an active cell is set (the coordinates of permutation vertices  $C [FocB, FocA]$  are determined). The remaining ‘1’ characters must be “covered” by *Mirage* variable.

When  $B_i \leftrightarrow A_j$ , to the vertices  $B_k$  ( $k = 1...m$ ) adjacent to  $B_j$ , there can correspond only those  $A_l$  ( $l = 1...n$ ) vertices that are adjacent to  $A_i$  vertex. To meet this condition, the so-called “extra” ‘1’ characters in the possible permutations matrix must be “covered” by *Mirage* variable. Mathematically, this can be written as follows:

a) if  $C[j, i] = '1'$  and  $B[j, FocB] = '1'$  and  $A[j, FocA] \neq '1'$  then  $C[j, i] = \text{Mirage}$ ;

b) if  $C[j, i] = '1'$  and  $B[FocB, i] = '1'$  and  $A[FocA, i] \neq '1'$  then  $C[j, i] = \text{Mirage}$ ,

where  $A, B$  are initial adjacency matrices, and  $C$  is possible permutations matrix.

3. Other special constraints taking account of the specifics of detection of a quality anomaly graph isomorphically nested in a specified SCLC configuration within the IETM in operation.

The presented list of constraints is not complete and closed. In this case, the constraints perform the function of a logic filter. In accordance with the specifics of the problem of detection of a quality anomaly graph isomorphically nested in a specified SCLC configuration within the IETM in operation, additional filters – constraints may be introduced.

The proposed algorithm for detection of a quality anomaly graph isomorphically nested in SCLC configuration allows to specify the structure of quality anomaly detection method applied to IETM for aircraft maintenance and repair. The final version of the method structure is presented in fig. 6

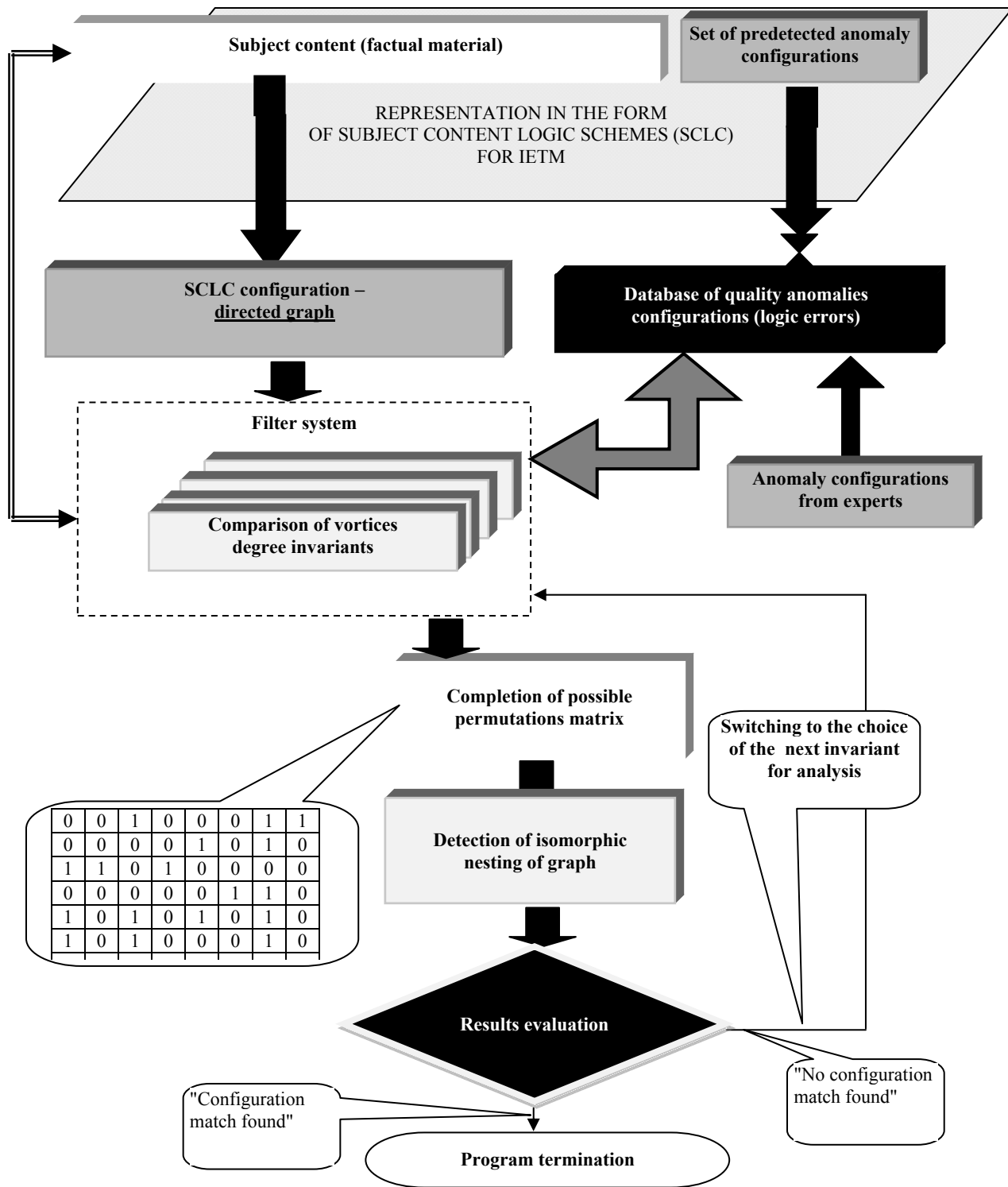


Fig. 6. Logic structure of method of detecting quality anomalies in IETM for aircraft maintenance and repair

Рис. 6. Логическая структура метода выявления аномалий качества ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники

Generally, the method of quality anomalies detection of IETM for aircraft maintenance and repair comprises the following succession of key stages:

1) formalize and configurate SCLC for IETM in the form of directed graph;

2) select the configuration of the quality anomaly graph (logic error) from the database of quality anomaly configurations based both on the analysis of previously detected logic errors of content representation in IETM, and on relevant database provided by experts;

3) using a filter system based on the selected pair of configuration models of SCLS proper and of the anomaly, complete the matrix of possible permutations;

4) solve the mathematico-logical problem of the graph isomorphic nesting detection;

5) analyze the detection outcome, if necessary, select for analysis the next version of configuration models of SCLS proper and of the anomaly.

**Conclusion.** The method of quality anomalies detection of IETM for aircraft maintenance and repair allows to detect logic-configuration anomalies of SCLC for IETR from the list (database) of pre-detected quality anomaly configurations (logic errors of electronic content presentation); the method can be applied to interpret the results of quality assessment of IETM for aircraft maintenance and repair, i.e. detection and elimination of the stated quality anomalies, the configuration of which is known in advance.

### References

- Bojcov B. V., Kryanev Y. V. [Implementation approach the concept of quality control. Theoretical and methodological aspects]. *Kachestvo i zhizn'*. 2016, No. 4(12), P. 7–13 (In Russ.).
- Boehm B. U. et al. *Harakteristiki kachestva programmnogo obespecheniya* [Characteristics of software quality]. Moscow, Mir Publ., 1981, 312 p.
- Boehm, B. U. *Inzhenernoe proektirovanie programmnogo obespecheniya* [Engineering design software]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1985, 252 p.
- Bruks F. *Mificheskij cheloveko-mesyac ili kak sozdayutsya programmnye sistemy* [Mythical man-month: how to create a software system]. Saint Petersburg, Simvol Publ., 2010, 304 p.
- Boehm B. W. *Software engineering economics*. 1991 by Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632, USA. 767 p.
- Frolova E. A. et al. [The method of logical schemes of subject content to ensure the quality of the developed interactive electronic technical manuals]. *Voprosy radioelektroniki*. 2018, No. 10, P. 58–65 (In Russ.).
- Frolova E. A., Ivakin Ya. A. [Synthesis logical schemes of subject content maintenance and repair of aircraft equipment]. *Informacionno-kommunikacionnye tekhnologii: dostizheniya, problemy, innovacii (IKT-2018)*. Sb. st. I Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii [Information and communications technology: achievements, challenges, innovation (ICT-2018). Sat. article I of the International scientific-practical conference]. Polock, 2018, P. 224–226 (In Russ.).
- Frolova E. A. et al. [Scientific-methodological concept of quality management interactive electronic technical manuals for operation and repair of aircraft]. *Voprosy radioelektroniki*. 2018, No. 10, P. 66–74 (In Russ.).
- Korshunov G. I. et al. The nature-technogenic control system design information maintenance. Proceedings of 2017 XX IEEE international conference on soft computing and measurements (SCM). 2017, P. 662–665.
- Semenova E. G. et al. [Quality management of interactive electronic technical manuals for aircraft operation and maintenance at all stages of the life cycle]. *Voprosy radioelektroniki*. 2018, No. 1, P. 73–81 (In Russ.).
- Boem B. U. et al. *Kharakteristiki kachestva programmnogo obespecheniya* [Characteristics of the quality of software]. Moscow, Mir Publ., 1981, 312 p.
- Frolova E. A. et al. [Formal representation of quality indicators of spatial processes management]. Conditions alternative to the development of modern economic systems management, innovation. Proceedings of the International scientific and practical conference. 2016, P. 182–192.
- Frolova E. A., Ivakin Ya. A. [Quality anomaly of interactive electronic technical manuals for aircraft maintenance and repair]. *Informacionno-kommunikacionnye tekhnologii: dostizheniya, problemy, innovacii (IKT-2018)*. Sb. st. I Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii [Information and communication technologies: achievements, problems, innovations (ICT-2018). Sat. article I of the International scientific-practical conference]. Polock, 2018, P. 227–229 (In Russ.).
- Zykov A. A. *Osnovy teorii grafov* [Fundamentals of graph theory]. Moscow, Vuzovskaya kniga Publ., 2004, 664 p.
- Nechepurenko M. I. et al. *Algoritmy i programmy resheniya zadach na grafhah i setyah* [Algorithms and programs for solving problems on graphs and networks]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990, 515 p.

### Библиографические ссылки

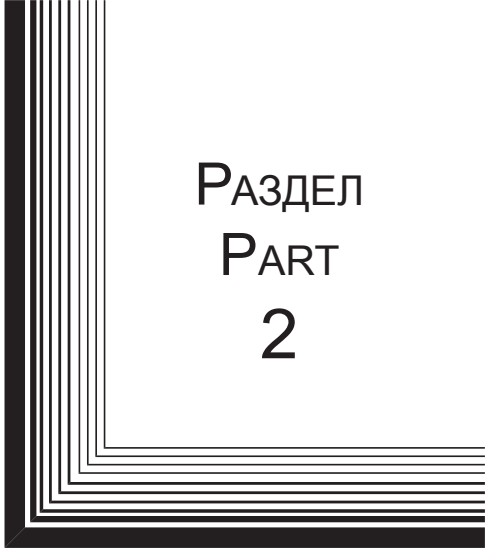
- Бойцов Б. В., Крянев Ю. В. Внедренческий подход в концепции качества управления. Теоретико-методологические аспекты // Качество и жизнь. 2016. № 4(12). С. 7–13.
- Характеристики качества программного обеспечения / Б. У. Боэм [и др.]. М. : Мир, 1981. 312 с.
- Боэм Б. У. Инженерное проектирование программного обеспечения : пер. с англ. М. : Радио и связь, 1985. 252 с.
- Брукс Ф., Чапел Х. Мифический человеко-месяц или как создаются программные системы. 2-е изд. СПб. : Символ, 2010. 304 с.
- Boehm B. W. *Software engineering economics* / Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs. New Jersey 07632, USA, 1991. 767 p.
- Метод логических схем предметного контента для обеспечения качества разрабатываемых интерактивных электронных технических руководств / Е. А. Фролова [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 10. С. 58–65.
- Фролова Е. А., Ивакин Я. А. Синтез логических схем предметного контента эксплуатации и ремонта авиационной техники // Информационно-коммуникационные технологии: достижения, проблемы, инновации (ИКТ-2018) : сб. ст. I Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета. Полоцк, 2018. С. 224–226.
- Научно-методическая концепция менеджмента качества интерактивных электронных технических руководств по эксплуатации и ремонту авиационной техники / Е. А. Фролова [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 10. С. 66–74.




9. The nature-technogenic control system design information maintenance / R. I. Solnitsev [et al.] // Proceedings of 2017 XX IEEE Intern. Conf. on soft computing and measurements (SCM). 2017. P. 662–665.
10. Управление качеством интерактивных электронных технических руководств по эксплуатации и ремонту авиационной техники на всех этапах жизненного цикла / Е. Г. Семенова [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 1. С. 73–81.
11. Характеристики качества программного обеспечения / Б. У. Бозм [и др.]. М. : Мир, 1981. 312 с.
12. Фролова Е. А., Мичурин С. В., Семенова Е. Г. Формальное представление показателей качества управления пространственными процессами // Conditions alternative to the development of modern economic systems management, innovation: Proceedings of the International scientific and practical conference 2016. С. 182–192.
13. Фролова Е. А., Ивакин Я. А. Модель аномалии качества интерактивных электронных технических руководств по эксплуатации и ремонту авиационной техники // Информационно-коммуникационные технологии: достижения, проблемы, инновации (ИКТ-2018) : сб. ст. I Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета. Полоцк, 2018. С. 227–229.
14. Зыков А. А. Основы теории графов. М. : Вузовская книга, 2004. 664 с.
15. Алгоритмы и программы решения задач на графах и сетях / М. И. Нечепуренко [и др.]. Новосибирск : Наука, 1990. 515 с.

© Frolova E. A., Ivakin Ya. A.,  
Smirnov A. O., 2018





РАЗДЕЛ  
PART  
2



АВИАЦИОННАЯ  
И РАКЕТНО-  
КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

AVIATION  
AND SPACECRAFT  
ENGINEERING



УДК 629.78.064.56:629.78.015.4.023

Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-624-630

**Для цитирования:** Воронцова Е. О., Лукьяненко М. В., Крючков П. А. Оценка целостности фотопреобразователей солнечных батарей, применяемых на перспективных космических аппаратах // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 4. С. 624–630. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-624-630

**For citation:** Vorontsova E. O., Lukyanenko M. V., Kryuchkov P. A. [Cells wholeness inspection for solar array used on perspective spacecrafts]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 4, P. 624–630 (In Russ.). Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-624-630

## ОЦЕНКА ЦЕЛОСТНОСТИ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ НА ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

Е. О. Воронцова<sup>1,2\*</sup>, М. В. Лукьяненко<sup>1</sup>, П. А. Крючков<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

<sup>2</sup>АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

<sup>3</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30

\* E-mail: jenvoroncova@gmail.com

*В системах электропитания космических аппаратов в последнее время широкое применение нашли новые виды первичных источников питания: солнечные батареи (БС) на основе трехкаскадных арсенид-галлиевых фотопреобразователей взамен фотопреобразователей на основе кремния.*

*Спецификой данных фотопреобразователей (ФПЗП) является их малая толщина и хрупкость. В результате ФПЗП имеют низкую стойкость к внешним механическим воздействиям с образованием трещин. Трещины в ФПЗП приводят к снижению его мощности и, как следствие, к снижению мощности БС в целом.*

*В настоящее время контроль технического состояния БС осуществляется следующими методами: визуальный метод контроля целостности ФП (определяется целостность ФП и защитного стекла); измерение световой вольт-амперной характеристики БС, метод электролюминесценции.*

*Данные методы не позволяют достоверно и безопасно выявить дефекты в виде скрытых трещин на фотопреобразователях. Необходим метод, который бы позволял локализовать дефектный ФП и не требовал непосредственного подключения к БС, т. е. бесконтактный метод.*

*Суть предлагаемого метода заключается в том, что при облучении ФП лазерным излучением с длиной волны 0,40–0,55 мкм (область зеленого спектра) возникает люминесценция и ФП излучает свет в красной области спектра.*

*В АО «ИСС» проводился эксперимент по автоматизированному визуальному осмотру ФП БС на стенде. Стенд имеет движущуюся платформу, способную двигаться вдоль БС как по вертикали, так и по горизонтали. На платформе установлены фотокамера и лазер, который излучает свет в зеленой части спектра. Когда платформа устанавливается напротив проверяемого ФП, включается лазер, луч от которого направлен на ФП. Под воздействием лазера возникает фотолюминесценция, и поверхность ФП излучает свет в красной области спектра. Излучение фиксируется фотокамерой для измерения интенсивности спектра люминесценции ФП с помощью программного обеспечения (ПО). Далее, с помощью ПО сравнивают эту величину с величиной интенсивности спектра люминесценции, полученной заранее при тестировании эталонного ФП и записанной в памяти компьютера.*

*Установка на основе метода фотоэлектролюминесценции позволяет бесконтактно определить наличие дефектов ФП, определить скрытые трещины, снизить влияние человеческого фактора.*

**Ключевые слова:** система электропитания, солнечная батарея, фотопреобразователь, метод, люминесценция.

# CELLS WHOLENESS INSPECTION FOR SOLAR ARRAY USED ON PERSPECTIVE SPACECRAFTS

E. O. Vorontsova<sup>1,2\*</sup>, M. V. Lukyanenko<sup>1</sup>, P. A. Kryuchkov<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup> JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems"

52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

<sup>3</sup> National Research Tomsk Polytechnic University

30, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation

\*E-mail: jenvoroncova@gmail.com

*New types of primary power supply have been used for wide application in Electric Power Systems (EPS) of spacecrafts (S/C) recently. These are Solar arrays (SA) based on three-stage GaAs cells instead of Si cells.*

*GaAs cells specific data is their low thickness and fragility. Due to that they have low resistance to mechanical stress and crack. Cracks in cells cause their power decrease and SA power decrease in whole.*

*At the present time SA maintenance is carried out by the following methods: the visual method of cells wholeness inspection (to detect cells and protective glass wholeness), SA current-voltage characteristic measurement, and the electro-luminescence method.*

*These methods do not allow detecting defects reliably and safely like hidden cracks in cells.*

*It is necessary to define the method which will help to detect a defective cell without direct SA connection. It means a non-contact method.*

*The content of the proposed method consists in cells illumination by lasing with wave length (0.40–0.55)  $\mu\text{m}$  (the green spectrum domain). It produces luminescence and the cell reflects light in the red spectrum domain.*

*The experiment of automatic visual SA cells inspection has been performed on the test stand at JSC "ISS". This stand has the moving platform which can be moved along SA as in vertical and also horizontal directions. On the platform there is a camera and laser producing light in the green spectrum domain.*

*When the platform is set opposite the tested cell, laser is switched on and its beam is pointed at the cell. Luminescence appears in lasing and the cell surface reflects the light in the red spectrum domain. The camera registers the emission to measure the cell luminescence spectrum intensity by means of software (S/W).*

*Then this value is compared by S/W with luminescence spectrum intensity value received and recorded in PC memory before the cell-etalon testing.*

*This test stand based on the electro-luminescence method allows us to define cells defects presence without contact and hidden cracks; to decrease impact of human factor.*

**Keywords:** Electric Power System, Solar Array, cell, method, luminescence.

**Введение.** Система электропитания (СЭП) космического аппарата (КА) является одной из основных его систем, обеспечивающих функционирование и выполнение целевых задач. Мощность СЭП обеспечивает энергооборуженность космического аппарата [1]. Структурно СЭП состоит из первичных, вторичных источников энергии, контролирующей и преобразующей аппаратуры. Солнечная батарея (БС) является первичным источником энергии. Ресурс КА во многом определен ресурсом БС [2–3].

БС КА подвержена ресурсной деградации, в результате чего энергооборуженность КА снижается. Деградация БС закладывается в расчете при проектировании, с обеспечением необходимой выходной мощности в конце срока активного существования (САС). Для обеспечения расчетного изменения мощности параметры БС должны соответствовать заявленным в техническом задании параметрам. Проверка параметров БС производится на заводе-изготовителе КА (АО «ИСС»). Применяемыми в настоящий момент методами являются метод визуального осмотра и метод измерения вольт-амперной характеристики (ВАХ) БС при импульсном освещении [4; 5].

**Специфика фотопреобразователей.** Основным структурным элементом БС является фотопреобразователь (ФП). ФП осуществляет преобразование энергии света в электрическую энергию. С целью увеличения эффективности работы БС в настоящее время в АО «ИСС» практически полностью осуществлен переход на трехкаскадные арсенид-галлиевые фотопреобразователи (ФПЗП) на основе структуры GaInP/GaInAs/Ge [6–9].

Спецификой ФПЗП является их малая толщина и хрупкость. В результате ФПЗП имеют низкую стойкость к внешним механическим воздействиям с образованием трещин. Трещины в ФПЗП приводят к снижению его мощности и, как следствие, к снижению мощности БС в целом. Кроме того, проведенные исследования и анализ телеметрической информации большого числа КА показывают, что наличие повреждений ФП может явиться причиной выхода из строя рядом расположенных исправных ФП, что еще более ухудшает ситуацию [10; 11].

По проведенным оценкам не определяется порядка 0,1 % скрытых трещин в пластинах ФПЗП [10].

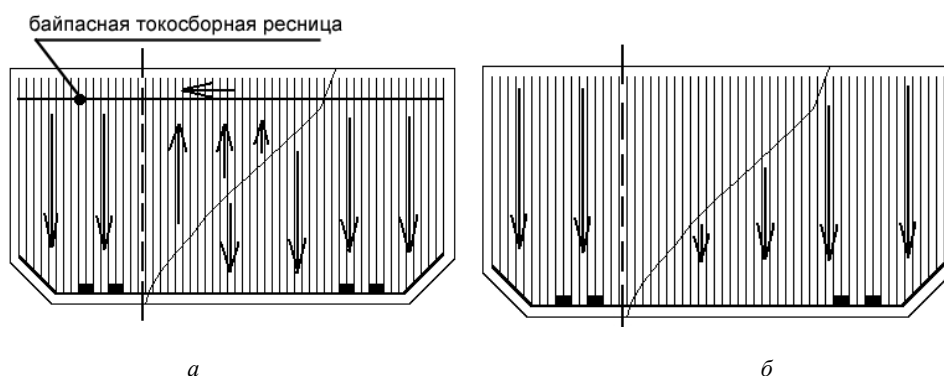


Рис. 1. Съем мощности с ФПЗП

Fig. 1. Removal of power from cells

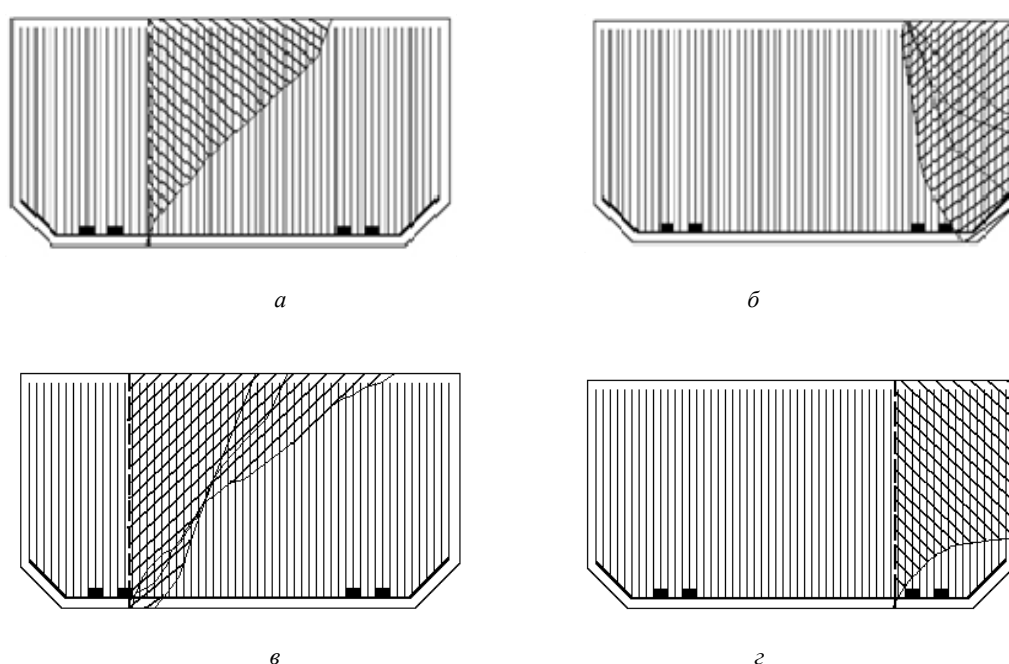


Рис. 2. Уменьшение эффективной площади ФПЗП при наличии трещин в пластине ФПЗП

Fig. 2. Reduction of the effective area of cells in the presence of cracks in the plate cells

Усугубляет ситуацию тот факт, что в настоящее время применяются ФПЗП без байпасной токосборной ресницы (ФПЗП производства АО «НПП «Квант» и ФПЗП производства ПАО «Сатурн»), в результате чего при наличии трещины любого вида происходит потеря снимаемой мощности с каждого ФПЗП. На рис. 1, *а* представлена ФПЗП с байпасной токосборной ресницей, на рис. 1, *б* – без нее соответственно, стрелками указывается принцип съема энергии. При наличии байпасной токосборной ресницы даже при наличии трещины в пластине ФПЗП съем энергии осуществляется практически полностью.

Оценка потери эффективной области ФПЗП при наличии трещин составляет в среднем 25 % для различных вариантов трещин. На рис. 2 представлены ФПЗП с трещинами различного вида, с заштрихованных областей не происходит съем мощности [12].

Причинами возникновения трещин ФПЗП на участке выведения и при штатной эксплуатации являются следующие:

- а) механические нагрузки от работы ракетносителя и разгонного блока;
- б) факторы космического пространства (микрометеориты).

Достаточность механической стойкости БС с ФПЗП в своем составе на участке выведения и в процессе летной эксплуатации подтверждается комплексом наземной отработки и опытом эксплуатации изделий-аналогов.

Причинами возникновения трещин ФПЗП при изготовлении и наземной эксплуатации являются следующие:

- а) несанкционированные механические воздействия при сборочных операциях, транспортировке и наземной эксплуатации;

б) наличие концентраторов механических напряжений в ФПЗП;

в) термомеханические воздействия на ФПЗП при проведении сварки коммутационных шин к контактными площадкам;

г) термовакuumное воздействие при технологических дегазации и термоциклировании.

Мерами по обеспечению требуемых характеристик в процессе наземной эксплуатации являются различные виды контроля состояния БС в целом и ФПЗП в частности. С увеличением САС КА разработки и изготовления АО «ИСС» до 15 лет повышение качества контроля солнечных батарей особенно актуально.

**Применяемые методы контроля качества БС.** В настоящее время техническое состояние солнечных батарей оценивают, в основном, методом визуального контроля и методом измерения световой ВАХ.

1. Метод визуального контроля. Метод визуального контроля проводится оператором в два этапа. *Первый этап* заключается в осмотре механической конструкции БС и ФГЧ. При этом оператор руководствуется перечнем внешних дефектов. К основным внешним дефектам относятся:

- трещины в ФПЗП;
- трещины в защитных стеклах ФПЗП;
- нарушение паяных соединений в монтаже БС;
- пыль, грязь, краска на поверхности панели;
- механические повреждения на конструкции каркасов;
- наличие трещин на изоляторах соединителей;
- повреждение резьбы соединителей;
- повреждение струн, каркаса;
- отрыв держателей;
- лучевые трещины на лицевых и тыльных стеклах ФПЗП;
- воздушные пузыри между стеклом и ФПЗП диаметром более 10 мм;
- обрывы токоотводов модулей шунтирующих и модулей развязывающих;
- трещины на лицевых стеклах диодных блоков;
- лучевые трещины на тыльных стеклах диодных блоков.

Производительность первого этапа визуального контроля оценивается 10 мин/м<sup>2</sup> (время осмотра 1 м<sup>2</sup> БС).

*Второй этап* состоит в определении типа трещин: трещины защитных стекол или трещины в ФПЗП. Данный этап заключается в осмотре лицевой поверхности поврежденного ФПЗП при его освещении лампой накаливания с тыльной стороны. При этом наличие видимого просвета означает трещину в пластине ФПЗП. Отсутствие просвета говорит о наличии трещины стекла.

На рис. 3 представлена фотография, полученная при освещении тыльной стороны ФПЗП галогеновой лампой мощностью 20 Вт. Видимый просвет указывает на наличие трещины пластины ФПЗП.

Качество визуального осмотра определяется квалификацией оператора и в любом случае не обеспечивает выявление скрытых трещин, проявляющих себя при штатной эксплуатации. Согласно проведенной оценке, трещины в пластине ФПЗП не всегда могут

быть определены на просвет. В среднем, не определяется 0,1 % скрытых трещин (процент числа ФПЗП со скрытыми трещинами от общего числа ФПЗП) [13].

Достоинства метода заключаются в простоте его проведения и отсутствии необходимости в закупке дорогостоящего оборудования.

Недостатками метода являются его субъективность и невозможность обнаружения скрытых трещин пластины ФПЗП.



Рис. 3. Трещина ФПЗП, определенная визуальным методом

Fig. 3. Cell crack, determined by a visual method

2. Метод измерения световой вольт-амперной характеристики. После проведения визуального осмотра проводятся измерения ВАХ БС путем засветки панелей БС. Метод основывается на измерении значения величин тока и напряжения на подключенной нагрузке к БС при изменении сопротивления нагрузки за время светового импульса. Метод дает интегральную оценку текущего технического состояния солнечных батарей.

Достоинством метода является то, что он позволяет с высокой достоверностью определять наличие крупных дефектов. Недостатком метода является невозможность локализации дефектов, невозможность обнаружения небольших дефектов. Снятые характеристики сильно зависят от расположения осветителя и от величины светового потока. Для проведения метода необходима точная ориентация осветителя и БС [13].

3. Метод люминесценции при протекании прямого тока. При обнаружении несоответствия заявленной ВАХ измеренной и одновременном отсутствии видимых дефектов ФПЗП дополнительно может применяться метод люминесценции ФПЗП при прохождении прямого тока (рис. 4). Метод заключается в визуальном осмотре ФПЗП, люминесцирующих при прохождении через них прямого тока от внешнего источника питания. Источник питания подключают к элементарному генератору (ЭГ) БС в обход развязывающего устройства (РУ). Время прохождения тока ограничивают несколькими секундами (для недопущения перегрева ФПЗП). При отсутствии фототока ФПЗП работает на прямой ветви ВАХ в первом квадранте. Протекающий прямой ток вызывает люминесценцию фотопреобразователя. По визуальной картине свечения определяют наличие дефектов в ФПЗП. О нали-



тии трещины ФПЗП говорит резкая граница люминесцирующей и темной областей.

Достоинства метода заключаются в том, что он позволяет локализовать дефекты типа «скрытые трещины» ФПЗП и определяет отсутствие контакта в ЭГ.

Недостатком метода является то, что его проведение должно осуществляться только высококвалифицированными специалистами (в АО «ИСС» данную работу проводят разработчики БС). При реализации метода существует риск повреждения БС.

**Описание предлагаемого метода контроля качества БС.** Необходим метод, который бы позволял локализовать дефектный ФП и не требовал непосредственного подключения к БС, т. е. бесконтактный метод [14; 15].

Разрабатываемый метод должен удовлетворять следующим критериям:

- 1) невысокая стоимость устройства;
- 2) безопасность применения для персонала;

- 3) безопасность применения для солнечной батареи;
- 4) определение скрытых дефектов ФП;
- 5) возможность ведения протоколирования, записи объективных данных о каждом ФП;
- 6) возможность введения автоматизации процесса проверки;
- 7) возможность применения на всех стадиях производства.

Для нахождения подобного метода были проведен патентный поиск, рассмотрены различные существующие методы, позволяющие определить трещины ФП.

Суть предлагаемого метода заключается в том, что при облучении ФП лазерным излучением с длиной волны 0,40–0,55 мкм (область зеленого спектра) возникает люминесценция, и ФП излучает свет в красной области спектра. Причем люминесценция возникает как в освещенной лазером части ФП, так и в неосвещенной (рис. 5).



Рис. 4. Применение метода люминесценции ФПЗП

Fig. 4. Application of the luminescence cell method

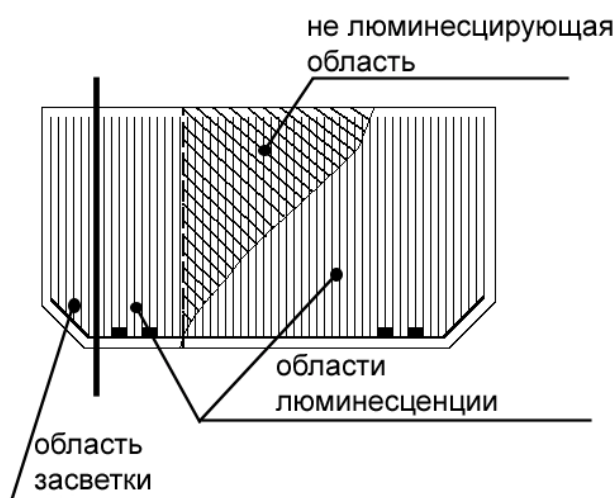


Рис. 5. Люминесцирующая и нелюминесцирующая области при наличии трещины ФП

Fig. 5. Luminescent and non-luminescent areas in the presence of an cell crack

В АО «ИСС» проводился эксперимент по автоматизированному контролю ФП БС на стенде, изготовленном в рамках технического задания на выполнение составной части опытно-конструкторской работы по теме «Разработка промышленной технологии транспортирования и входного контроля БС с улучшенными удельными характеристиками», исполнитель ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева» (СибГАУ).

Стенд имеет движущуюся платформу, способную двигаться вдоль БС как по вертикали, так и по горизонтали (рис. 6). На платформе установлены фотокамера и лазер, который излучает свет в зеленой части спектра. Когда платформа устанавливается напротив проверяемого ФП, включается лазер, луч от которого направлен на ФП. Под воздействием лазера возникает фотолюминесценция, и поверхность ФП излучает свет в красной области спектра. Излучение фиксируется фотокамерой для измерения интенсивности спектра люминесценции ФП с помощью программного обеспечения (ПО). Далее, с помощью ПО сравнивают эту величину с величиной интенсивности спектра люминесценции, полученной заранее при тестировании эталонного ФП и записанной в памяти компьютера.

На рис. 7 представлен фотоснимок целого ФП без воздействия лазерного излучения.

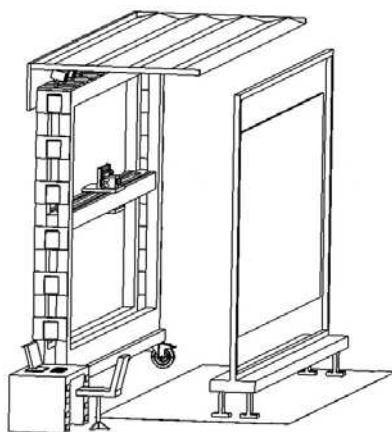


Рис. 6. Стенд для проверки БС

Fig. 6. Stand to check the SA

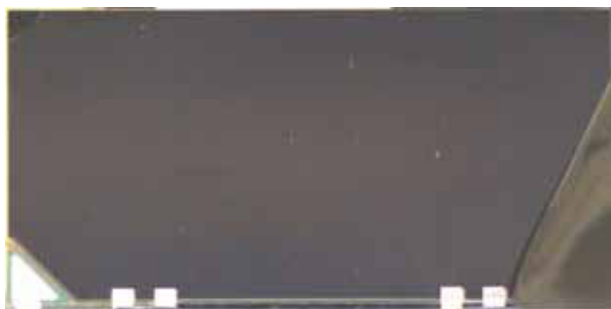


Рис. 7. Фотоснимок целого ФП

Fig. 7. Photograph of the whole cell

На рис. 8 представлен фотоснимок ФП под воздействием лазерного излучения. Как видно, ФП не имеет трещин, интенсивность люминесценции близка к эталонной.



Рис. 8. Фотоснимок ФП под действием лазера

Fig. 8. Photograph of cell by laser

ФП с трещинами под воздействием лазера показан на рис. 9. Как видно, у такого ФП можно наблюдать люминесцирующие области и области, где люминесценция не происходит. Данный метод позволяет оценить целостность ФП.



Рис. 9. Фотоснимок разбитого ФП под действием лазера

Fig. 9. Photograph of broken cell under the action of laser

**Заключение.** Рассмотрены применяемые в настоящий момент методы контроля качества ФП БС, а также описаны их достоинства и недостатки. Разработан новый метод контроля состояния солнечной батареи, позволяющий определять скрытые трещины в пластинах фотопреобразователей – метод люминесценции под действием оптического возбуждения. Определены требования к аппаратному составу разработанного метода. Проведена успешная апробация метода.

Установка на основе метода фотоэлектролюминесценции позволяет:

- бесконтактно определить наличие дефектов ФП;
- определить скрытые трещины;
- снизить влияние человеческого фактора.

#### Библиографические ссылки

1. Источники энергии электроснабжения космических аппаратов : монография / М. В. Лукьяненко [и др.] / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2008. 176 с.
2. Системы электропитания космических аппаратов / Б. П. Соустин [и др.]. Новосибирск : Сиб. изд-во, 1994. 318 с.

3. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей : пер с англ. М. : Энергоатомиздат, 1983. 360 с.
4. Методы контроля целостности фотопреобразователей / Т. Н. Журавлева [и др.] // Наука вчера, сегодня, завтра. 2016. № 4 (26) С. 148–156.
5. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я. С. Уманский [и др.]. М. : Металлургия, 1982. 632 с.
6. Минин А. А., Матрунчик А. С. Перспективы использования фотоэлектрических преобразователей в мире и в России // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2016. Т. 7, № 1. С. 74–81.
7. Крючков П. А., Стадучин Н. В. Состояние и перспективы развития СЭП платформ тяжелого класса производства АО «ИСС» // IV науч.-техн. конф. молодых специалистов АО «ИСС» : сб. тезисов конф. Красноярск, 2017. С. 112–114.
8. Алферов Ж. И. Тенденции и перспективы развития солнечной энергетики // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38, вып. 8. С. 48–51.
9. Domínguez C., Antón I., Sala G. Solar simulator for concentrator photovoltaic systems // Optics Express. 2008. Т. 16, № 19. P. 14894–14901.
10. Колтун М. М. Оптика и метрология солнечных элементов. М. : Энергоатомиздат, 1983. 365 с.
11. Фотоэлектрические свойства структур с микро- и нанопористым кремнием / Н. В. Латухина [и др.] // Известия Самарского научного центра РАН. 2009. Т. 11, № 3 (29). С. 66–71.
12. Барышников А. А., Горелов С. А., Мустафин Н. Ш. Анализ технологии солнечных батарей [Электронный ресурс] // Региональное развитие : электрон. науч.-практ. журнал. 2016. № 3(15). URL: <https://regrazvitie.ru/analiztehnologii-solnechnyh-batarej/> (дата обращения: 17.06.2018).
13. Сухоручкина Т. Ю. Проблемы развития возобновляемых источников энергии в России // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2016. № 2 (14). С. 40–43.
14. 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.
15. Юдаев И. В. Изучение светопропускающих свойств сотового поликарбоната – покрывного материала круглогодичных теплиц // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 120. С. 239–252.
16. Zhuravleva T. N., Leonov S. N., Golovkov V. V., Aliseenko Yu. V. [Methods for monitoring the integrity of photovoltaic cells]. *Nauka vchera, segodnya, zavtra*. 2016, No. 4 (26), P. 148–156 (In Russ.).
17. Uman'sky Ya. S., Skakov Yu. A. et al. *Kristallografiya, rentgenografiya i elektronnaya mikroskopiya* [Crystallography, X-ray Diffraction and Electron Microscopy]. Moscow, Metallurgy Publ., 1982, 632 p.
18. Minin A. A., Matrunchik A. S. [Prospects of photovoltaic cells use in the world and in Russia]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvoi arkhitektura*. 2016, Vol. 7, No. 1, P. 74–81 (In Russ.).
19. Kryuchkov P. A., Stadukhin N. V. [The state and prospects of development of EPS platforms of a heavy class of production of JSC "ISS"]. *IV nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya molodykh spetsialistov AO ISS* [IV scientific and technical conference of young specialists of JSC "ISS"]. Krasnoyarsk, 2017. P. 112–114.
20. Alferov Zh. I. [Trends and prospects of development of solar energy]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. 2004, Vol. 38, Iss. 8, P. 48–51 (In Russ.).
21. Domínguez C., Antón I., Sala G. Solar simulator for concentrator photovoltaic systems. *Optics Express*. 2008, Vol. 16, No. 19, P. 14894–14901.
22. Koltun M. M. *Optika i metrologiya solnechnykh elementov* [Optics and metrology of solar cells]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983, 365 p.
23. Latukhina N. V., Dereglazova T. S., Ivkov S. V. et al. [Photoelectric properties of structures with micro- and nano-porous silicon]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2009, Vol. 11, No. 3 (29), P. 66–71 (In Russ.).
24. Baryshnikov A. A., Gorelov S. A., Mustafin N. Sh. [Analysis of solar cell technology] *Regional'noye razvitiye: elektronnyy nauchno-prakticheskiy zhurnal*. 2016, No. 3 (15) (In Russ.). Available at: <https://regrazvitie.ru/analiztehnologii-solnechnyh-batarej/> (accessed: 17.06.2018).
25. Suhoruchkina T. Ju., Atrashenko O. S. [Problems of development of renewable energy sources in Russia]. *Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport*. 2016, No. 2 (14), P. 40–43 (In Russ.).
26. 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.).
27. Judaev I. V. [Study of the light transmitting properties of cellular polycarbonate – covering material of year-round greenhouses] *Politematicheskiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2016, No. 120, P. 239–252 (In Russ.).

## References

1. Lukyanenko M. V., Lukyanenko M. M., Lovchikov A. N., Bazilevsky A. B. *Istochniki energii elektrosnabzheniya kosmicheskikh apparatov* [Sources of energy for power supply of spacecraft]. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2008, 176 p.
2. Soustin B. P., Ivanchura V. I., Chernyshev A. I., Islyayev Sh. N. *Sistemy elektropitaniya kosmicheskikh ap-*

UDC 51-76:613.2.038

Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-631-636

**For citation:** Kovalev V. S., Manukovsky N. S., Tikhomirov A. A. [Modeling components of bioregenerative life support system intended for space purposes]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 4, P. 631–636. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-631-636

**Для цитирования:** Ковалёв В. С., Мануковский Н. С., Тихомиров А. А. Моделирование компонентов биорегенеративной системы жизнеобеспечения космического назначения // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 4. С. 631–636. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-631-636

## MODELING COMPONENTS OF BIOREGENERATIVE LIFE SUPPORT SYSTEM INTENDED FOR SPACE PURPOSES

V. S. Kovalev<sup>\*2</sup>, N. S. Manukovsky<sup>1,2</sup>, A. A. Tikhomirov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technologies  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup>Institute of Biophysics SB RAS  
50/50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

\*E-mail: kovalev49@mail.ru

*We have developed a linear model for compiling and optimizing food components in a bioregenerative life-support system (BLSS) intended for space purposes in the Excel environment using OpenSolver public add-in with COIN-OR-CBC solver.*

*The independent variables in the model are the masses of ingredients used in dishes. The objective functions of modeling are to minimize the total mass of the daily diet and maximize its antioxidant potential. The daily intakes of nutrients in the menu are limited to NASA standards. The upper and lower limits are also imposed on independent variables and the masses of dishes. We have found the content of nutrients in ingredients in open databases. The menu includes the first course, the second course, snacks, desserts, drinks, bread and water. We have presented an example of a concrete calculation of the daily menu consisting of 12 dishes: fresh-soup, chicken with rice, the roast, sausages, tofu, chickpeas, candied nuts, bread, goat milk, soy milk, cocktail and water. These dishes are prepared using 24 ingredients: table salt, water, wheat grains, rice, quinoa, millet, sweet potato, white potato, carrots, safflower oil, soybeans, chickpeas, lentils, cowpeas, strawberries, tomatoes, onions, garlic, chili pepper, quail, pork, tilapia, goat's milk and sugar. The ingredients being used represent edible biomass of plants and animals that are candidates for inclusion in BLSS. Caloric content of a daily diet is assumed to be equal to 2800 kcal. It is shown that food imbalances in the estimated daily menu are caused by a shortage of estimated daily intake of pantothenic acid, and also by an excess of iron, phosphorus and saturated fats. Excess intake of iron and phosphorus may not be critical for the health of the users of BLSS. The minimum weight of the daily menu is 2641 g, and its antioxidant potential can reach 14 mmol Trolox-equivalent.*

*Keywords: variables, objective function, ingredient, dish, nutrient.*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ БИОРЕГЕНЕРАТИВНОЙ СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В. С. Ковалёв<sup>2\*</sup>, Н. С. Мануковский<sup>1,2</sup>, А. А. Тихомиров<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

<sup>2</sup>Институт биофизики СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/50

\*E-mail: kovalev49@mail.ru

*В среде Excel с использованием решателя COIN-OR-CBC в составе общедоступной надстройки OpenSolver разработана линейная модель для составления и оптимизации пищевого звена биорегенеративной системы жизнеобеспечения (БСЖО), предназначенной для использования в космосе.*

*Независимыми переменными в модели являются массы источников пищи, используемые в блюдах. Целевыми функциями моделирования являлись минимизация общей массы суточного рациона и максимизация его антиоксидантного потенциала. Суточное потребление нутриентов в составе меню было ограничено стандартами НАСА. Верхние и нижние ограничения накладывали также на независимые переменные и массу блюд. Содер-*

жание нутриентов в источниках пищи находили в открытых базах данных. В схему меню включены первое блюдо, второе блюдо, закуски, десерты, напитки, хлеб и вода. Представлен пример конкретного расчёта суточного меню, состоящего из 12 блюд: уха из телятины, цыплёнок с рисом, жаркое, колбаски, тофу, нут, козинак, хлеб, молоко козье, молоко соевое, коктейль и вода. Эти блюда были скомпонованы из 24 ингредиентов: поваренной соли, воды, зёрен пшеницы, риса, лебеды, проса, батата, картофеля, моркови, масла сафлорового, бобов соевых, нута, чечевицы, вигны, земляники, томатов, лука, чеснока, перца чили, перепелятины, свинины, телятины, молока козье и сахара. В качестве ингредиентов использовали съедобную биомассу растений и животных, являющихся кандидатами для включения в БСЖО. Калорийность суточного рациона принята равной 2800 ккал. Показано, что пищевые дисбалансы в расчётном суточном меню обусловлены недостатком расчётного суточного потребления пантотеновой кислоты, а также избытком железа, фосфора и насыщенных жиров. Избыточное потребление железа и фосфора, возможно, не является критическим для здоровья обитателей БСЖО. Минимальная масса суточного меню составила 2641 г, а его антиоксидантный потенциал может достигать 14 ммоль тролокс-эквивалента.

**Ключевые слова:** переменные, целевая функция, ингредиенты, блюдо, нутриент.

**Introduction.** It is known that a space diet was calculated by the method of one-criterion optimization using AMPL environment [1]. In that study we assigned the masses of dishes as independent variables. The balance of ingredient masses in the dishes remained constant, whereas the use of ingredient masses as independent variables may enhance the efficiency of diet optimization. Minimizing equivalent system mass (ESM) of foods was the objective function of optimization

$$z = \min \sum_{j \in F} c_j m_{d_j}, \quad (1)$$

where  $c_j$  is the “cost” of 1 gram of the  $j$ -th dish in terms of ESM units;  $m_{d_j}$  is the mass of the  $j$ -th dish;  $F$  – a set of dishes. Nowadays, ESM calculation can be carried out on the basis of terrestrial test-beds [2]. In space conditions, the results of the calculation may not be relevant. Therefore, as an objective function, it is advisable to use the minimization of the daily food mass. This objective function is a variant of ESM minimizing, if in the equation (1) the coefficients  $c_j = 1$ .

Space radiation induces oxidative stress in cosmonauts' bodies after a long space flight on the International Space Station [3; 4]. Partial solution to the problem of oxidative stress is in the selection of ingredients that have antioxidant properties. Dietary countermeasures are food products and preparations that, when ingested into a cosmonaut's body, may have the potential to reduce the effects of ionizing radiation [5]. It is of interest to calculate the antioxidant potential of a diet.

The purpose of this work was to develop a computer model using masses of dish ingredients as independent variables for minimizing the daily food mass consumed in BLSS and maximizing food's antioxidant potential.

**Selecting dish ingredients.** When compiling the list of ingredients for diet modeling, the following conditions were met: a) data on the biochemical composition of the ingredients should be publicly available; b) the ingredients were used previously in experimental or theoretical studies of BLSS. Ingredients obtained from plants [6] partially meet these conditions; these ingredients are: wheat, rice, oats, quinoa, millet, sweet potato, potatoes, beets, lettuce, carrots, oyster mushrooms, Pinto beans, soybeans, chickpeas, lentils, cow peas, strawberries, tomatoes, cantaloupe, onions, garlic and chili.

To fulfill the norm of the content of animal protein in the diet for cosmonauts [7], we also added to our list the ingredients of animal origin that were considered as candidates for cultivation in BLSS: quail meat [8], quail eggs and pork [9], tilapia [10], milk [11], as well as table salt, water, sugar and safflower oil. Thus, the list of ingredients included 31 names.

**Model Description.** We conducted simulations in the Excel environment using the COIN-OR-CBC solver in the OpenSolver add-in [12]. We used the following objective functions: minimizing the daily food mass and maximizing its antioxidant activity. We assigned the masses of dish ingredients as independent variables. We considered the daily food mass as sum of dish masses. Our linear model was based on the matrix  $A$ :

$$A = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1v} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2j} & \cdots & x_{2v} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{iv} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{u1} & x_{u2} & \cdots & x_{uj} & \cdots & x_{uv} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

where  $u$  is the number of dish ingredients in the dishes;  $v$  – number of dishes in the daily diet;  $x_{ij}$  – mass of  $i$ -th ingredient in the  $j$ -th dish.

The rows in the matrix  $A$  represented the distribution of dish ingredients along the dishes and the columns represented the masses of dish ingredients in the dishes.

The total masses of ingredients in the daily menu were represented by a column vector:

$$\overline{VTM} = [X_1 \ X_2 \ \cdots \ X_i \ \cdots \ X_u]', \quad (3)$$

where  $X_i = \sum_{j=1}^v x_{ij}$  – mass of  $i$ -th ingredient in the daily diet.

We calculated the mass of the  $j$ -th dish using the following formula:

$$m_{d_j} = \sum_{i=1}^u x_{ij}. \quad (4)$$

We represented the content of nutrients per 100 g of ingredients as a matrix  $B$ :

$$B = \begin{pmatrix} n_{11} & n_{12} & \cdots & n_{1j} & \cdots & n_{1p} \\ n_{21} & n_{22} & \cdots & n_{2j} & \cdots & n_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ n_{i1} & n_{i2} & \cdots & n_{ij} & \cdots & n_{ip} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ n_{u1} & n_{u2} & \cdots & n_{uj} & \cdots & n_{up} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

where  $p$  is the number of monitored nutrients;  $u$  is the number of ingredients in the dishes.

The rows in matrix  $B$  represented the nutrient content of the ingredients, and the columns showed the nutrient distribution along ingredients. Data on the content of nutrients in 100 g of ingredients was taken from open databases [13–15].

We recorded the distribution of the  $j$ -th nutrient along ingredients as a column vector:

$$\overline{N}_j = [n_{j1} \quad n_{j2} \quad \cdots \quad n_{ji} \quad \cdots \quad n_{ju}]'. \quad (6)$$

We calculated the mass of the  $j$ -th nutrient in the daily menu as the scalar product of the vectors:

$$mn_j = \overline{N}_j \times \overline{VTM} / 100. \quad (7)$$

We carried out the minimization of the daily food mass using the formula:

$$TM = \min \sum_{j=1}^v md_j. \quad (8)$$

To maximize the antioxidant potential of the daily food mass, the following formula was used:

$$AP = \max \sum_{i=1}^u a_i X_i / (100 \times 1000), \quad (9)$$

where  $AP$  – antioxidant potential of the daily food mass, expressed in mmol Trolox-equivalent;  $a_i$  – antioxidant efficacy, expressed in  $\mu\text{mol}$  Trolox-equivalent [16] per 100 g of  $i$ -th ingredient [17].

**Planning the daily menu: an example.** We planned four meals that included soup, main courses, snacks, dessert, bread and drinks. We arranged the dishes according to the plan (tab. 1).

We chose a list of dishes and the composition of the ingredients in the dishes, taking into account the fact that the ingredients were included in the list given in the section “Selecting dish ingredients”. The specificity of the menu plan (tab. 1) is shown in tab. 2.

Table 1

Menu plan			
Meals			
1	2	3	4
Main course	Snack	First course	Snack
Bread	Drink	Main course	Drink
Drink		Snack	
		Dessert	
		Bread	
		Drink	

Table 2

Specific menu plan			
Eating			
1	2	3	4
Chicken with rice	Morning sausages	Fresh-soup	Nut
Bread	Soy milk	Roast	Goat milk
Water		Tofu	
		Candied nuts	
		Bread	
		Cocktail	

Some constraints were imposed on the masses of variables and dishes. The daily intakes of nutrients were restricted by NASA standards [7]. The calorie value of the daily menu was accepted to be 2800 kcal in accordance with the daily energy consumption of the explorer in the BIOS 3 complex [18] and the estimated energy consumption of the lunar base inhabitant [19]. We carried out the calculation of caloric content of the daily menu according to the Atwater formula:

$$E = 4[protein] + 9[fat] + 4[carbohydrate], \quad (10)$$

where  $[protein]$ ,  $[fat]$ ,  $[carbohydrate]$  – masses of proteins, fats and carbohydrates in the daily menu.

These 12 dishes (tab. 2, 3) include 24 ingredients (tab. 3). The data in tab. 3 were obtained as a result of optimization of the daily menu with the use of minimizing the total mass of the daily diet as an objective function.

The minimum weight of the daily diet was 2641 g, and its maximum antioxidant activity was 14 mmol Trolox equivalent. Currently, the norm on the antioxidant activity of the daily diet is not established [7]. It should be noted that the antioxidant activity of the products is determined in vitro [16], whereas in vivo the properties of the products are likely to vary.

The calculated diet was not balanced for four nutrients: iron, phosphorus, pantothenic acid and saturated fat. The values of daily intake of iron, phosphorus and saturated fats exceeded NASA standards, while the diet was deficient in pantothenic acid.

It is known that excessive intake of iron and its accumulation in the body can provoke cancer and heart disease [20–22]. In this regard, the installation of low iron consumption seems justified. Nevertheless, the range of both Russian and American products used on board the ISS to complete joint diets did not allow to maintain a low daily iron intake rate (8–10 mg) in accordance with the desire of the American side. In Russian-American joint diets actually used in the 1st–7th expeditions, iron intake was 21 mg/day. Metabolic parameters did not exceed the limits of permissible physiological fluctuations and did not indicate violations of the nutritional status of crew members. The data obtained show that the joint Russian-American diets adequately ensured the energy and constructive metabolism of the crew members during the seven long-term expeditions to the ISS and contributed to the maintenance of the operability sufficient to carry out the flight programs [23].

Table 3

## Calculated masses of ingredients in dishes and masses of dishes

Ingredients	Dishes											
	Fresh soup	Chicken	Roast	Sausages	Tofu	Chickpeas	Candied nuts	Bread	Goat milk	Soy milk	Cocktail	Water
Table salt	2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0,1	0	0	0	0
Water	238	20	40	30	200	30	0	0	0	241	100	100
Wheat grains	0	0	0	0	0	0	0	218	0	0	0	0
Rice	0	40	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0
Quinoa	0	5	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0
Millet	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sweet potato	0	50	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
White potato	70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carrot	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Safflower oil	3	4	10	18	0	0	0	0	0	0	0	0
Soybeans	0	5	0	2	17	0	0	0	0	80	0	0
Chickpeas	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0
Lentils	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Vigna	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Strawberries	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0
Tomatoes	0	5	5	0	0	5	0	0	0	0	0	0
Onion	10	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Garlic	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chili pepper	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Quail	0	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pork	0	0	5	85	0	0	0	0	0	0	0	0
Tilapia	65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Goat's milk	0	0	0	0	0	0	0	0	600	0	0	0
Sugar	0	0	0	0	2	5	7	0	0	7	7	0
Masses of dishes, g	400	201	142	139	219	50	107	218	600	328	137	100

Thus, the daily iron intake (23 mg) calculated in this model is probably not critical. If we consider the consumption of iron in relation to its available form, the NASA requirement looks more realistic.

The upper permissible level of daily intake of phosphorus is not established. Therefore, it is likely that the daily consumption of phosphorus calculated in this work (2685 mg against the normative 1800 mg) can be considered unacceptable after setting an upper limit on the daily intake of phosphorus.

To prevent the excess of phosphorus and saturated fat in the diets, we can recommend the selection of ingredients with the reduced content of these nutrients. Deficiency of pantothenic acid can be overcome through the use of vitamin products and / or vitamin preparations.

**Conclusion.** We described the algorithm for calculating the daily diet in BLSS intended for space purposes

using the masses of ingredients in dishes as independent variables. We simulated the menu in the Excel environment using the public OpenSolver add-in.

The distinctive features of the model are:

- the use of the free-for-all add-in of OpenSolver;
- the ability to vary the masses of components in dishes.

The calculation of the daily diet presented in this study is demonstrative in nature, since it does not take into account the compatibility of ingredients and the taste of the dishes. The prognosis of the antioxidant activity of the daily menu will be of practical significance when the corresponding dietary standard for cosmonauts is determined.

We see the prospects for further investigation of the problem in the development of recipes and the expansion of the variety of dishes intended for the use by cosmo-



nauts in BLSS, taking into account individual preferences. In addition, the results of the work provide a basis for expanding the diversity of plants species included in the phototrophic link of closed ecosystems and planning studies to assess the tolerance of the cenosis of these plants to environmental factors in such ecosystems.

**Acknowledgements.** The work was carried out within the framework of the State Program on the subject No. 56.1.4, section VI of the Program of Fundamental Scientific Research of the Russian Academy of Sciences for 2013–2020.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках Государственной программы по теме № 56.1.4, раздел VI Программы фундаментальных научных исследований Российской академии наук на 2013–2020 годы.

## References

1. Olabi A. A. The optimization of a bioregenerative life support space diet. *Dissertation presented to the Faculty of the Graduate School of Cornell University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy*. 2001.
2. Czapalla M., Horneck G., Blome H. J. The conceptual design of a hybrid life support system based on the evaluation and comparison of terrestrial testbeds. *Advances in Space Research*. 2005, Vol. 35, P. 1609–1620.
3. Larina I. M., Percy A. J., Yang J., Borchers Ch. H., Nosovsky A. M., Grigoriev A. I., Nikolaev E. N. Protein expression changes caused by spaceflight as measured for 18 Russian cosmonauts. *Scientific Reports*. 2017, Vol. 7, Article number: 8142.
4. Versari S., Longinotti G., Barengi L., Maier J. and Bradamante S. The challenging environment on board the International Space Station affects endothelial cell function by triggering oxidative stress through thioredoxin interacting protein over expression: The ESA-SPHINX experiment. *FASEB Journal*. 2013, Vol. 27(11), P. 4466–4475.
5. Risk factor of inadequate nutrition. Evidence Report. National Aeronautics and Space Administration. Lyndon B. Johnson Space Center. Houston, Texas, 2015.
6. Salisbury F. B., Clark M. A. Z. Suggestions for crops grown in controlled ecological life-support systems, based on attractive vegetarian diets. *Advances in Space Research*. 1996, Vol. 18, P. 33–39.
7. Cooper M., Douglas G. and Perchonok M. Developing the NASA food system for long-duration missions. *Journal of Food Science*. 2011, Vol. 76, No. 2, P. R40–R48.
8. Meleshko G. I., Guryeva T. S., Shepelev Ye. Ya., Abakumova I. A. Quail as a possible object of biological life-support systems of space crews. *Acta Veterinaria Brno*. 1993, Vol. 62(4), P. 9–15.
9. Nelson M., Pechurkin N. S., Allen J. P., Somoval L. A. and Gitelson J. I. Closed ecological systems, space life support and Biospherics. *Handbook of Environmental Engineering*. 2009, Vol. 10, P. 517–565.
10. Gonzales J. M., Paul Jr., Brown B. Nile tilapia *Oreochromis niloticus* as a food source in advanced life support systems: Initial considerations. *Advances in Space Research*. 2006, Vol. 38, P. 1132–1137.
11. Tako Ya., Arai R., Tsuga S., Komatsubara O., Masuda T., Nozoe S. and Nitta K. SEEF: closed ecology experiment facilities. *Gravitational and Space Biology*. 2010, Vol. 23, P. 13–23.
12. Mason A. J. OpenSolver – an open source add-in to solve linear and integer programmes in Excel. *Operations Research Proceedings*. 2012, P. 401–406. Eds.: Klatte Diethard, Lüthi Hans-Jakob, Schmedders Karl. Springer Berlin Heidelberg.
13. Fooddata. Available at: <http://frida.fooddata.dk/?lang=en>.
14. SELF Nutrition Data. Available at: <http://nutritiondata.self.com/>.
15. USDA Food Composition Databases. Available at: <https://ndb.nal.usda.gov/ndb/>.
16. Khasanov V. I., Ryzhova G. L., Maltseva E. V. Metody issledovaniya antooksidantov [Methods for studying antioxidants]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*. 2004, No. 3, P. 63–75 (In Russ.).
17. USDA Database for the oxygen radical absorbance capacity (ORAC) of selected foods, Release 2. Available at: [http://www.orac-info-portal.de/download/ORAC\\_R2.pdf](http://www.orac-info-portal.de/download/ORAC_R2.pdf).
18. *Zamknutaya sistema: chelovek-vysshiy rasteniya* [Closed system: man – higher plants]. Novosibirsk, Nauka Publ. 1979, 160 p. (In Russ.).
19. Nitta K., Ohya H. Lunar base extension program and closed loop life support systems. *Acta Astronautica*. 1991, Vol. 23, P. 253–262.
20. Mainous A. G., Wells B. J., Koopman R. J., Everett C. J., Gill J. M. Iron, lipids, and risk of cancer in the Framingham Offspring cohort. *American Journal of Epidemiology*. 2005, Vol. 161(12), P. 1115–1122.
21. Sullivan J. L. Stored iron and ischemic heart disease: empirical support for a new paradigm (Editorial Comment). *Circulation*. 1992, Vol. 86, P. 1036–1037.
22. Salonen J. T., Nyyssonen K., Korpela H., Tuomilehto J., Seppanen R., Salonen R. High stored iron levels are associated with excess risk of myocardial infarction in eastern Finnish men. *Circulation*. 1992, Vol. 86(3), P. 803–811.
23. Agureev A. A., Kalandarov S., Vasilieva V. F., Gurova L. A. [Nutrition of crews of long-term missions on the International Space Station]. *Aviakosmicheskaya i ehkologicheskaya medicina*. 2004, No. 5, P. 19–23 (In Russ.).

## Библиографические ссылки

1. Olabi A. A. The optimization of a bioregenerative life support space diet // A Dissertation presented to the Faculty of the Graduate School of Cornell University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. 2001.
2. Czapalla M., Horneck G., Blome H. J. The conceptual design of a hybrid life support system based on the evaluation and comparison of terrestrial testbeds // *Advances Space Research*. 2005. Vol. 35. P. 1609–1620.
3. Protein expression changes caused by spaceflight as measured for 18 Russian cosmonauts / I. M. Larina [et al.] // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7, Article number: 8142.

4. The challenging environment on board the International Space Station affects endothelial cell function by triggering oxidative stress through thioredoxin interacting protein overexpression: The ESA-SPHINX experiment / S. Versari [et al.] // *FASEB Journal*. 2013. Vol. 27(11). P. 4466–4475.
5. Risk factor of inadequate nutrition: Evidence Report / National Aeronautics and Space Administration ; Lyndon B. Johnson Space Center. Houston, Texas, 2015.
6. Salisbury F. B., Clark M. A. Z. Suggestions for crops grown in controlled ecological life-support systems, based on attractive vegetarian diets // *Advances in Space Research*. 1996. Vol. 18. P. 33–39.
7. Cooper M., Douglas G., Perchonok M. Developing the NASA food system for long-duration missions // *Journal of Food Science*. 2011. Vol. 76, No. 2. R40–R48.
8. Quail as a possible object of biological life-support systems of space crews / G. I. Meleshko [et al.] // *Acta Veterinaria Brno*. 1993. Vol. 62(4). P. 9–15.
9. Closed ecological systems, space life support and Biospherics / M. Nelson [et al.] // *Handbook of Environmental Engineering*. 2009. Vol. 10. P. 517–565.
10. Gonzales J. M., Paul Jr., Brown B. Nile tilapia *Oreochromis niloticus* as a food source in advanced life support systems: Initial considerations // *Advances in Space Research*. 2006. Vol. 38. P. 1132–1137.
11. SEEF: closed ecology experiment facilities / Ya Tako [et al.] // *Gravitational and Space Biology*. 2010. Vol. 23. P. 13–23.
12. Mason A. J. OpenSolver – an open source add-in to solve linear and integer programmes in Excel // *Operations Research Proceedings* / Eds.: Klatte Diethard, Lüthi Hans-Jakob, Schmedders Karl. Springer Berlin Heidelberg, 2012. P. 401–406.
13. Fooddata [Электронный ресурс]. URL: <http://frida.fooddata.dk/?lang=en> (дата обращения: 10.11.2018).
14. SELF Nutrition Data [Электронный ресурс]. URL: <http://nutritiondata.self.com/> (дата обращения: 10.11.2018).
15. USDA Food Composition Databases [Электронный ресурс]. URL: <https://ndb.nal.usda.gov/ndb/> (дата обращения: 10.11.2018).
16. Хасанов В. И., Рыжова Г. Л., Мальцева Е. В. Методы исследования антиоксидантов // *Химия растительного сырья*. 2004. № 3. С. 63–75.
17. USDA Database for the oxygen radical absorbance capacity (ORAC) of selected foods, Release 2 [Электронный ресурс]. URL: [http://www.orac-info-portal.de/download/ORAC\\_R2.pdf](http://www.orac-info-portal.de/download/ORAC_R2.pdf) (дата обращения: 10.11.2018).
18. Замкнутая система: человек – высшие растения. Новосибирск : Наука, 1979. 160 с.
19. Nitta K., Ohya H. Lunar base extension program m and closed loop life support systems // *Acta Astronaut.* 1991. Vol. 23. P. 253–262.
20. Iron, lipids, and risk of cancer in the Framingham Offspring cohort / A. G. Mainous [et al.] // *American Journal of Epidemiology*. 2005. Vol. 161(12). P. 1115–1122.
21. Sullivan J. L. Stored iron and ischemic heart disease: empirical support for a new paradigm (Editorial Comment) // *Circulation*. 1992. Vol. 86. P. 1036–1037.
22. High stored iron levels are associated with excess risk of myocardial infarction in eastern Finnish men / J. T. Salonen [et al.] // *Circulation*. 1992. Vol. 86(3). P. 803–811.
23. Питание экипажей длительных экспедиций на Международной космической станции / А. Н. Агуреев [и др.] // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2004. № 5. С. 19–23.

© Kovalev V. S., Manukovsky N. S.,  
Tikhomirov A. A., 2018

UDC 629.7.015.4

Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-637-643

**For citation:** Mironenko E. D., Miheev A. E. [The analysis of the impact of the method of fastening on strain-stress behavior of composite overwrapped pressure vessel]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 4, P. 637–643. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-637-643

**Для цитирования:** Мироненко Е. Д., Михеев А. Е. Анализ влияния способа крепления на напряженно-деформированное состояние композитного бака высокого давления // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 4. С. 637–643. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-637-643

## THE ANALYSIS OF THE IMPACT OF THE METHOD OF FASTENING ON STRAIN-STRESS BEHAVIOR OF COMPOSITE OVERWRAPPED PRESSURE VESSEL

E. D. Mironenko<sup>1\*</sup>, A. E. Miheev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

<sup>2</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: mironenko91@iss-reshetnev.ru

*Currently, composite overwrapped pressure vessels (COPV), with high weight efficiency, are widely used in spacecraft (SC). In satellite construction COPVs provide necessary volume of working fluid for the realization of a highly efficient scheme of raising SC into geostationary orbit using standard electric propulsion engines. The issue of using such vessels in order to increase the period of active lifetime of SC and the implementation of deep-space exploration programs is relevant as well.*

*The urgent task is to ensure the reliability of COPVs. The study of foreign literature suggests that fastening elements in direct contact with the vessel, have an important impact on the strain-stress behavior (SSB) of the vessel. The paper discusses the basic methods of fastening large-sized COPVs having a spherical shape – an adapter module is made in the form of a “skirt” and a cable-stayed system. We have created a finite element model (FEM) of COPV to analyze the effect of fastening elements on SSB of COPV.*

*The analysis of the obtained results of the calculation shows that a cable-stayed system has almost no effect on SSB of COPV, in contrast to a composite “skirt”, which reduces the effective stresses in the place of attachment to the vessel by two times or more, causing uneven distribution of stresses. The composite “skirt” directly transfers its buckling mode to the vessel, which reflects the significant effect of the “skirt” on the vessel’s SSB. The use of a composite “skirt” in comparison with a cable-stayed system has high probability of COPV failure.*

*The obtained results show that a cable-stayed system is more effective way to fasten COPV than a composite “skirt”.*

**Keywords:** composite overwrapped pressure vessel, strain-stress behavior, cable-stayed system, spacecraft.

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СПОСОБА КРЕПЛЕНИЯ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОМПОЗИТНОГО БАКА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Е. Д. Мироненко<sup>1\*</sup>, А. Е. Михеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железнодорожный Красноярского края, ул. Ленина, 52

<sup>2</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: mironenko91@iss-reshetnev.ru

*В настоящее время композитные баки высокого давления (КБВД), обладающие высокой весовой эффективностью, находят широкое применение в космической технике. В спутникостроении КБВД обеспечивает необходимый объем рабочего тела для реализации высокоэффективной схемы довыведения космического аппарата (КА) на геостационарную орбиту с использованием штатных электрореактивных двигательных установок. Актуальным также является вопрос использования подобных баков в целях увеличения срока активного существования КА и реализации программ освоения дальнего космоса.*

*Актуальной задачей является обеспечение надежности КБВД. Изучение зарубежной литературы свидетельствует о том, что немаловажное влияние на напряженно-деформированное состояние (НДС) бака ока-*

зывают их элементы крепления, находящиеся в непосредственном контакте с баком. Рассматриваются основные способы крепления крупногабаритных КБВД сферической формы: переходный отсек, выполненный в форме «юбки», и вантовая система. Создана конечно-элементная модель КБВД для проведения анализа влияния элементов крепления на НДС КБВД.

Анализ полученных результатов расчета показал, что вантовая система практически не оказывает влияния на НДС КБВД, в отличие от композитной «юбки», которая в два и более раза снижает действующие напряжения в районе крепления к баку, провоцируя неравномерное распределение напряжений. Композитная «юбка» напрямую передаёт свою форму потери устойчивости баку, что говорит о значительном влиянии «юбки» на НДС бака. Применение композитной «юбки», в сравнении с вантовой системой, характеризуется высокой вероятностью отказа КБВД.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что вантовая система является более эффективным способом крепления КБВД.

**Ключевые слова:** композитный бак высокого давления, напряженно-деформированное состояние, вантовая система, космический аппарат.

**Introduction.** Currently, in order to increase the competitiveness of Russia in the international market, it is necessary to constantly increase the efficiency of telecommunication spacecraft, which means an increase in the capacity of data-transmission channels. In this regard, there is a tendency to increase the payload mass, and as a consequence, there is a high demand for heavy class telecommunication spacecraft [1].

Heavy class spacecraft being developed by JSC “Reshetnev Information Satellite Systems” (JSC “ISS”) have the mass of more than 4000 kg, which significantly exceeds the carrying capacity of the traditional launch vehicle in Russia: the Proton-M launch vehicle with Briz-M booster unit [2]. To overcome current restrictions of the mass of the output payload, we have implemented an alternative scheme for launching spacecraft into an intended orbit using standard electrical propulsion engines located in spacecraft [3], this allows competing with world companies on the mass of the output payload. The developed COPV provides the necessary volume of the rocket propellant – xenon, which is necessary for the operation of propulsion engines [4].

At present time, COPVs with high weight efficiency are widely used in space-system engineering. The issue of using such vessels in order to increase the active life of SC and to implement deep-space exploration programs is rather relevant.

The loss of operability of COPV is a single failure point of entire spacecraft – the reservation of such a heavy and bulky block in the design of spacecraft is impossible, therefore, ensuring the reliability of COPV is an important task. To date, the work on the definition of bearing capacity and stiffness and the study of SSB of COPV [5–9] have been carried out; the results of this work guarantee the reliability of the pressure vessel. However, the study of foreign literature suggests that fastening elements in direct contact with the vessel, have an important impact on the strain-stress behavior (SSB) of the vessel.

In this article, we have presented the description of the analysis of SSB of COPV with various fastening methods and the results obtained. The aim of the work is to determine the most effective fastening method of COPV.

**Description of COPVs and methods of their fastening.** Initially, we conducted a review of COPVs and the methods of their attachment among the following manufacturing companies: Cobham Inc., ARDE Inc., ATK

Space Systems (USA); EADS Astrium, Thales Alenia Space, MT-Aerospace (Europe); JSC R&DIME, JSC CRISM jointly with JSC ISS (Russia).

We identified two main methods of fastening large-sized COPVs of spherical shape, one of which is implemented by foreign manufacturing companies through the connecting compartment in the form of a “skirt” [10–14]. Fig. 1 presents, as an example, COPV with the composite “skirt”, developed by NASA’s Global Precipitation Measurement (GPM) program by Cobham Inc. A detailed report of the program is presented in the scientific article of the American Institute of Aeronautics and Astronautics [15], which materials are used in this work. We took this vessel as the basis for the study.

The second method is a cable-stayed system, implemented for the first time in world practice on COPV co-produced by joint-stock company the Central Research Institute for Special Machinery, Khotkovo (JSC CRISM) and JSC ISS (fig. 2). The cable-stayed system is made simultaneously with the vessel by the method of winding of organic plastic. The pair interweaving of the platform for attachment to the frame of spacecraft body forms cables wound along geodesic lines with uniform pitch.

When comparing the parameters of COPVs in tab. 1, we revealed a unique mass superiority of the cable-stayed system – it is lighter than the composite “skirt” by more than 65 %.

COPV of JSC CRISM and JSC ISS is not as good as COPV of Cobham Inc. in working volume which is partially compensated by the maximum allowable design pressure and high safety factor. Low safety factor of the vessel of Cobham Inc. is caused by relatively short active life (5 years against 15 years) and by low reliability requirements in order to meet the requirements for disposal – complete burning in dense layers of the atmosphere [15].

**The description of the calculated model.** In the accounting module Femap with NX NASTRAN, we created FEM of the vessel with the averaged technical characteristics of two vessels listed above for comparing the methods of fastening COPVs in terms of their effect on SSB of the vessel.

The geometrical parameters of FEM are similar to the vessel’s flight model of Cobham Inc. – the diameter of the vessel in the cylindrical part is 1 m, the maximum length from dome to dome is 1.3 m (fig. 3). A metal liner was

not modeled. We described the composite layer of the vessel with elements of the “plate” type, modeling a shell with equivalent stiffness 8 mm thick and elasticity

modulus  $E = 90$  GPa. We assigned the density of the equivalent material so that the total weight of the filled vessel (without the fastening interface) was 760 kg.

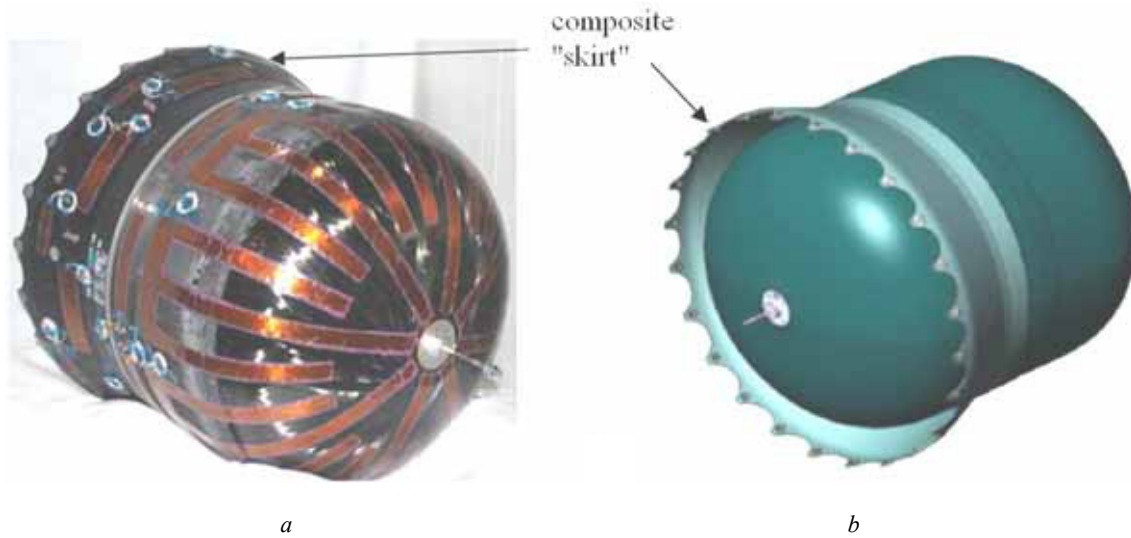


Fig. 1. COPV with composite “skirt”: *a* – manufactured model; *b* – 3D model

Рис. 1. КБВД с композитной «юбкой»: *a* – изготовленный образец; *б* – 3D-модель

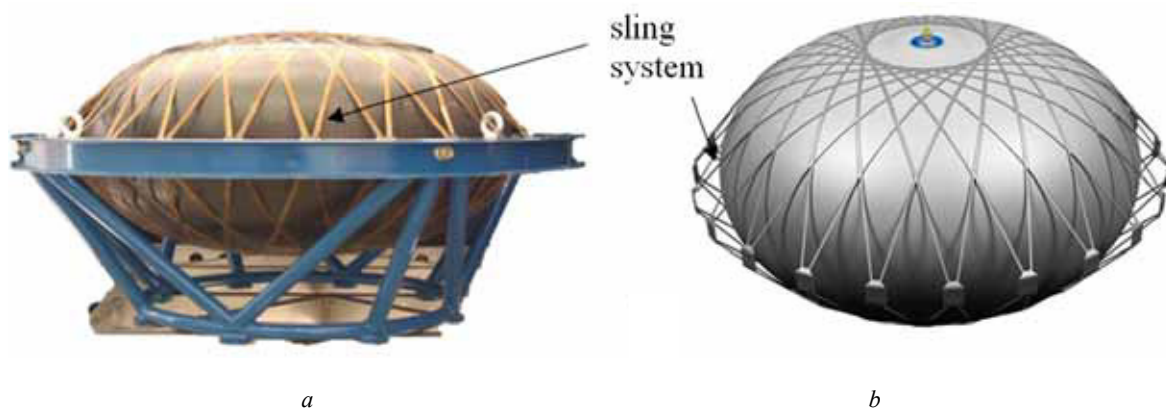


Fig. 2. COPV with cable-stayed system: *a* – manufactured model; *b* – 3D model

Рис. 2. КБВД с вантовой системой крепления: *a* – изготовленный образец; *б* – 3D-модель

Table 1

Main technical characteristics of COPVs and their interfaces

№	Parameter	COPV of JSC CRISM and JSC “ISS”	COPV of Cobham Inc.
1	Vessel size, mm	Ø1015x666	Ø1028x1348
2	Vessel mass (without fastening interface), kg	37.5	34.6
3	Swept volume, l	347	772
4	Working fluid	Xenon	Hydrazine hydrate
5	Mass of working fluid, kg	570	727
6	Maximum allowable design pressure, kgf/m <sup>2</sup>	95	56
7	Safety factor	3.6	2
8	Fastening interface	cable-stayed system	“skirt”
9	Mass of fastening interface, kg	1.3	12.45

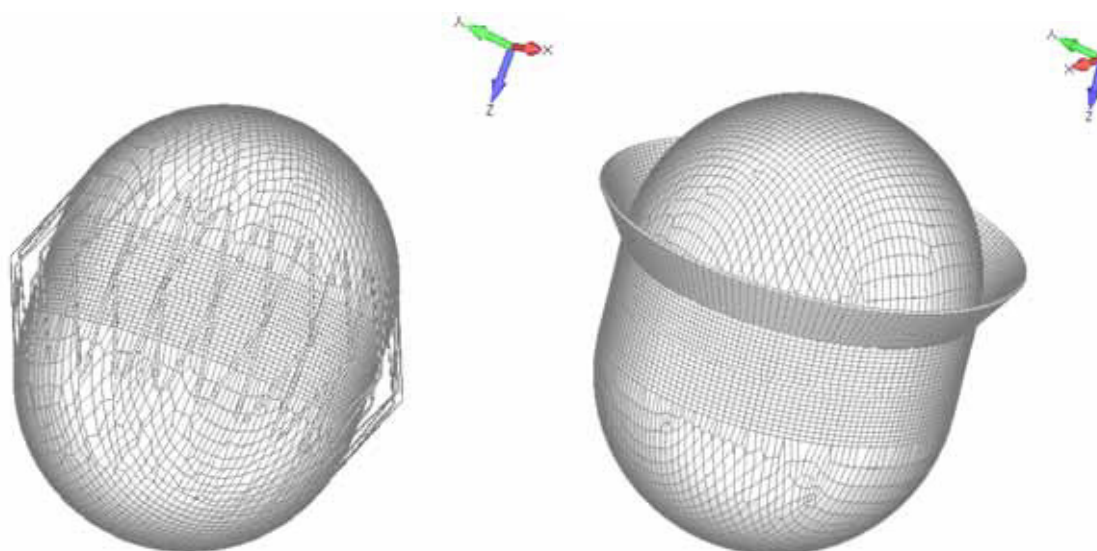


Fig. 3. FEM of COPV with a cable-stayed system (*left*) and with a composite “skirt” (*right*)

Рис. 3. КЭМ КБВД с вантовой системой (*слева*) и композитной «юбкой» (*справа*)

Table 2

**The first frequencies of natural oscillation**

Type	Vessel with a cable-stayed system	Vessel with a composite “skirt”
Transverse, Hz	60.67	208.06
Longitudinal, Hz	235.82	340.57

The cable-stayed system has the following geometrical parameters: the diameter in the place of attachment to the spacecraft body is 1.2 m, the angle of inclination of each cable relative to the generatrix of the cone formed by them is 15°, the number of pairs of ribs is 24, the section of a cable is 5x10 mm.

The composite “skirt” has the following geometrical parameters: wall thickness is 10 mm, the height of the area of contact with the vessel is 75 mm, the angle of inclination of the “skirt” is 33.7°, the diameter in the place of attachment to the spacecraft body is 1.2 m.

The masses of fastening interfaces, according to the calculation model (excluding manufacturing technology):

- cable-stayed system – 4.4 kg;
- composite “skirt” – 13.3 kg.

The fasteners have hard contact with the vessel.

**The description of the experiment.** Based on the existing experience of working with the vessel of Cobham Inc., described in the source [15], we decided to carry out the following calculations:

- frequency analysis;
- analysis of SSB from uniform internal pressure 2 MPa. We assumed the pressure conditionally and applied to the inner surfaces of the “plate”-type elements;
- quasistatic analysis. The main design case is the combined effect of longitudinal overload of 11g and a transverse overload of 3.5 g in the spacecraft launch phase. These overloads are applied to the vessel with internal pressure.

**The results of frequency analysis.** The results of the first natural frequencies in the longitudinal and transverse directions are presented in tab. 2.

**The results of the analysis of SSB from internal pressure.** The character of SSB for COPVs and fastening interfaces under the influence of internal pressure of the vessel is shown in fig. 4, 5, respectively. All voltage values are in Pa.

**The results of the quasistatic analysis.** We evaluated SSB of the vessel and the stability of the cable-stayed system and the “skirt”. The cable-stayed system has a stability margin-1.5. The “skirt” has a sustainability margin-2.8. The forms of buckling of fastening interfaces are shown in fig. 6.

**The analysis of the results obtained.** The results of the first natural frequencies in the longitudinal and transverse directions (tab. 2) meet the requirements (not less than 50 Hz).

According to the results of calculating the effect of internal pressure (fig. 4, 5), it can be concluded that fastening with the help of a cable-stayed system has almost no effect on SSB of COPV, in contrast to a composite “skirt”, which two or more times reduces actual stress in the place of attachment to the vessel, causing uneven distribution of stress.

While assessing the nature of the influence of fastening method on SSB of COPVs under the influence of overloads, it is advisable to evaluate the form of buckling (fig. 6). A cable-stayed system has no significant effect on



SSB of the vessel under the action of overloads while launching spacecraft. Buckling of a cable-stayed system is expressed in buckling of individual cables, without affecting the shape and SSB of COPVs. Moreover, the efforts from a buckled cable are redistributed between neighboring cables, allowing the structure to continue working without leading to its complete destruction.

Fig. 6 shows that the composite “skirt”, despite the internal pressure of the vessel, directly transmits to its form

of buckling. In turn, the vessel receives a completely different form of buckling, which indicates significant effect of the “skirt” on the vessel’s SSB. This fact is confirmed by the results of the calculations of the GPM vessel set that is presented in the source [15]: “As a result of the quasistatic acceleration and internal pressure loads, the composite “skirt” was an area of critical stress. The project was improved several times until positive reserves were reached for all mutually perpendicular axes.”

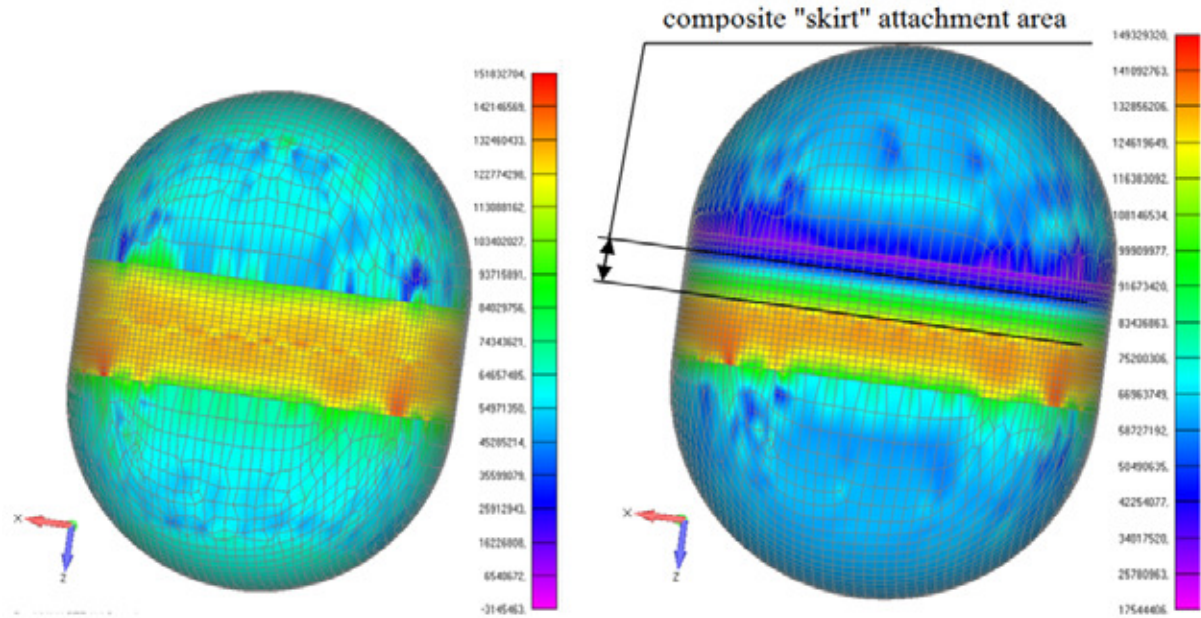


Fig. 4. SSB of FEM of COPVs with a cable-stayed system (left) and with a composite “skirt” (right) and when exposed to internal pressure

Рис. 4. НДС расчетной модели КБВД с вантовой системой (слева) и композитной «юбкой» (справа) и при воздействии внутреннего давления

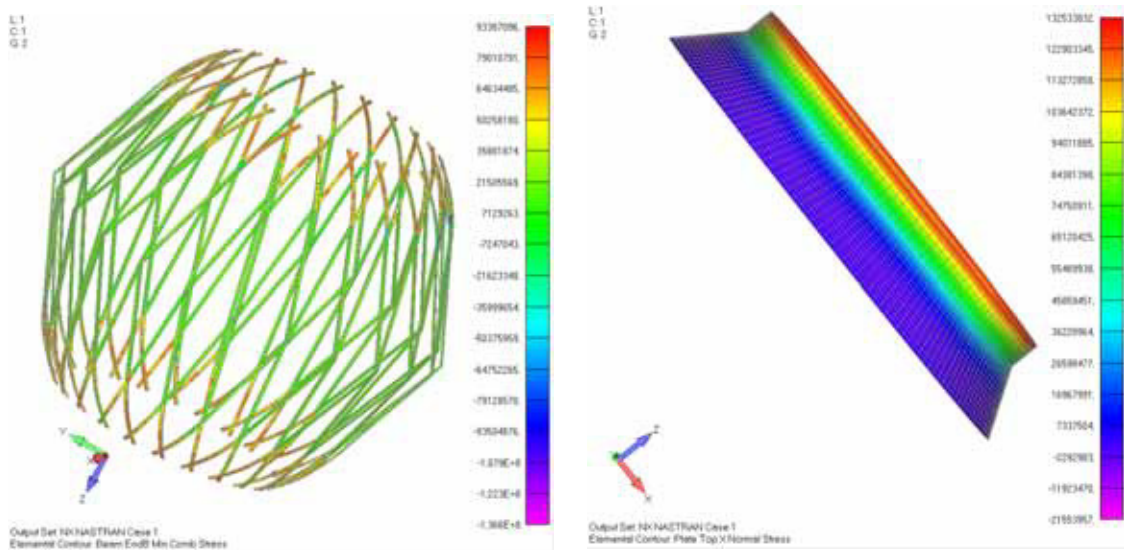


Fig. 5. SSB of a cable-stayed system (left) and a composite “skirt” (right) when exposed to internal pressure

Рис. 5. НДС вантовой системы (слева) и композитной «юбки» (справа) при воздействии внутреннего давления

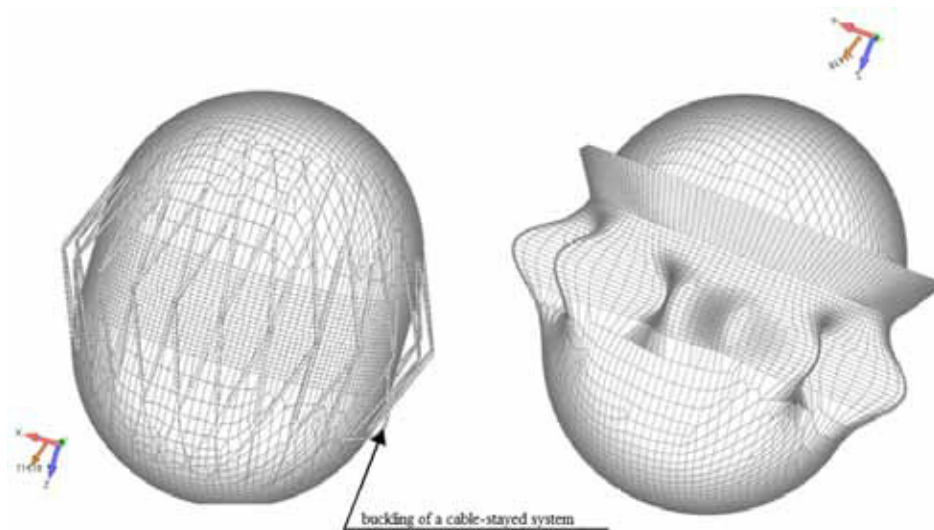


Fig. 6. The form of buckling of a cable-stayed system (left) and of a composite “skirt” (right) caused by overloads

Рис. 6. Форма потери устойчивости вантовой системы (слева) и композитной «юбки» (справа) под воздействием перегрузок

Therefore, when designing a cable-stayed system for a vessel, one can easily vary the number and geometry of cables without re-calculating COPVs as a pressure cylinder. The design of a composite “skirt”, on the contrary, should be carried out in parallel with the design of COPVs as a pressure cylinder, taking into account their mutual influence. The use of a composite “skirt”, in comparison with a cable system, is characterized by high probability of failure of COPVs and the complexity of its forecasting.

The stability margin of a composite “skirt” is significantly higher than that of a cable-stayed system, which is explained by the weight of a composite “skirt”. A cable-stayed system has an obvious mass advantage (67 % lighter).

A critical factor when choosing in favor of a cable-stayed system is the requirement for stiffness (frequency of natural oscillations), the rigidity of which can be reduced by varying the angle of cables at the design stage.

**Conclusion.** We carried out the calculation of natural frequencies, investigated the nature of SSB of COPVs depending on the fastening method under the internal pressure and overloads. The results indicate that a cable-stayed system has no significant effect on SSB of COPVs and it is more effective way to fasten COPVs than a composite “skirt”.

## References

1. Mironenko E. D., Kravchenko I. A., Babichev A. A. [Development and implementation in industrial production of composite anisogrid power structures, high pressure xenon tank and their interfaces in order to increase the efficiency of telecommunication spacecraft]. *Nadezhda Rossii*. 2016, No. 2, P. 9–14 (In Russ.).
2. Kosenko V. E., Akimov A. N., Vygonitskiy Yu. G. *Razrabotka i vnedrenie v promyshlennoe proizvodstvo*

*unifitsirovannoy vysokoenergeticheskoy kosmicheskoy platformy «EHkspress-2000» i sozдание na ee baze sovremennykh, konkurentosposobnykh kosmicheskikh apparatov svyazi i telekommunikatsiy* [Development and implementation of a unified high-energy space platform “Express-2000” in industrial production and the creation of modern, competitive communications and telecommunications spacecraft. Description of work]. AO ISS, 2015, 100 p. (In Russ.).

3. Babanov A. A., Vnukov A. A., Doronkin M. N. *Sposob vyvedeniya kosmicheskogo apparata na geostatsionarnuyu orbitu s ispol'zovaniem dvigateley maloy tyagi* [The method of launching spacecraft into a geostationary orbit using thrusters]. Patent RF, No. 2586945, 2014, 10 p.

4. Borodin L. M., Ovechkin G. I., Gordeev A. V. *Bak vysokogo davleniya* [High pressure tank]. Patent RF No. 2589956, 2013, 8 p.

5. Mironenko E. D. [On the issue of fixing high pressure metal composite tanks]. *8-y Vserossiyskiy molodyozhnyy konkurs nauchno-tekhnicheskikh rabot i projektov «Molodyozh'i budushchee aviatsii i kosmonavtiki»*. *Annotatsii konkursnykh rabot* [8th All-Russian Youth Competition for Scientific and Technical Works and Projects “Youth and the Future of Aviation and Cosmonautics”. Annotations of entries]. MAI, 2016, P. 252–253 (In Russ.).

6. Vasil'ev V. V., Razin A. F., Sin'kovskiy F. K. [Optimal shape of a composite pressure cylinder with a metal liner]. *Kompozity i nanostruktury*. 2014, No. 1, P. 2–8 (In Russ.).

7. Kravchenko I. A., Mikheev A. V., Borodin L. M. [Features of the use of metal composite tanks on board spacecraft]. *Materialy XVII Mezhdunar. nauch. konf. Reshetnevskie chteniya* [Proceedings of the XVII Intern. scientific conf. Reshetnev Readings]. 2013, No. 1, P. 71–72 (In Russ.).



8. Azarov A. V., Babichev A. A., Sin'kovskiy F. K. [Design and manufacture of a composite high-pressure tank for spacecraft]. *Kompozity i Nanostruktury*. 2013, No 4, P. 44–57. (In Russ.).

9. Arkhipov Yu. S., Buldashev S. A., Dudin A. I. *Opyt sozdaniya kompozitnykh emkostey dlya kosmicheskikh apparatov tipa Ekspress* [The experience of creating composite containers for spacecraft Express] (In Russ.). Available at: <http://niimashspace.ru/pdf/korol18190413.pdf> (accessed: 06.11.2018).

10. Composite Pressure Vessel Data Sheet. Arde Part Number 4790. Available at: <http://www.ardeinc.com/sketches/copv/4790.pdf> (accessed: 06.11.2018).

11. Gardiner G. Space mission maximized via minimized survivability. *High-Performance Composites*. 2013, Vol. 21, No. 2, P. 62–64.

12. Radtke W., Scharringhausen J., Windisch M. Alphabus Propellant Tank: Manufacturing, NDI and Damage Control. *3rd IAASS International Space Safety Conference COPV Safety and Integrity Workshop*, Italy, 2008, 24 p.

13. Composite Pressure Vessel Data Sheet. Model PTP-1910. 2018. Available at: [http://www.mt-aerospace.de/files/mta/tankkatalog/Datenblatt\\_PTP-1910\\_Heritage-not-for-sale.pdf](http://www.mt-aerospace.de/files/mta/tankkatalog/Datenblatt_PTP-1910_Heritage-not-for-sale.pdf) (accessed: 06.11.2018).

14. Randolph T. M. [Qualification of Commercial Electric Propulsion Systems for Deep Space Missions]. *30th International Electric Propulsion Conference*. Italy, 2007, 16 p.

15. Robert H. Estes, James Harris, N. R. Moore. [Summary of the Development of a Demiseable Composite Overwrapped Hydrazine Tank for the Global Precipitation Measurement Mission from Concept to Delivery]. *48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Georgia, 2012, 68 p.

#### Библиографические ссылки

1. МIRONENKO E. D., KRAVCHENKO I. A., BABICHEV A. A. Разработка и внедрение в промышленное производство композитных анизотропных силовых конструкций, ксенонного бака высокого давления и их интерфейсов с целью повышения эффективности телекоммуникационных космических аппаратов // *Надежда России*. 2016. № 2. С. 9–14.

2. Разработка и внедрение в промышленное производство унифицированной высокоэнергетической космической платформы «Экспресс-2000» и создание на ее базе современных, конкурентоспособных космических аппаратов связи и телекоммуникаций / В. Е. Косенко [и др.] ; АО «ИСС». 2015. 100 с.

3. Пат. 2586945 Российская Федерация, МПК В 64 G 1/26, В 64 G 1/44. Способ выведения космического аппарата на геостационарную орбиту с использованием двигателей малой тяги / Бабанов А. А., Внуков А. А., Доронкин М. Н. [и др.]. № 2014127670/11 ; заявл. 07.07.2014 ; опубл. 10.06.2016, Бюл. № 16. 10 с.

4. Пат. 2589956 Российская Федерация, МПК F17C 1/00. Бак высокого давления / Бородин Л. М., Овечкин Г. И., Гордеев А. В. [и др.]. № 2013159080/02 ; заявл. 30.12.2013 ; опубл. 10.07.2016, Бюл. № 19. 8 с.

5. МIRONENKO E. D. К вопросу о закреплении металлокомпозитных баков высокого давления // *Молодёжь и будущее авиации и космонавтики : 8-й Всероссий. молодёжный конкурс науч.-техн. работ и проектов: Аннотации конкурсных работ*. МАИ, 2016. С. 252–253.

6. Васильев В. В., Разин А. Ф., Синьковский Ф. К. Оптимальная форма композитного баллона давления с металлическим лейнером // *Композиты и наноструктуры*. 2014. № 1. С. 2–8.

7. Кравченко И. А., Михеев А. В., Бородин Л. М. Особенности применения металлокомпозитных баков на борту КА // *Материалы XVII Междунар. науч. конф., посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем акад. М. Ф. Решетнева*. 2013. Ч. 1. С. 71–72.

8. Азаров А. В. Бабичев А. А., Синьковский Ф. К. Проектирование и изготовление композитного бака высокого давления для космического аппарата // *Композиты и наноструктуры*. 2013. № 4. С. 44–57.

9. Опыт создания композитных емкостей для космических аппаратов типа «Экспресс» [Электронный ресурс] / Ю. С. Архипов [и др.] ; НИИМаш. 2013. URL: <http://niimashspace.ru/pdf/korol18190413.pdf> (дата обращения: 06.11.2018).

10. Composite Pressure Vessel Data Sheet. Arde Part Number 4790 [Электронный ресурс] / ARDE Inc. 2018. URL: <http://www.ardeinc.com/sketches/copv/4790.pdf> (дата обращения: 06.11.2018).

11. Gardiner G. Space mission maximized via minimized survivability // *High-Performance Composites*. 2013. Vol. 21, No. 2. P. 62–64.

12. Radtke W., Scharringhausen J., Windisch M. Alphabus Propellant Tank: Manufacturing, NDI and Damage Control // *3rd IAASS International Space Safety Conference COPV Safety and Integrity Workshop*. Italy, 2008. 24 p.

13. Composite Pressure Vessel Data Sheet. Model PTP-1910 [Электронный ресурс] / MT Aerospace. 2018. URL: [https://www.mt-aerospace.de/files/mta/tankkatalog/Datenblatt\\_PTP-1910\\_Heritage-not-for-sale.pdf](https://www.mt-aerospace.de/files/mta/tankkatalog/Datenblatt_PTP-1910_Heritage-not-for-sale.pdf) (дата обращения: 06.11.2018).

14. Randolph T. M. Qualification of Commercial Electric Propulsion Systems for Deep Space Missions // *30th International Electric Propulsion Conference*. Italy, 2007. 16 p.

15. Estes Robert H., Harris James, Moore N. R. Summary of the Development of a Demiseable Composite Overwrapped Hydrazine Tank for the Global Precipitation Measurement Mission from Concept to Delivery // *48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*. Georgia, 2012. 68 p.

УДК 629.7.036.54

Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-644-650

**Для цитирования:** Назаров В. П., Назарова Л. П., Швецова Д. С., Савчин Д. А. Совершенствование методики определения кавитационной характеристики шнекоцентробежных насосов // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 4. С. 644–650. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-644-650

**For citation:** Nazarov V. P., Nazarova L. P., Shvetsova D. S., Savchin D. A. [Improvement of the method of determining cavitation characteristics of the centrifugal pumps]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 4, P. 644–650 (In Russ.). Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-644-650

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАВИТАЦИОННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШНЕКОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

В. П. Назаров, Л. П. Назарова, Д. С. Швецова, Д. А. Савчин

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

*Кавитация – это процесс нарушения сплошности потока жидкости в зоне пониженного давления, заключающийся в образовании полостей, наполненных паром и выделившимися из жидкости газами. В области пониженных давлений возникают растягивающие напряжения, которые приводят к разрыву жидкости; образуются полости – кавитационные каверны, которые заполняются газами и парами. Попадая в область высоких давлений, каверны «схлопываются», что вызывает местный гидравлический удар, который может привести к разрушению стенок каналов. Возникновение и развитие кавитации в жидкостях связано с наличием ядер кавитации. Технические жидкости всегда имеют ядра кавитации, представляющие собой нерастворенные газовые включения. Развитию кавитации также способствует количество свободных и растворенных газов, а также термодинамические свойства жидкостей и конструктивные особенности колеса.*

*Кавитация приводит к трем основным отрицательным последствиям для гидравлических машин: к срыву режима работы, т. е. к резкому снижению основных параметров, эрозионному разрушению рабочего колеса и неустойчивой работе, вызванной низкочастотными автоколебаниями.*

*Для того, чтобы определить кавитационную эффективность насоса, каждый шнекоцентробежный насос подвергается кавитационным испытаниям. Однако существующие методы определения антикавитационных свойств насосов не обладают достаточной точностью, а также превышают по длительности срок эксплуатации насоса в составе турбонасосного агрегата жидкостного ракетного двигателя.*

*Предложен метод ускоренных кавитационных испытаний, позволяющий значительно сократить время испытаний, а также увеличить точность определения кавитационной характеристики. Для этого предлагается проводить испытания без поддержания расхода, с увеличенной скоростью снижения давления на входе в насос. Для снижения погрешности испытаний путем исключения человеческого фактора предложена система автоматической регистрации параметров.*

*Установлено, что ускоренное снижение давления без поддержания расхода не влияет на точность определения кавитационной характеристики и вместе с тем сокращает работу насоса в условиях кавитации, уменьшая эрозию. Автоматизация значительно снижает трудоемкость проведения испытаний и увеличивает точность.*

*Ключевые слова:* кавитация, центробежный насос, основные характеристики, кавитационные испытания, ускоренный метод испытаний.

## IMPROVEMENT OF THE METHOD OF DETERMINING CAVITATION CHARACTERISTICS OF THE CENTRIFUGAL PUMPS

V. P. Nazarov, L. P. Nazarova, D. S. Shvetsova, D. A. Savchin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochoy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: Darya.Shvetsova@yandex.ru

*Cavitation is a process of formation of vapor bubbles within a liquid at low pressure regions. There are strain tensions at low-pressure region, which lead to a gap, producing cavitation cavities. These cavities contain vapor bubbles. When cavities come to a high pressure region, they collapse, leading to a local water hammer which is able to erode the surface of a centrifugal pump. The occurring and the evolution of cavitation in liquids bound to the existence*

of so called cavitation cores. A physically pure liquid can resist to a strain tension efficiently, however industrial liquids always have cavitation cores. The cavitation cores are undissolved gas inclusions. The acceleration of evolution of cavitation depends on free and dissolved gases and thermodynamic properties of liquid as well.

Cavitation brings three negative factors to the performance of a centrifugal pump: performance failure – an abrupt decreasing of main parameters; erosion corrosion; low-frequency pulsations that cause the unstable work.

Every centrifugal pump goes through cavitation tests for the determination of the cavitation performance. However, the contemporary test methods do not have the required accuracy; moreover, the duration of a test is bigger than the work time of a pump in a rocket engine.

The paper has the suggestion of the accelerated method of cavitation tests. To get the results, the new method works without maintaining of the mass flow rate, but with increased pressure-change speed on the pump entrance. For the decreasing of the error, the new method includes automatic measuring system.

The authors have determined that the accelerated method with automatic measuring system does not influence the accuracy, but in the same time makes the test process shorter in time and easier to accomplish.

**Keywords:** cavitation, centrifugal pump, base characteristics, cavitation tests, accelerated method of cavitation tests.

**Введение.** Кавитацией называют процесс нарушения целостности потока жидкости в зоне пониженного давления, заключающийся в образовании полостей, наполненных паром и выделившимся из жидкости газами [1; 2]. Появление и развитие кавитации [3] обусловлено наличием в рабочем теле (жидкости) ядер кавитации, представляющих собой нерастворенные газовые включения. В насосах жидкостных ракетных двигателей при падении входного давления  $P_1$  ниже определенного критического давления  $P_{кр}$  возникает кавитация – явление, которое может привести к срыву режима работы насоса, сопровождаемому уменьшением напора, КПД и расхода жидкости через насос [4]. Вследствие этого появляется необходимость проведения испытаний на определение антикавитационных свойств насоса. Эти свойства характеризуются величиной критического входного подпора  $\Delta h_{кр}$  [5], который на практике определяют для каждого насоса экспериментально, проводя кавитационные испытания [6; 7]. Значение подпора находят по критическому входному давлению из формулы (1):

$$\Delta h_{кр} = \frac{P_{1кр} + P_a - P_s}{\rho} + 0,5v_{вх}^2, \quad (1)$$

где  $P_{1кр}$  – критическое входное давление, Па;  $P_a$  – атмосферное давление, Па;  $P_s$  – давление насыщенных паров жидкости, Па;  $v_{вх}$  – скорость жидкости на входе в насос, м/с.

**Описание существующей методики.** Согласно принятой методике [8; 9], кавитационные испытания проводятся следующим образом: после вывода насоса на рабочий режим путем установки номинальных значений угловой скорости и расхода жидкости давление на входе в насос ступенчато снижается. При каждом снижении после установления режима производится замер основных параметров насоса: давления на входе и выходе насоса  $P_1, P_2$ , Па; угловой скорости вращения ротора  $\omega$ , рад/с; расхода жидкости через насос  $\dot{m}$ , м<sup>3</sup>/с. По этим данным определяют значение напора с помощью формулы (2) [10], а затем на миллиметровой бумаге строят напорную характеристику – зависимость  $H_i = f(P_1)$  при  $\dot{m}, \omega = \text{const}$ :

$$H_i = \frac{P_{2i} - P_{1i}}{\rho}. \quad (2)$$

Следующий этап – определение критического входного давления  $P_{1кр}$ , соответствующего началу срыва режима работы. Эта величина определяется двумя методами:

– по координате точки пересечения аппроксимирующих прямых бесрывной и срывной части кавитационной характеристики;

– по координате точки уменьшения напора на величину, задаваемую в технических условиях.

Имея значение  $P_{1кр}$ , по формуле (1) рассчитывается  $\Delta h_{кр}$ . При получении срывной ветви кавитационной характеристики насос работает в режиме, характеризующемся снижением развиваемого насосом напора, уменьшением расхода жидкости и общей неустойчивостью процессов. Поэтому по техническим условиям на кавитационные испытания центробежных насосов допускается получение срывной ветви характеристики при расходах, меньших номинального.

На рис. 1 представлены кавитационные характеристики насоса, получаемые: 1) без соблюдения условия  $\dot{m} = \text{const}$  в области срыва – кривая 1; 2) с соблюдением условия  $\dot{m} = \text{const}$  – кривая 2; 3) пунктирная кривая, где сначала до точки B не соблюдается условие  $\dot{m} = \text{const}$ , а затем расход поддерживается постоянным.

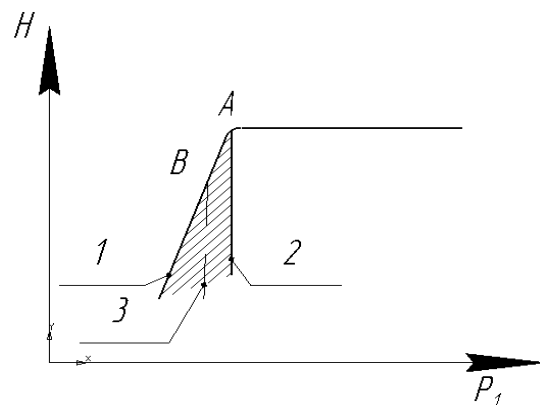


Рис. 1. Кавитационные характеристики насоса

Fig. 1. Cavitation characteristics of the pump

На графике заштрихована область получения возможных характеристик, эта особенность методики формально позволяет влиять на антикавитационные свойства насоса, вследствие чего снижается достоверность испытаний, что может отразиться на ухудшении надежности насосных агрегатов. Экспериментальные данные показали, что расхождение результатов испытаний доходит до 6,3 %, а по данным источника [11] погрешность определения  $\Delta h_{кр}$  доходит до 10 %. Величины погрешностей рассчитывались по методике [12].

Нужно также добавить, что процесс кавитации опасен не столько для насосов, работающих в составе изделия (их цикл работы достаточно мал), сколько для насосов, подвергнутых испытаниям, так как длительность испытаний может превышать время работы агрегата в составе ракеты при полете [13].

Таким образом, на основании вышеизложенного можно выделить основные недостатки существующей методики:

- значительная трудоемкость снятия кавитационной характеристики и, как следствие, длительная работа насоса в условиях кавитации и снижение его надежности в целом;
- недостаточная точность определения критического входного давления;
- влияние субъективных факторов на результаты испытаний;
- большая длительность испытаний.

**Описание предлагаемой методики.** В статье представлена методика проведения испытаний, согласно которой предлагается определять характеристики насосов при непрерывном и достаточно быстром изменении  $P_1$ , что позволит сократить время кавитационных испытаний и существенно уменьшить кавитационную эрозию рабочих колес. В настоящее время длительность испытаний составляет от 3 до 6 мин, что составляет 50–80 % от всего времени, затрачиваемого на определение основных характеристик и параметров насоса. При этом продолжительность работы насоса при интенсивной кавитационной эрозии составляет порядка 60 с, что соизмеримо с временем работы насоса в составе изделия.

С целью исключения субъективного фактора предлагается в режиме срыва не поддерживать постоянным  $\dot{m}$ , что позволит отказаться от недостаточно надежных регуляторов расхода. Отказ от регулирования расхода повысит устойчивость работы насоса в режиме срыва.

При ускоренных испытаниях человеку практически невозможно визуально регистрировать быстрое протекание и непрерывно меняющиеся процессы.

Определение критического входного давления по координате точки снижения напора при кавитационном срыве до заданной величины позволяет автоматизировать этот процесс. Структурная схема устройства регистрации параметров работает следующим образом.

Независимым параметром при кавитационных испытаниях является давление на входе в насос. После того, как будут установлены номинальные расход и угловая скорость вращения ротора и входное давле-

ние  $P_1 > P_{ном}$ , начинается уменьшение входного давления. При этом информация о текущем значении входного давления  $P_{1i}$  сравнивается с заданным номинальным. Информация о текущей величине напора  $H_i$  сравнивается с номинальным заданным. В момент, когда значение напора станет равным  $(0,75–0,97)H_{ном}$ , подается команда на останов двигателя. Одновременно с командой на останов выводится значение  $P_{кр}$ , соответствующее  $H_{ном}$ .

**Анализ работы системы в нестационарном режиме.** Определение кавитационных параметров насоса при непрерывном и достаточно быстром снижении входного давления приводит к тому, что процессы в системе «насос – измерительная система – гидро-стенд» становятся нестационарными. Поэтому был выполнен анализ влияния нестационарности процессов на результаты испытаний.

При определении кавитационных параметров насоса в неустановившемся режиме следует различать два случая:

- I – насос работает без срыва напора ( $P_2$ ,  $\dot{m}$ ,  $\omega \approx \text{const}$ ), изменяется только входное давление  $P_1$ ; скорость изменения  $P_1$  характеризуется величиной  $dP_1/dt$ ;
- II – насос работает в режиме резкого снижения давления  $P_2$ , уменьшения расхода  $\dot{m}$ , роста угловой скорости  $\omega$ ; при этом расход и угловая скорость не регистрируются, поэтому работа систем измерения не анализируется в данном случае; скорость изменения  $P_2$  определяется  $dP_2/dt$ .

Работа насоса в области I характеризуется относительной стабильностью параметров. При этом расхождение результатов испытаний в установившемся и неустановившемся режиме можно ожидать лишь при регистрации входного давления.

При работе насоса в области II расхождение результатов будет определяться переходными процессами не только в полостях насоса, стеновых магистралях, но и в системах измерения  $P_2$  и  $P_1$ .

Время переходных процессов согласно [14] не превышает 0,3–0,5 с. Следовательно, влияние насоса с подсоединенными магистралями будет заметно лишь при больших скоростях снижения входного давления.

Рассмотрим влияние динамических характеристик систем измерения  $P_2$  и  $P_1$  на результаты кавитационных испытаний. Для упрощения допустим  $dP_2/dt = \text{const}$ , что легко реализовать на практике. Вместо изменения напора будем рассматривать изменение давления  $P_2$ . Для случая развитой кавитации при  $dP_1/dt$  справедливо  $dP_2/dt$ .

При нестационарном режиме работы регистрируемая кавитационная характеристика будет отличаться от истинной из-за запаздывания систем регистрации  $P_2$  и  $P_1$ . Величины запаздывания определяются выражением (3) [15]:

$$\Delta P_{1/2} = T_{P2/P1} \cdot \frac{dP_{1/2}}{dt}. \quad (3)$$

Динамическая составляющая погрешности определения критического входного давления будет минимальна ( $\approx 0$ ), если регистрируемая характеристика

совпадает с истинной. Условие совпадения запишется следующим образом (4):

$$T_{P1} = T_{P2}. \quad (4)$$

В работе [15] показано, что для измерителя давления, состоящего из манометра и импульсной соединительной трубки, постоянная времени складывается из двух составляющих:  $T_{зв}$  – времени запаздывания возмущения, обусловленного звуковой скоростью передачи импульса;  $T_z$  – постоянной времени, зависящей от гидросопротивлений и емкостей магистрали передачи давления. В большинстве случаев выполняется условие  $T_{зв} \gg T_z$ , поэтому окончательно постоянные времени систем будут зависеть от диаметров импульсных трубок. Но выравнивать постоянные времени систем измерения лишь изменением размеров трубок нерационально.

Более реальный путь – подбор соответствующих демпферов на линии измерения  $P_2$  и достижения максимально допустимого быстродействия системы измерения  $P_1$ .

Системы замера входных и выходных давлений насосов практически идентичны. Таким образом, если строить кавитационную характеристику по данным манометров, установленных на магистралях с демпферами, то при условии, что  $P_2 \gg P_1$ , основную динамическую погрешность будет вносить линия замера  $P_1$ .

Величина динамической погрешности (5) будет определяться постоянной времени  $T_{P1}$  и скоростью снижения входного давления  $dP_1/dt$ :

$$\delta P_{кр.дин} = T_{P1} \cdot \frac{dP_1}{dt} \cdot \frac{1}{P_{1кр}}. \quad (5)$$

Из этого следует, что при увеличении скорости изменения входного давления растет величина динамической погрешности ( $\approx 20\text{--}60\%$ ). Чтобы ее уменьшить до 1–2 %, необходимо снизить  $P_1$  со скоростью  $\approx 100\text{ Па/с}$ , т. е. за время  $t \approx 10$  мин.

Также для уменьшения динамической погрешности можно увеличить быстродействие системы измерения  $P_1$ , т. е. уменьшить  $T_{P1}$ . Если исключить демпфер, то величина постоянной времени определится практически длиной импульсной трубки.

Необходимо подчеркнуть, что ограничение скорости снижения входного давления накладывается только при работе насоса в области срыва, в бесрывном режиме скорость может быть увеличена. Поэтому испытание можно проводить следующим образом.

Область устойчивости выходных параметров насоса  $P_2$ ,  $\dot{m}$ ,  $\omega$  проходит при быстром снижении давления на входе в насос, а при подходе к области срыва скорость снижения  $P_1$  нужно уменьшать до величины, обеспечивающей низкую динамическую погрешность определения входного давления.

Анализ работы систем измерения входного и выходного давлений при проведении кавитационных испытаний позволил сделать следующие выводы:

– при оценке погрешности определения критического входного давления необходимо учитывать динамику процесса и быстродействие измерительных систем;

– для снижения динамической составляющей погрешности измерения  $P_{1кр}$  необходимо согласовывать динамические характеристики систем измерения выходного и входного давлений, обеспечивая равенство постоянных времени (4); при этом динамические характеристики следует определять для давлений  $P_2$  и  $P_1$ , близких к соответствующим параметрам, которые имеет насос при работе в критической области.

В ходе работы были проведены экспериментальные исследования, цель которых заключалась в следующем:

– экспериментально определить влияние скорости снижения входного давления на результаты кавитационных испытаний;

– определить влияние постоянных времени систем измерения входного и выходного давлений на результаты кавитационных испытаний.

Чтобы исключить влияние технологических и геометрических факторов на результаты исследований, все испытания проводились на насосах одной комплектации. Проводилась лишь переборка насоса с целью замены подшипников, отработавших ресурс.

Для повышения информативности испытаний снятие кавитационных характеристик проводилось при непрерывном снижении входного давления и с непрерывной регистрацией параметров.

В качестве регистрирующей была использована система, в состав которой входят:

1) вибростержневые датчики давления; их использование обусловлено высокими метрологическими характеристиками, удовлетворительной работой при отрицательных давлениях и электрическим выходным сигналом в виде частоты;

2) преобразователи частоты в напряжение; их назначение – преобразовать частотный сигнал в аналоговую форму;

3) двухкоординатный самопишущий прибор.

Процесс регистрации происходит так: информация о величине входного и выходного давлений с помощью вибростержневых датчиков и преобразователей частоты в напряжение поступает на вход самописца. Напряжение, пропорциональное  $P_1$ , подается на вход  $X$ , а информация о  $P_2$  – на вход  $Y$ . Изменение  $P_1$  преобразуется в перемещение пера самописца по оси  $X$ , а изменение  $P_2$  – в перемещение по оси  $Y$ . Таким образом, производится непрерывная запись кавитационной характеристики в координатах  $P_2 = f(P_1)$ , которая практически соответствует кавитационной характеристике насоса в координатах  $H = f(P_1)$ .

Для реализации возможностей непрерывного снижения входного давления с различными скоростями потребовались незначительные доработки конструкции, которые свелись к установке двух дополнительных дренажных магистралей.

Конструктивно стенд выполнен так, что компенсационный бак, давление в воздушной подушке которого определяет давление на входе в насос, расположен на 5 метров ниже насоса, вследствие чего полные кавитационные испытания можно проводить без вакуумного насоса.

В таблице сведены результаты обработки данных по испытаниям и для сравнения представлены результаты теоретических расчетов влияния скорости снижения входного давления и быстродействие системы измерения, проведенные на основе предложенной модели процессов.

В целом, результаты экспериментов удовлетворительно согласуются с теоретическими расчетами и полностью подтверждают принятую модель процессов, происходящих в системе «насос – гидростенд – измерительная система» при определении кавитационных характеристик центробежных насосов на неустановившихся режимах.

Необходимо добавить, что в ряде случаев при проведении кавитационных испытаний не учитываются динамические характеристики системы измерения входного давления, в результате чего антикавитационные параметры насоса, определенные эксперимен-

тально, оказываются хуже фактических. В качестве примера приведена кавитационная характеристика (рис. 2), записанная в процессе штатного испытания с помощью ранее описанного прибора автоматической регистрации.

Участки характеристики, отмеченные буквами  $a$ ,  $a'$ ,  $a''$ ,  $a'''$ , соответствуют моменту открытия электропневмоклапана (ЭПК), т. е. началу уменьшения давления на входе в насос. Точки  $b$ ,  $b'$ ,  $b''$ ,  $b'''$  соответствуют моменту закрытия ЭПК, т. е. прекращению уменьшения давления на входе. Небольшие горизонтальные участки  $b-a'$ ,  $b'-a''$  и т. д. соответствуют процессу установления показаний измерителя входного давления. Характеристика 1 построена по данным протоколов испытаний, т. е. по точкам. Совмещение характеристик 1 и записанной в аналоговой форме свидетельствует о том, что снятие показаний с приборов не всегда происходит при установившихся значениях.

Сравнение результатов экспериментов и теоретических расчетов

		Датчик на конце длинной линии после демпфера			Датчик соединен со входом в насос гибким шлангом высокого давления		
		$T_{P1}, c$	$P_{кр} \cdot 10^5 Pa$	$\delta P_{кр.лин}, \%$	$T_{P1}, c$	$P_{кр} \cdot 10^5 Pa$	$\delta P_{кр.лин}, \%$
$\frac{dP_1}{dt} = 790 Pa/c$	Эксп.	10	0,605	—	0,65	0,55	0
	Расч.	10	0,625	13,6	—	—	—
$\frac{dP_1}{dt} = 1920 Pa/c$	Эксп.	10	0,725	31,8	0,65	0,555	1,1
	Расч.	10	0,738	34,2	0,65	0,557	1,33
$\frac{dP_1}{dt} = 2080 Pa/c$	Эксп.	—	—	—	0,65	0,565	3,3
	Расч.	10	0,748	36,9	0,65	0,559	1,5

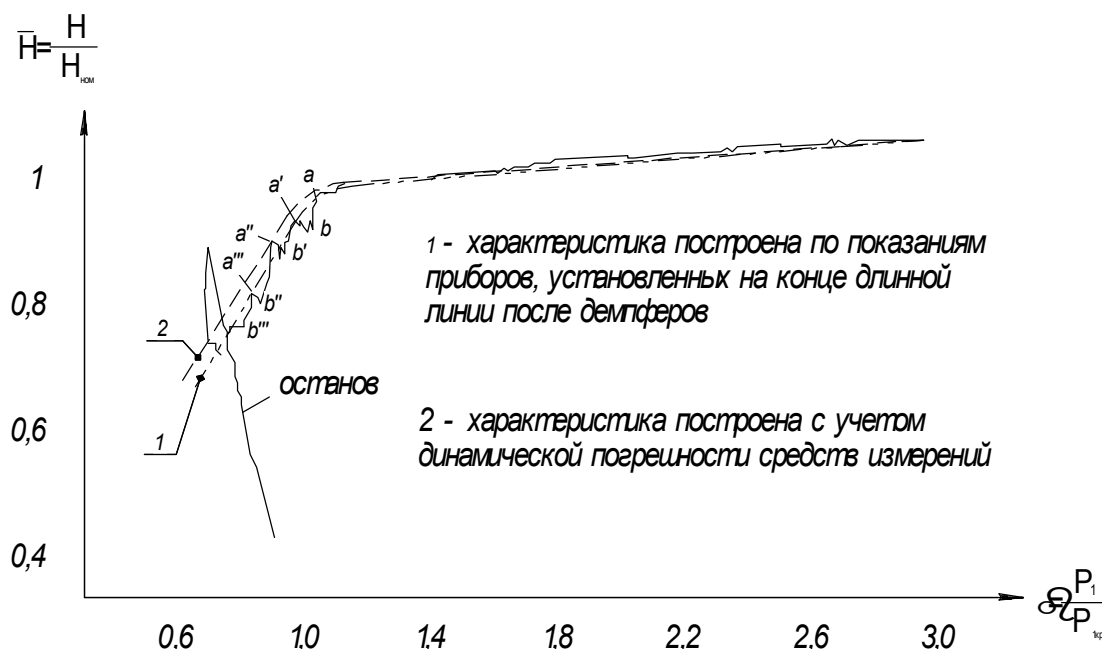


Рис. 2. Кавитационная характеристика насоса, записанная при штатном испытании

Fig. 2. Cavitation characteristics of the pump, recorded during normal testing

Характеристика 2 построена с учетом длительности переходных процессов в системе измерений и соответствует установившимся показаниям приборов.

Расхождение в значениях критического входного давления, определенного по характеристикам 1 и 2, составляет в данном случае 4,1 %.

Теоретический анализ условий работы «насос – измерительная система – гидростенд» при определении антикавитационных свойств насосов на нестационарном режиме позволил выработать требования, которым должны удовлетворять измерительные системы стенда, чтобы динамическая погрешность определения параметров насоса была минимальная. Проведенные эксперименты подтвердили правильность сделанных предположений, показали сходимость расчета и эксперимента при скоростях снижения  $P_1$  до 2000 Па/с и позволили отработать методику проведения ускоренных кавитационных испытаний насосов.

С целью экспериментальной проверки возможности автоматизированного определения критического давления на входе в насос непосредственно в процессе испытаний был изготовлен опытный образец прибора автоматической регистрации. Погрешность определения  $P_{1кр}$  составила 1,63 %, а время проведения трех серий испытаний составило ~17 мин.

**Заключение.** На основании приведенных данных можно сделать вывод, что ускоренный способ проведения испытаний в условиях серийного производства позволяет решить следующие проблемы:

- уменьшить вероятность эрозионного разрушения, сократив время испытаний;
- снизить трудоёмкость обработки результатов испытаний;
- устранить влияние субъективного фактора на результаты испытаний;
- повысить точность определения кавитационных параметров насосов за счет автоматизации процесса определения критического входного давления.

Разработанный прибор автоматической регистрации путем несложных доработок может быть использован для определения кавитационных параметров практически всех типов лопаточных насосов.

#### Библиографические ссылки

1. Башта Т. М. Машиностроительная гидравлика. М. : Машиностроение, 1971. 672 с.
2. Овсянников Б. В., Боровский Б. И. Теория и расчет агрегатов питания ЖРД. 3-е изд. М. : Машиностроение, 1986. 376 с. : ил.
3. Краев М. В., Краева Е. М. Особенности формирования кавитационных каверн в центробежном высокооборотном насосе [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-formirovaniya-kavitatsionnyh-kavern-v-tsentrobeznom-vysokooborotnom-nasose> (дата обращения: 20.11.2018).
4. Карелин В. Я. Кавитационные явления в центробежных и осевых насосах. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1975. 336 с.
5. Чебаевский В. Ф., Петров В. И. Кавитационные характеристики высокооборотных шнекоцентробежных насосов / под ред. д-ра техн. наук, проф. С. Д. Гришина. М. : Машиностроение, 1979. 152 с. : ил.
6. Яременко О. В. Испытания насосов. Справочное пособие. М. : Машиностроение, 1976. 225 с. : ил.

7. Испытания жидкостных ракетных двигателей : учеб. пособие / А. Е. Жуковский [и др.] ; под ред. д-ра техн. наук проф. В. Я. Левина. М. : Машиностроение, 1981. 199 с. : ил.

8. Технология сборки и испытаний насосов жидкостных ракетных двигателей : учеб. пособие / М. В. Краев [и др.] ; под общ. ред. проф. М. В. Краева ; Сиб. аэрокосмич. акад. Красноярск, 1993. 103 с.

9. ГОСТ 6134–2007. Насосы динамические. Методы испытаний. М. : Изд-во стандартов, 2007. 23 с.

10. Сточек Н. П., Шапиро А. С. Гидравлика жидкостных ракетных двигателей. М. : Машиностроение, 1978. 128 с.

11. Александров С. А., Павлович Л. А. Точность определения критического кавитационного запаса центробежных насосов при технологических испытаниях // Вестник машиностроения. 1977. № 6. С. 12–14.

12. Рабинович С. Г. Погрешности измерений. Л. : Энергия, 1978. 262 с.

13. Campbell W. E., Farquh J. Centrifugal Pumps for Rocket Engines [Электронный ресурс]. URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19750003130.pdf> (дата обращения: 18.06.2018).

14. Пилипенко В. В., Задонцев В. А., Натанзон М. С. Кавитационные автоколебания и динамика гидросистем. М. : Машиностроение, 1977. 352 с.

15. Гонек Н. Ф. Манометры. Л. : Машиностроение, 1979. 176 с.

#### References

1. Bashta T. M. *Mashinostroitel'naya gidravlika* [Engineering hydraulics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1971, 672 p.
2. Ovsyannikov B. V., Borovsky B. I. *Teoriya i raschet agregatov pitaniya ZhRD* [The theory and calculation of unit of liquid rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986, 376 p.
3. Kraev M. V., Kraeva E. M. Features of the formation of cavitation cavities in a centrifugal high-speed pump. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-formirovaniya-kavitatsionnyh-kavern-v-tsentrobeznom-vysokooborotnom-nasose> (accessed: 11.20.2018).
4. Karelin V. Ya. *Kavitatsionnye yavleniya v sentrobezhnykh i osevykh nasosakh* [Cavitation phenomena in centrifugal and axial pumps]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 336 p.
5. Chebaevsky V. F., Petrov V. I. *Kavitatsionnye kharakteristiki vysokooborotnykh shnekocentrobezhnykh nasosov* [Cavitation characteristics of high-speed centrifugal pumps]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979, 152 p.
6. Yaremenko O. V. *Ispytaniya nasosov* [Pump tests]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976, 225 p.
7. Zhukovsky A. E., Kondrusev V. S., Levin V. Ya., Okorochkov V. V. *Ispytaniya zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [The tests of liquid rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 199 p.

8. Kraev M. V., Nazarov V. P., Nazarova L. P., Oratynsky B. F. *Tekhnologiya sborki i ispytaniy nasosov zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Technology of assembling and tests of pumps of liquid rocket engines]. Krasnoyarsk, SAA Publ., 1993, 103 p.
9. GOST 6134–2007. *Nasosy dinamicheskie. Metody ispytaniy* [State Standard 6134-2007. The dynamic pumps. Methods of tests]. Moscow, Standartinform Publ., 2007, 23 p.
10. Stochek N. P., Shapiro A. S. *Gidravlika zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [The hydraulics of the liquid rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, 128 p.
11. Aleksandrov S. A., Pavlovich L. A. [Correctness of determination of the critical cavitation reserve of the pumps at technological tests]. *Vestnik mashinostroeniya*. 1977, No. 6, P. 12–14 (In Russ.).
12. Rabinovich S. G. *Pogreshnosti izmereniy* [The faults of the measurements]. Leningrad, Energiya Publ., 1978, 262 p.
13. Centrifugal Pumps for Rocket Engines. W. E. Campbell and J. Farquh. Available at <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19750003130.pdf> (accessed: 06.18.2018).
14. Pilipenko V. V., Zadontsev V. A., Natanzon M. S. *Kavitatsionnye avtokolebaniya i dinamika gidrosistem* [The cavitation autooscillations and dynamic of the hydraulic system]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977, 352 p.
15. Gonek N. F. *Manometry* [The pressure-gauges]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1979, 176 p.

© Назаров В. П., Назарова Л. П.,  
Швецова Д. С., Савчин Д. А., 2018



UDC 620.92

Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-651-657

**For citation:** Chernaya M. M. [Method for calculating the energy characteristics and solar battery parameters of high-voltage power supply systems]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 4, P. 651–657. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-651-657

**Для цитирования:** Черная М. М. Методика расчета энергетических характеристик и параметров солнечных батарей высоковольтных систем электропитания космических аппаратов // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 4. С. 651–657. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-651-657

## METHOD FOR CALCULATING THE ENERGY CHARACTERISTICS AND SOLAR BATTERY PARAMETERS OF HIGH-VOLTAGE POWER SUPPLY SYSTEMS

M. M. Chernaya

Tomsk State University of Control System and Radio Electronics  
40, Lenina Av., Tomsk, 634050, Russian Federation  
E-mail: cmm91@inbox.ru

*One of the main tasks arising in power supply systems (PSS) of spacecraft (SC) design is the determination of rational structure in terms of providing consumers with electricity of the required quality. At the same time, a reasonable consumption of power generated by solar batteries (SB) and accumulator batteries (AB) should be realized in PSS. The choice of the PSS structure is based on the calculation and comparative analysis of PSS options, taking into account the adopted system performance criteria, the main ones being the energy and weight-dimension characteristics. For this purpose, the process of energy flows distribution in the PSS by forming a mathematical description of the PSS operating modes is carried out. In order to obtain the graphs of the SB generated power and to calculate SB parameters during the service life, a mathematical model of the SB based on the use of initial and experimental parameters of its photo-voltaic elements of any area was developed. The SB model provides the required accuracy of I-V and V-W characteristics calculation for any given values of illumination and temperature.*

*In the article the method for calculating the energy characteristics of PSS and SB parameters taking into account the possibility of its limitation at the maximum or minimum level was described. It is shown that the method allows to determine the ways of rational redistribution of energy flows in the systems being designed to improve its weight-dimension characteristics by reducing the maximum design power of energy-converting equipment (ECE), which is achieved by forming a rational logic for applying the SB maximum power point tracking mode, in particular, when the spacecraft leaves the Earth's shadow. Energy balance in PSS is provided by applying correction coefficients. The calculation results obtained by the method are the basis for requirements for ECE and SB design in PSS and can be used by developers and manufacturers of onboard and ground PSS.*

**Keywords:** spacecraft, power supply system, mathematical model of the solar battery, energy characteristics, maximum power point tracking mode.

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

М. М. Черная

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 40  
E-mail: cmm91@inbox.ru

*Одной из основных задач проектирования систем электропитания (СЭП) космических аппаратов (КА) является определение их рациональной с точки зрения обеспечения потребителей электроэнергией заданного качества структуры. При этом в системе должно быть реализовано обоснованное потребление генерируемых солнечными (БС) и аккумуляторными батареями мощностей. Выбор структуры СЭП основывается на проведении расчета и сопоставительного анализа их альтернативных вариантов с учетом принятых критериев эффективности системы, основными из которых являются энергетические и габаритно-массовые характеристики СЭП. Для этого проводится исследование процессов распределения потоков энергии в системе путем формирования математического описания режимов работы СЭП. С целью получения графиков ге-*

нерируемой БС мощности и для расчета ее параметров в течение срока эксплуатации разработана математическая модель БС, которая основана на использовании основных и экспериментальных параметров их фотоэлектрических элементов любой площади. Модель БС обеспечивает требуемую точность расчета вольт-амперных и вольт-ваттных характеристик для любых заданных значений температуры и освещенности. Описана методика расчета энергетических характеристик СЭП и параметров БС с учетом возможности их ограничения по максимальному либо минимальному уровню. Показано, что методика позволяет определять пути рационального перераспределения потоков энергии в системах с целью улучшения их габаритно-массовых характеристик за счет уменьшения максимальной расчётной мощности их энергопреобразующей аппаратуры (ЭПА), что достигается путем формирования рационального алгоритма применения режима экстремального регулирования мощности БС, в частности, при выходе КА из тени Земли. Энергобаланс в СЭП при этом обеспечивается за счет применения поправочных коэффициентов. Полученные по методике результаты являются основой ряда требований по проектированию ЭПА и БС в СЭП и могут быть использованы разработчиками и производителями бортовых и наземных СЭП.

**Ключевые слова:** космический аппарат, система электропитания, математическая модель солнечной батареи, энергетические характеристики, экстремальное регулирование мощности.

**Introduction.** Ensuring the long term of the spacecraft (SC) active lifetime (TAL) is one of priority scientific, technical and economic tasks which solution demands a comprehensive fundamental approach during the development and creation of SC power supply systems (PSS).

The main primary energy source in SC PSS are solar batteries (SB) designed on the basis of Si or GaAs solar cells having non-linear I-V and V-W characteristics with a pronounced maximum of the generated power, determined by an operating voltage level that proves the expediency of maximum power point tracking (MPPT) mode of SB in PSS application [1–4]. Due to the increase of output voltage of the SC load power bus up to 100 V, new technical requirements to the ways of coordination and service conditions of energy sources in PSS have been created. This is due to the possibility of electrostatic discharges between photodiodes chains and current collection elements of the SB and, as a result, to the need for the maximum level of SB open circuit (OC) voltage operation limitation reached when the SC leaves the orbit shadow areas [5–7]. Application of other solar cells types in PSS is possible in case of feasibility of their use realized by means of calculation of the generated by SB capacities during TAL providing an energy balance in PSS, rational distribution of energy flows and prevention of PSS work emergency operation.

The developed technique provides the reduction in calculation time of power characteristics and the SB parameters of high-voltage SC PSS which is obtained by the decrease in the number of iterations directly proportional to the quantity of correction factors to be calculated. The technique can be applied when calculating options of ground and onboard PSS with various load curves and service conditions for the purpose of realization of energy flows in PSS rational redistribution and to impose its ECE and SB design requirements.

**Mathematical model of solar battery.** The SB electric parameters during SC service change significantly. The considerable influence on SB I-V and V-W characteristics is rendered by temperature and illumination. So, in low-orbit SC the SB panels temperature changes in the range from –90 to +80 °C, herewith the SC can have the

sharp-variable load curve and the significant number of shadow areas on the orbit. Therefore for the correct planning of PSS target equipment operation it is expedient to carry out the calculation of SB generated power in all operating modes of SC PSS during TAL.

The SB current parameters, taking into account the graphs of their illumination  $F$  and temperature  $t$ , are calculated on the experimental solar cells I-V characteristics of any area provided by their manufacturers. The SB mathematical model set by three points is the basis for the developed mathematical model: of an open circuit (OC) voltage  $U_{OC}$ , short circuit (ShC) current  $I_{ShC}$ , optimum values of SB current  $I_{MPP}$  and voltage  $U_{MPP}$  [8]. The SB mathematical model depending on temperature  $t$  and illumination  $F$  is described as

$$I_{SB}(U_{SB}, t, F) = I_{ShC}(t, F) \times \left[ 1 - \left( 1 - \frac{I_{MPP}(t, F)}{I_{ShC}(t, F)} \right)^{\frac{U_{OC}(t, F) - U_{SB}}{U_{OC}(t, F) - U_{MPP}(t, F)}} \right], \quad (1)$$

where  $U_{SB}$  – current value of SB voltage;  $I_{ShC}(t, F)$  – SB short circuit current;  $I_{MPP}(t, F)$  – optimum value of SB current on I-V characteristics at SB MPPT mode in PSS;  $U_{MPP}(t, F)$  – optimum value of SB voltage on I-V characteristics at SB MPPT mode in PSS;  $U_{OC}(t, F)$  – SB open circuit voltage.

The SB open circuit voltage depending on  $t$  and  $F$  is calculated by the formula

$$U_{OC}(t, F) = k_{Un} \cdot U_{OC}(t_1, F_1) \cdot (1 + 0,01 \cdot \beta)^{(t-t_1)}, \quad (2)$$

where  $k_{Un}$  – the correction coefficient of voltage determined by SB I-V characteristics abscissa axis, considering its illumination influence;  $F_1$  – SB nominal illumination value;  $U_{OC}(t_1, F_1)$  – SB open circuit voltage at nominal values  $t_1$  and  $F_1$ ;  $\beta$  – temperature coefficient of SB open circuit voltage.

The SB short circuit current depending on  $t$  and  $F$  is determined by the formula

$$I_{ShC}(t, F) = k_{In} \cdot I_{ShC}(t_1, F_1) \cdot (1 + 0,01 \cdot \alpha)^{(t-t_1)}, \quad (3)$$

where  $k_{In}$  – the correction coefficient on current determined by SB I-V characteristics ordinate axis, considering

its illumination influence;  $I_{ShC}(t_1, F_1)$  – SB short circuit current at nominal values  $t_1$  and  $F_1$ ;  $\alpha$  – temperature coefficient of SB short circuit current.

The optimum value of SB current is calculated taking into account  $t$  and  $F$  as follows

$$I_{MPP}(t, F) = \frac{k_{In} \cdot I_{MPP}(t_1, F_1) \cdot (1 + 0,01 \cdot \lambda)^{(t-t_1)}}{(1 + 0,01 \cdot \nu)^{(t-t_1)}}, \quad (4)$$

where  $I_{MPP}(t_1, F_1)$  – optimum value of SB current at  $t_1$  and  $F_1$ ;  $\lambda$  – temperature coefficient of SB maximum generated power, i. e. power in an optimum point (MPPT mode);  $\nu$  – temperature coefficient of the optimum value of SB voltage.

The optimum value of SB voltage taking into account  $t$  and  $F$  is calculated according to the formula

$$U_{MPP}(t, F) = k_{Un} \cdot U_{MPP}(t_1, F_1) \cdot (1 + 0,01 \cdot \nu)^{(t-t_1)}, \quad (5)$$

where  $U_{MPP}(t_1, F_1)$  – value of SB optimum voltage on I-V characteristics at  $t_1$  and  $F_1$ .

Correction coefficient of voltage  $k_{Un}$  is determined as follows:

1. On the experimental solar cells I-V characteristics of any single area (fig. 1), obtained at different illumination levels  $F_1 \dots F_n$  of solar cells and at some nominal temperature  $t_1$ , values of solar cells open circuit voltages  $U_{OC1}(t_1, F_1) \dots U_{OCn}(t_1, F_n)$  are determined by the abscissa axis.

2. The correction coefficients  $k_{U1} \dots k_{Un}$ , reflecting the relative change of solar cells open circuit voltage which is in the range between  $U_{OCn}(t_1, F_n)$  and  $U_{OCn+1}(t_1, F_{n+1})$  depending on levels of their illumination are calculated according to the formula:

$$k_{Un} = \frac{U_{OCn+1}(t_1, F_{n+1})}{U_{OC1}(t_1, F_1)} +$$

$$+ \left[ \left( \frac{U_{OCn}(t_1, F_n) - U_{OCn+1}(t_1, F_{n+1})}{U_{OC1}(t_1, F_1) - U_{OC1}(t_1, F_1)} \right) \cdot (F - F_{n+1}) \right]. \quad (6)$$

Correction coefficient of current  $k_{In}$  is determined in the same way by an abscissa axis of the experimental solar cells I-V characteristics and taking into account the use of solar cells short circuit current values:

$$k_{In} = \frac{I_{ShCn+1}(t_1, F_{n+1})}{I_{ShC1}(t_1, F_1)} +$$

$$+ \left[ \left( \frac{I_{ShCn}(t_1, F_n) - I_{ShCn+1}(t_1, F_{n+1})}{I_{ShC1}(t_1, F_1) - I_{ShC1}(t_1, F_1)} \right) \cdot (F - F_{n+1}) \right]. \quad (7)$$

**Calculation method of spacecrafts high-voltage power supply systems.** Calculation of SB parameters begins with the choice of SC PSS structure and formation of the mathematical description of PSS operation modes taking into account the ECE coefficients of energy efficiency (CE) by researching the processes of energy flows in PSS distribution depending on a ratio of generated by energy sources and power consumption load [9–11]. For example, for parallel-serial (PS) PSS the current values of SB power ( $P_{SB}$ ), AB charge power ( $P_{AB\_C}$ ), AB discharge power ( $P_{AB\_DC}$ ) and load power ( $P_{VR}$ ) are calculated according to tab. 1.

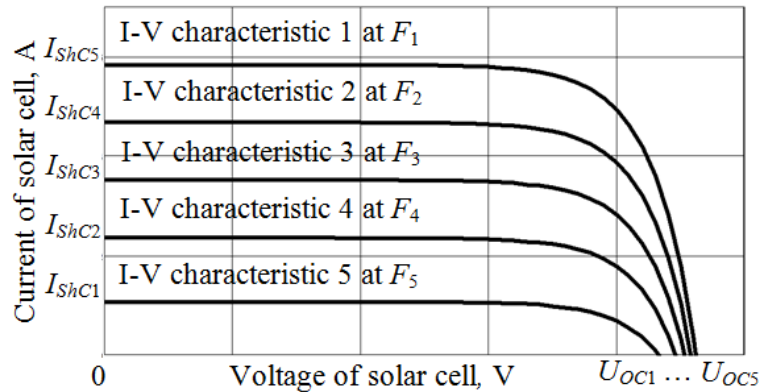


Fig. 1. I-V characteristics of the solar cell

Рис. 1. Вольт-амперные характеристики ФЭ

Current values of SB, AB and load power in PSS

Table 1

Load power supply mode from SB (VR)	$P_{LOAD} = P_{SB} \cdot \eta_{VR}$
Load power supply mode from SB and AB charge (VR + C)	$P_{SB} = \frac{P_{LOAD}}{\eta_{VR}} + \frac{P_{AB\_C}}{\eta_C}$
Load power supply mode from SB and AB discharge (VR + DC)	$P_{LOAD} = P_{SB} \cdot \eta_{VR} + P_{AB\_DC} \cdot \eta_{DC} \cdot \eta_{AB}$
Load power supply mode from AB (DC)	$P_{LOAD} = P_{AB\_DC} \cdot \eta_{DC} \cdot \eta_{AB}$

The following designations are introduced in tab. 1:  $\eta_{VR}$  – voltage regulator CE,  $\eta_C$  – charger CE,  $\eta_{DC}$  – discharger CE,  $\eta_{AB}$  – AB efficiency. The load curve of SC for some given period of time of  $T$  which, as a rule, has a cyclic character is formed. Calculation of total energy  $W_{LOAD\_sum}$  consumed by load during  $T$  is carried out according to the formula:

$$W_{LOAD\_sum} = \sum_{i=1}^n d\tau_i \cdot P_{LOAD}(\tau_i), \quad (8)$$

where  $n$  – the number of areas on  $T$ , during which the current value of load power  $P_{LOAD}(\tau_i)$  is invariable;  $i$  – ordinal value of  $T$   $n$ -area;  $d\tau_i$  – is a time period on  $T$  during which  $P_{LOAD}(\tau_i)$  remains invariable.

Load curves of SB illumination  $F(\tau_j)$  and temperature  $t(\tau_j)$  are formed. Initial values of solar cells parameters of any single area at nominal parameters of temperature and illumination are introduced:  $I_{MPP}(t(\tau_1), F(\tau_1))$ ,  $U_{MPP}(t(\tau_1), F(\tau_1))$ ,  $U_{OC}(t(\tau_1), F(\tau_1))$  and  $I_{ShC}(t(\tau_1), F(\tau_1))$ ,  $\alpha$ ,  $\nu$ ,  $\lambda$  и  $\beta$ .

Further calculation of solar cells parameters current values taking into consideration SB  $F(\tau_j)$  and  $t(\tau_j)$  curves according to formulas (2)–(7) is carried out and calculation of total value of the solar cells generated energy  $W_{solar\_cell\_sum}$  during  $T$  is similar to  $W_{LOAD\_sum}$  computational method.

The current values of the SB generated power on condition of equality of the consumed load and the SB generated power according to the formula (9) by determination of correction coefficient  $k_W$  as the ratio of  $W_{LOAD\_sum}$  to  $W_{solar\_cell\_sum}$  are calculated. The  $k$ -areas on the  $T$  period corresponding to their invariable current values are defined

$$P_{SB}(t(\tau_k), F(\tau_k)) = P_{solar\_cell}(t(\tau_k), F(\tau_k)) \cdot k_W. \quad (9)$$

Calculation of an energy balance in SC PSS is carried out by calculation of the current and total values of energy and discharge  $Q_{AB\_DC\_sum}$  and charge  $Q_{AB\_C\_sum}$  power of AB calculated taking into account PSS ECE CE, and determination of correction coefficient  $k_{AB}$  providing proportional increase in the current values of SB power for each  $k$ -rea on  $T$ , on which the current values of SB generated power are more than zero. The total value of SB generated energy ( $W_{SB\_sum}$ ) is calculated similarly to computational method  $W_{LOAD\_sum}$ .

For example, for PSS PS equation for energy balance calculation is as follows

$$\begin{aligned} Q_{AB\_DC\_sum} &= Q_{AB\_C\_sum} = \\ &= \sum_{b=1}^r \left( \frac{\frac{P_{LOAD}(\tau_b)}{\eta_{DC}(\tau_b) \cdot \eta_{AB}(\tau_b)} - P_{SB}(t(\tau_b), F(\tau_b)) \times}{\frac{\eta_{VR}(\tau_b) \cdot k_{AB}(\tau_b)}{\eta_{DC}(\tau_b) \cdot \eta_{AB}(\tau_b)}} \cdot d\tau_b \right) = \\ &= \sum_{c=1}^s \left( \frac{P_{SB}(t(\tau_c), F(\tau_c)) \cdot k_{AB}(\tau_c) \cdot \eta_C(\tau_c) - \frac{P_{LOAD}(\tau_c) \cdot \eta_C(\tau_c)}{\eta_{VR}(\tau_c)}}{U_{AB\_C}(\tau_c)} \cdot d\tau_c \right), \quad (10) \end{aligned}$$

where  $r$  – the number of areas on  $T$ , in which PSS operates in modes VR + DC or DC;  $b = 1 \dots r$  –  $r$ -area ordinal number on  $T$ ;  $U_{AB\_DC}(\tau_b)$  – AB discharge voltage in modes VR + DC or DC;  $s$  – the number of areas on  $T$ , in which PSS operates in VR + C or VR modes;  $c = 1 \dots s$  –  $s$ -area ordinal number on  $T$ ;  $U_{AB\_C}(\tau_c)$  – AB voltage in the charge mode.

AB power characteristics, including the current values of AB charge and discharge currents and AB nominal power, counted taking into consideration the accepted maximum AB charge depth, are calculated [1; 4; 11].

If discharge/charge currents of AB do not meet the technical requirements to AB, ECE and PSS in general, then their correction is implemented at the given level by calculation of correction coefficient  $k_{W2}$  which provides proportional change of  $P_{SB}(t(\tau_k), F(\tau_k))$  on  $T$  areas with SB maximum generated power for the purpose of providing PSS energy balance.

In this case, calculation values of SB current power is carried out on condition:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^p d\tau_k \cdot P_{SB}(t(\tau_k), F(\tau_k)) &= \sum_{e=1}^f d\tau_e \cdot P_{SB}(t(\tau_e), F(\tau_e)) + \\ &+ \sum_{h=1}^q d\tau_h \cdot P_{MPP}(t(\tau_h), F(\tau_h)) \cdot k_{W2}, \quad (11) \end{aligned}$$

where  $p$  – total number of  $k$ -reas on  $T$ ;  $f$  – the number of areas on  $T$  without SB MPPT realization in PSS;  $e = 1 \dots f$  –  $f$ -area ordinal number on  $T$ ;  $d\tau_e$  – time period on  $T$ , during which the current value of SB generated power  $P_{SB}(t(\tau_e), F(\tau_e))$  remains invariable in PSS without SB MPPT realization;  $q$  – the number of areas with SB MPPT realization in PSS on  $T$ ;  $h = 1 \dots q$  –  $q$ -area ordinal number on  $T$ ;  $d\tau_h$  – time period on  $T$ , during which current optimum value of SB generated power  $P_{MPP}(t(\tau_h), F(\tau_h))$  remains invariable in PSS with SB MPPT.

The SB parameters in PSS are calculated. The coefficient of proportional increase in the solar cells initial parameters is calculated [11]

$$k_{IU} = \sqrt{k_W \cdot k_{AB} \cdot k_{W2}}. \quad (12)$$

For restriction of SB actual value of current or voltage level on  $T$  the value of the restricted level of the actual parameter value is set, and also the level of illumination and temperature at which this level of restriction should not be broken and the correction coefficient of restriction  $k_{lim}$  is calculated.

For example, in high-voltage SC PSS on the condition of the maximum SB OC voltage level  $U_{OC\_max}$  restriction the coefficient of restriction  $k_{lim}$  is calculated as:

$$k_{lim} = \frac{U_{OC}(t(\tau_k), F(\tau_k)) \cdot k_{IU}}{U_{OC\_max}}, \quad (13)$$

where  $U_{OC}(t(\tau_k), F(\tau_k))$  – current value of solar cells OC voltage at minimum values of  $t$  and  $F$ .

Solar cells initial parameters are corrected taking into account  $k_{IU}$  and  $k_{lim}$ , what allows to calculate SB parameters and their I-V and V-W characteristics accounting  $F(\tau_j)$  and  $t(\tau_j)$  curves by application of the developed SB mathematical model. At the same time solar cells

non-restricted parameters are multiplied by  $k_{JU}$  and  $k_{lim}$ . The  $k_{lim}$  placement in the denominator means the SB parameter restriction. It is also necessary to consider coherence of solar cells parameters change. For example, at restriction of the allowed maximum level of SB OC voltage reached at a minimum temperature of its panels the level of SB optimum voltage is also corrected.

**Results of mathematical modeling of the spacecraft high-voltage power supply system.** Calculation of SB power characteristics and parameters was executed for high-voltage parallel-serial SC PSS (100 V) with SB MPPT [10] operating either in the mode of a simultaneous power supply load from the SB and the AB charge, or in the mode of a simultaneous power supply load from SB and the AB discharge.

Arbitrarily composed SC load curve  $P_{LOAD}(\tau)$  and the solar cells generated power curve obtained by using the

developed mathematical model of SB taking into account solar cells initial parameters at  $t_1 = 25^\circ\text{C}$ :  $I_{ShC}(t_1, F_1) = 5.83\text{ A}$ ,  $U_{OC}(t_1, F_1) = 46.2\text{ V}$ ,  $I_{MPP}(t_1, F_1) = 5.43\text{ A}$ ,  $U_{MPP}(t_1, F_1) = 37.7\text{ V}$ ,  $\beta = -0.3$ ,  $\lambda = -0.39$ ,  $\alpha = 0.04$ ,  $\nu = -0.4$  and SB temperature  $t(\tau)$  and illumination  $F(\tau)$  curves are shown in fig. 2.

During the calculation it was obtained that  $W_{solar\ cell\ sum} = 314.33\text{ W}\cdot\text{h}$ . For providing an energy balance in PSS at  $W_{LOAD\ sum} = 9883.33\text{ W}\cdot\text{h}$  and taking into account the restriction of allowed maximum level of SB OC voltage reached at a SC exit from the Earth's shadow is 180 V, the correction coefficient  $k_W = 31.443$ , the correction coefficient  $k_{AB} = 1.158$ , the coefficient of proportional increase in solar cell initial parameters  $k_{JU} = 36.403$  and the correction coefficient  $k_{lim} = 2.097$ . The current values of the SB generated capacities  $P_{BS\_cur}$  are shown in tab. 2.

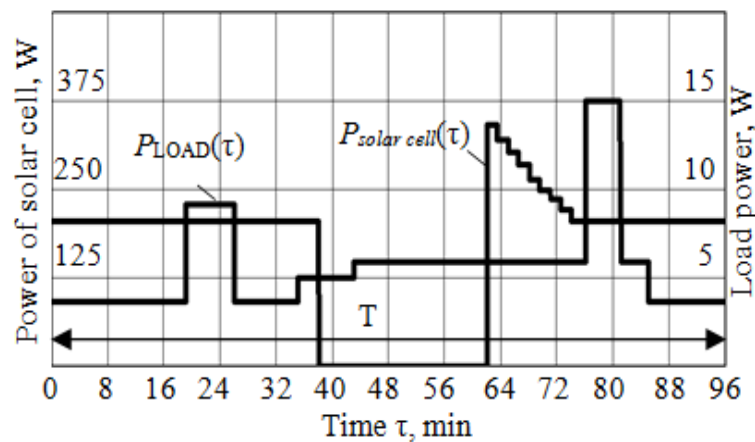


Fig. 2. The load curve  $P_{LOAD}(\tau)$  and the solar cell generated power curve  $P_{solar\ cell}(\tau)$  in the SC PSS with the MPPT

Рис. 2. Графики нагрузки  $P_H(\tau)$  и генерируемой ФЭ мощности  $P_{ФЭ}(\tau)$  в СЭП КА с ЭРМ БС

Table 2

Parameters of the solar battery of the spacecraft high-voltage power supply system

$\tau_k$ , minute	$P_{LOAD\_cur}$ , W	$P_{solar\ cell\_cur}$ , W	$P_{BS\_cur}$ , W	$U_{OC}(t, F)$ , V	$I_{MPP}(t, F)$ , A	$U_{MPP}(t, F)$ , V
0	4000	247.37	9005.03	121.90	93.76	96.04
19	10000	247.37	9005.03	121.90	93.76	96.04
26	4000	247.37	9005.03	121.90	93.76	96.04
35	5500	247.37	9005.03	121.90	93.76	96.04
38	5500	0.00	0.00	—	—	—
43	6500	0.00	0.00	—	—	—
62	6500	254.79	14944.29	180	92.55	161.47
63.5	6500	256.32	14096.72	172.09	92.69	152.08
64	6500	257.85	13297.24	164.53	92.83	143.24
65	6500	259.33	12543.09	157.30	92.97	134.92
66.5	6500	260.98	11603.68	148.15	93.15	124.57
68	6500	261.54	10945.59	141.64	93.29	117.33
69.5	6500	260.83	10324.81	135.42	93.43	110.51
71	6500	257.78	9737.02	129.45	93.57	104.06
74	6500	247.37	9005.03	121.90	93.76	96.04
76	16500	247.37	9005.03	121.90	93.76	96.04
81	6500	247.37	9005.03	121.90	93.76	96.04
85	4000	247.37	9005.03	121.90	93.76	96.04

The maximum rated power of a voltage regulator in the channel of energy transformation from the SB and an AB charger are defined by the SB maximum generated power value on  $T$  and are equal to 14.94 kW. The maximum rated power of the discharger is defined by the SC maximum power of load, depends on the discharger CE and is equal to 17.37 kW.

PSS mass decrease is reached by the development of new circuit realization of SC PSS ECE with the increased values of CE [12–15] and by the research of ways of energy flows rational distribution in PSS. For example, the change of SB MPPT mode use algorithm at the SC exit from shadow areas on the orbit, will allow to reduce the ECE maximum rated power, and, as a result, the mass of PSS in general.

**Conclusion.** The developed solar battery mathematical model is based on the values of initial and experimental parameters of photoelectric cells use and provides calculation of SB I-V and V-W characteristics taking into account arbitrary assigned values of illumination and temperature regardless of their manufacture technology.

The offered method of calculation of SB power characteristics and parameters in PSS based on the use of correction coefficients provides calculation and the possibility of energy flows redistribution in the system for the purpose of PSS weight-dimension characteristics decrease, and allows to obtain SB initial parameters, on condition of ensuring an energy balance in PSS, accounting the given service conditions and load curves of the SC. Based on calculation results, carried out according to the developed technique, the requirements for solar batteries and PSS energy-converting equipment designing can be formulated and imposed.

The developed method of SB initial parameters calculation allows defining the requirements to their design in PSS taking into consideration the limitation of the actual values of SB currents and/or voltage maximum or minimum level.

**Acknowledgements.** The research was made to implement decree of the Government of the Russian Federation of 9 April, 2010 No. 218 and contract between ISS JSC and the Ministry of Education and Science of the Russian Federation of 01 December 2015 No. 02.G25.31.0182.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218 от 09.04.2010 г. и договора между АО «ИСС» и Минобрнауки РФ от 01.12.2015 г. № 02.G25.31.0182.

## References

1. Soustin B. P., Ivanchura V. I., Chernyshev A. I., Islyayev Sh. N. *Sistemy elektropitaniya kosmicheskikh apparatov* [Power supply systems of space crafts]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1994, 318 p.
2. *Elektronnye i elektromekhanicheskie sistemy i ustroystva* [Electronic and electromechanical systems and devices]. Tomsk, Polytechnic University Publ., 2016, 512 p.
3. Dontsov O. A., Ivanchura V. I., Krasnobaev Yu. V., Post S. S. [Autonomous electric power supply system

with extreme regulation power tracker of primary energy sources]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2016, Vol. 327, No. 12, P. 35–44 (In Russ.).

4. Chebotaev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* [Basics of design of information space vehicles]. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2011, 515 p.

5. Chernaya M. M., Shinyakov Y. A., Osipov A. V. [Spacecraft power system]. *17 Mezhdunarodnaya konferenciya molodykh specialistov po mikro/nanotehnologiyam i jelektronnyy priboram* [17th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices. Proc. of the 17th International conference]. Erlagol, 2016, P. 589–593.

6. Lesnykh A. N., Sarychev V. A. [The research of high-voltage power supply systems for space crafts with boost converter]. *Vestnik SibGAU*. 2006, No. 6 (13), P. 63–66 (In Russ.).

7. Akishin A. I. [Impact of electrical discharges on solar panels] *Nauchno-issledovatel'skii institut yadernoi fiziki imeni D.V. Skobel'tsyna MGU*. 2008, No. 4, P. 68–71 (In Russ.).

8. Privolov V. D., Nikiforov V. E. *Otsenka effektivnosti primeneniya ekstremal'nogo regulatora v avtonomnykh SEP* [Estimation of the effectiveness of the application of the extreme regulator in autonomous PSS]. Kuibyshev, KPI Publ., 1981, 16 p.

9. Osipov A. V., Shinyakov Yu. A., Shkol'nyi V. N., Suntsov S. B., Chernaya M. M. [Structures for constructing high-voltage power supply systems for space crafts based on inverter-transformer converters]. *Electrical engineering*. 2016, No. 12, P. 26–33 (in Russ.).

10. Shinyakov Yu. A., Gurtov A. S., Gordeev K. G., Ivkov S. V. [Choice of the structure of power systems for low Earth orbit spacecraft]. *Bulletin of the Samara State Aerospace University. academician S. P. Koroleva*. 2010, No. 1(21), P. 103–113 (In Russ.).

11. Chernaya M. M. *Issledovanie i razrabotka energopreobrazuyushchei apparatury vysokovol'tnykh sistem elektropitaniya kosmicheskikh apparatov. Dis. kand. nauk* [Research and development energy conversion equipment high-voltage power supply systems spacecraft]. Tomsk, TUSUR, 2017, 142 p.

12. Chernaya M. M., Shinyakov Yu. A. [Research and development of energy-converting equipment for high-voltage power supply systems for low-Earth orbit space remote sensing devices]. *Sbornik materialov VII Mezhdunarodnoi nauchnotekhnicheskoi konferentsii K. E. Tsiolkovskii – 160 let so dnya rozhdeniya. Kosmonavtika. Radioelektronika. Geoinformatika* [K. E. Tsiolkovsky – 160 years from the birthday. cosmonautics. radio electronics. Geoinformatics. Proc. of the VII International Scientific and Technical Conference named K. E. Tsiolkovsky]. Ryazan', 2017, P. 134–136 (In Russ.).

13. Chen W., Rong P., Lu Z. Y. Snubberless bidirectional DC-DC converter with new CLLC resonant tank featuring minimized switching loss. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2010, vol. 57, No. 9, P. 3075–3086.

14. Wu. J., Li Y., Sun X., Liu F. A new dual-bridge series resonant DC-DC converter with dual tank. *IEEE*

*Transactions on Power Electronics*. 2017, Vol. 33(5), P. 3884–3897.

15. Nguyen D. D., Nguyen D. T., Fujita G. Dual-active-bridge series resonant converter: A new control strategy using phase-shifting combined frequency modulation. *IEEE Conference Publications*. 2015, No. 10, P. 1215–1222.

### Библиографические ссылки

1. Системы электропитания космических аппаратов / Б. П. Соустин [и др.]. Новосибирск : Наука. Сиб. издат. фирма, 1994. 318 с.

2. Электронные и электромеханические системы и устройства : сб. науч. тр. Томск : Изд-во политехн. ун-та, 2016. 512 с.

3. Автономная система электропитания с экстремальным регулированием мощности первичных источников энергии / О. А. Донцов [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327, № 12. С. 35–44.

4. Чеботаев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 515 с.

5. Chernaya M. M., Shinyakov Y. A., Osipov A. V. Spacecraft power system // 17th Intern. conf. of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM). Erlagol, 2016. P. 589–593.

6. Лесных А. Н., Сарычев В. А. Исследование высоковольтных систем электропитания космических аппаратов со стабилизаторами напряжения вольтодобавочного типа // Вестник СибГАУ. 2006. № 6 (13). С. 63–66.

7. Акишин А. И. Воздействие электрических разрядов на солнечные батареи ИСЗ // Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобелева МГУ. 2008. № 4. С. 68–71.

8. Привалов В. Д., Никифоров В. Е. Оценка эффективности применения экстремального регулятора в автономных СЭП. Куйбышев : КПИ, 1981. 16 с.

9. Структуры построения высоковольтных систем электропитания космических аппаратов на основе инверторно-трансформаторных преобразователей / А. В. Осипов [и др.] // Электротехника. 2016. № 12. С. 26–33.

10. Выбор структуры систем электроснабжения низкоорбитальных космических аппаратов / Ю. А. Шиняков [и др.] // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королева. 2010. № 1(21). С. 103–113.

11. Черная М. М. Исследование и разработка энергопреобразующей аппаратуры высоковольтных систем электропитания космических аппаратов : дис. ... канд. техн. наук. Томск : ТУСУР, 2017. 142 с.

12. Черная М. М., Шиняков Ю. А. Исследование и разработка энергопреобразующей аппаратуры высоковольтных систем электропитания низкоорбитальных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // К. Э. Циолковский – 160 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика : сб. материалов VII Междунар. науч.-техн. конф. Рязань, 2017. С. 134–136.

13. Chen W., Rong P., Lu Z. Y. Snubberless bidirectional DC-DC converter with new CLLC resonant tank featuring minimized switching loss // *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2010. Vol. 57, No. 9. P. 3075–3086.

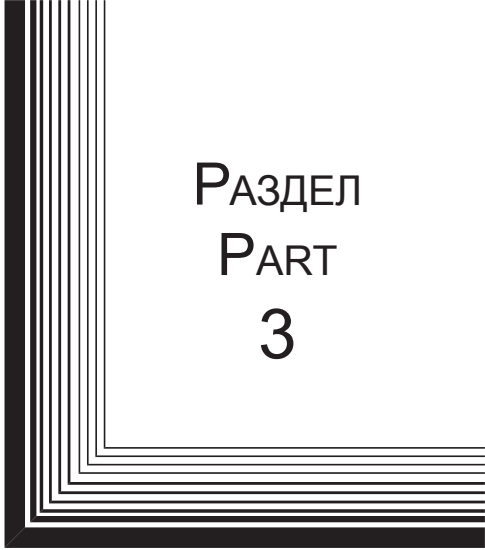
14. A new dual-bridge series resonant DC-DC converter with dual tank / J. Wu [et al.] // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2017. Vol. 33(5). P. 3884–3897.

15. Nguyen D. D., Nguyen D. T., Fujita G. Dual-active-bridge series resonant converter: A new control strategy using phase-shifting combined frequency modulation // *IEEE Conference Publications*. 2015. No. 10. P. 1215–1222.


© Chernaya M. M., 2018







РАЗДЕЛ  
PART  
3



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ  
ПРОЦЕССЫ  
И МАТЕРИАЛЫ

TECHNOLOGICAL  
PROCESSES  
AND MATERIALS SCIENCE



UDC 621.793

Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-660-667

**For citation:** Voronin A. S., Fadeev Yu. V., Ivanchenko F. S., Nemtsev I. V., Khartov S. V. [Transparent heaters based on the copper micromesh passivated by Graf(ph)ene oxide]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 4, P. 660–667. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-660-667

**Для цитирования:** Воронин А. С., Фадеев Ю. В., Иванченко Ф. С., Немцев И. В., Хартов С. В. Прозрачные нагревательные элементы на основе медной микросетки, пассивированной оксидом графена // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 4. С. 660–667. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-660-667

## TRANSPARENT HEATERS BASED ON THE COPPER MICROMESH PASSIVATED BY GRAF(PH)ENE OXIDE

A. S. Voronin<sup>1</sup>, Yu. V. Fadeev<sup>1</sup>, F. S. Ivanchenko<sup>1,2</sup>, I. V. Nemtsev<sup>1</sup>, S. V. Khartov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Krasnoyarsk Scientific Center of the SB RAS  
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>2</sup>Siberian Federal University  
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation  
E-mail: a.voronin1988@mail.ru

*The paper presents the results of creating and researching the transparent heaters with enhanced performance characteristics. The heaters are based on a composite coating of a new type by contrast with classical solutions based on transparent conductive oxide films. Such a composite coating is copper micromesh obtained using a self-organized template, stabilized by a thin film of graphene oxide (GO). The micromesh coating is formed by magnetron sputtering of copper onto a template obtained as a result of self-organized cracking of a silica film. Then, a graphene oxide film protecting the micromesh coating from thermal and chemical degradation is applied to the micromesh coating by the spray-method. A composite coating with the surface resistance of 8.9 Ohm/sq is obtained with the transparency of 82.8 % at the wavelength of 550 nm. High uniformity of heating and stability of the composite coating are shown when operating under heating up to 97.2 °C for a long time (24 hours). The composite coating of the GO / Cu micromesh on a glass substrate 2 mm thick is characterized by the thermal resistance value of 134.2 °C·cm<sup>2</sup>·W<sup>-1</sup>, while the ITO literature sample on an equivalent substrate is characterized by the thermal resistance of 94.04 °C·cm<sup>2</sup>·W<sup>-1</sup>, which indicates higher heating efficiency at the same specific power dissipation. This fact opens up prospects for its use as an anti-icing coating in aerospace industry.*

**Keywords:** transparent conductive coating, self-organized template, copper micromesh, transparent IR heater, graphene oxide.

## ПРОЗРАЧНЫЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ МЕДНОЙ МИКРОСЕТКИ, ПАССИВИРОВАННОЙ ОКСИДОМ ГРАФЕНА

А. С. Воронин<sup>1</sup>, Ю. В. Фадеев<sup>1</sup>, Ф. С. Иванченко<sup>1,2</sup>, И. В. Немцев<sup>1</sup>, С. В. Хартов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Красноярский научный центр СО РАН  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79  
E-mail: a.voronin1988@mail.ru

*Представлены результаты по формированию и исследованию прозрачных нагревателей с повышенными эксплуатационными характеристиками относительно классических решений на основе оксидных плёнок. Композиционное покрытие представляет собой медную микросетку, полученную при помощи самоорганизованного шаблона, стабилизированную тонкой пленкой оксида графена (ОГ). Микросетчатое покрытие формируется посредством напыления меди на шаблон, полученный в результате самоорганизованного растрескивания пленки кремнезема. Затем на микросетчатое покрытие spray-методом наносилась пленка оксида графена, защищающая микросетчатое покрытие от термической и химической деградации. Получено композиционное покрытие с поверхностным сопротивлением 8,9 Ом/кв при прозрачности 82,8 % на длине волны 550 нм. Показана высокая однородность нагрева и стабильность композиционного покрытия при функционировании в условиях нагрева до 97,2 °C в течение длительного времени (24 часа). Композиционное покрытие ОГ / Си-микросетка на стеклянной подложке, толщиной 2 мм, характеризуется значением теплового сопро-*

тивления  $134,2 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{см}^2\cdot\text{Вт}^{-1}$ , в то время как литературный образец ИТО на эквивалентной подложке характеризуется тепловым сопротивлением  $94,04 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{см}^2\cdot\text{Вт}^{-1}$ , что говорит о более высокой эффективности нагрева при одинаковой удельной рассеиваемой мощности, что открывает перспективы применения в качестве антиобледенительных покрытий в аэрокосмической отрасли.

**Ключевые слова:** прозрачное проводящее покрытие, самоорганизованный шаблон, медная микросетка, прозрачный нагреватель, оксид графена.

**Introduction.** Transparent heaters are used as anti-icing coatings applied in civil and military aviation, northern shipping, as well as in thermochromic windows. Taking into account the severe climatic conditions typical for our region, the development of cost-effective transparent heating elements is an important task for materials science.

It is also worth noting that in addition to their calorific value, transparent conductive coatings are used as transparent screens of radio emission, as well as transparent electrodes in solar cells and LEDs, which are integral parts of orbital stations and satellites.

Currently, transparent heaters based on indium oxide doped with tin (ITO) [1; 2] or tin oxide doped with fluorine (FTO) [3] are the most widely used ones, but they poorly meet the requirements put forward to the heating elements. Oxide transparent conductive coatings have low thermal conductivity, less than  $10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  [4], which affects the response time of the system. The disadvantages of oxide heaters include high cost and brittleness, as well as objective difficulties with the transition to a flexible form factor.

Micro and nanowire films [5] are the most promising elemental base for transparent heaters. This type of coating allows combining high optical transparency and low surface resistance and, as a consequence, low energy consumption, as well as compatibility with a polymer carrier, which is the first requirement for transparent heaters. A number of studies have shown the possibility of realizing efficient transparent IR heaters based on the films of silver [6] and copper [7] nanowires, as well as micro and nanomeshes obtained by various methods of lithography [8–10]. However, the proposed methods are either expensive or difficult to scale, which prevents the emergence of industrial transparent heaters based on micro and nanowire films.

However, it is worth noting that the thermal and chemical stability is greatly reduced [11] in transition to micro and nano-scale. The given circumstance increases the relevance of the development of methods for passivating metallic micro and nanostructures.

This paper proposes the method of forming GO / Cu micromesh composite transparent conductive coatings. The micromesh coating is formed by vacuum deposition of copper on a self-organized template resulting from cracking of a gel film during the drying process and is a cheap analog of lithographic templates [12; 13].

**The method of obtaining GO / Cu micromesh composite coatings.** The first stage is the preparation of the substrate (polyethylene terephthalate, polyimide, glass, monocrystalline silicon), since the adhesion of the silica gel to the substrate is a key parameter that allows obtaining a system with controlled cracking morphology. The second stage is the application of a pre-prepared silica sol

to the substrate. The third stage is the formation of a spatial gel network occurring due to evaporation of the solvent. At the same time there is a sharp increase in the viscosity of the solution; mechanical stresses leading to film cracking [14] are formed due to drying in the gel. The fourth stage of the process of obtaining micro-mesh coatings is metal sputtering on self-organized templates. At the fifth stage, selective liquid removal of silica cells with excess sprayed metal is performed. The difference in height between the surface of the template and the substrate allows selective removing the template with excess sprayed (sputtering) metal. As a result, only the micro-mesh coating remains on the substrate [12].

Silica sol was used to form a self-organized template. To obtain the sol, 3 ml of tetraethoxysilane ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}$ )<sub>4</sub>Si and 1.5 ml of ethanol were mixed in one tube, and 0.01 ml of HCl was added to 1.5 ml of water in the second tube. Then the contents of the tubes were poured together and mixed vigorously. The sol was deposited on glass (2 mm) substrates with an area of  $30 \text{ cm}^2$ , using a Meyer rod (liquid film thickness of  $25 \text{ }\mu\text{m}$ ) [13]. After applying the precursor, the films were dried in air for 15 minutes at a relative humidity of 35–40 %, which ensured complete cracking of the gel film. Layers of copper of 70, 140 and 210 nm thickness were deposited on the obtained templates by the magnetron method using a “Caroline D15” apparatus (ESTO-Vacuum, Russia). The choice of copper is due to its low resistivity and low cost.

The cost estimate of a micromesh coating is 1–3 Rub /  $\text{m}^2$ , while using silver as a micromesh material increases the cost of the coating by two orders of magnitude. After spraying metal, silica clusters are removed with adhesive tape.

At the last stage, a graphene oxide film is deposited on the surface of micromesh using the spray-method. A 1.5 % aqueous solution of GO (“Acco Lab”, Russia) prepared by Hammers method was used to create a protective film on metallic micromesh coatings. The film thickness was set by the volume of the solution applied per unit area. Two specific concentrations of GO were investigated:  $0.01 \text{ ml} / \text{cm}^2$  and  $0.05 \text{ ml} / \text{cm}^2$ . After application, the system was dried in air at  $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$  in order to remove water and seal the protective film.

**The study of composite coatings by optical and electron microscopy.** The obtained templates and copper micromeshes on glass substrates were studied by optical and electron microscopy. The microimage of the self-organized template is shown in fig. 1, a.

The average cell size obtained by statistical processing of 10 micrographs for this type of pattern is  $(43.3 \pm 15.5) \text{ }\mu\text{m}$ , the average crack width is  $(2.3 \pm 0.6) \text{ }\mu\text{m}$ . The metal fill factor of the surface is about  $(11.4 \pm 1.5) \%$ .

SEM images (images obtained with “Hitachi S-5500” electron microscope, KRSKC (Krasnoyarsk Regional

Shared Knowledge Centre) FIC KSC SB RAS) of a composite coating with different thickness of the graphene oxide film are shown in fig. 2, *a*, *b*. The microimage

demonstrates high uniformity of the graphene oxide film. The protective layer of graphene oxide gives the coating a yellow-brown tint.

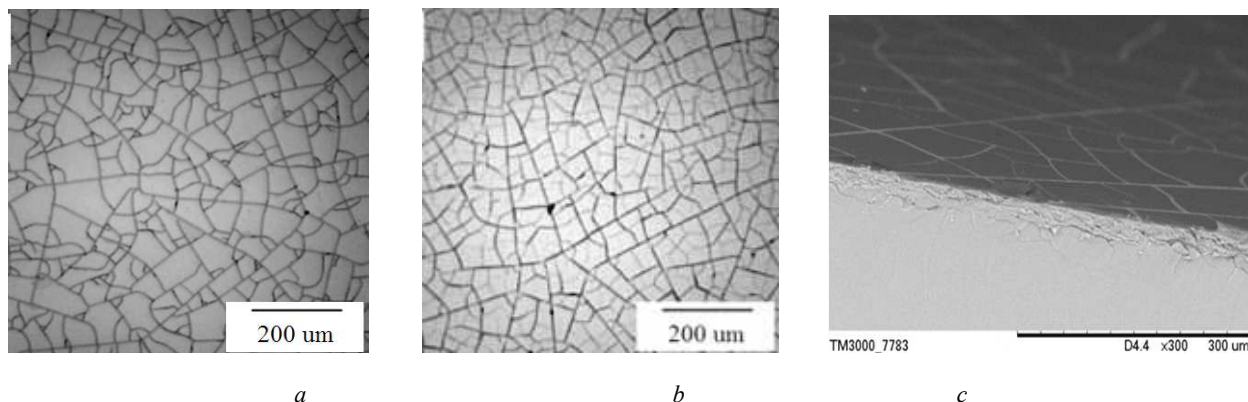


Fig. 1. A microimage of the silica template (*a*) and copper micromesh with a thickness of 70 nm (*b*), as well as the cross section of the micromesh on the glass (*c*)

Рис. 1. Микрофотография кремнезёмного шаблона (*a*) и медной микросетки толщиной 70 нм (*б*), а также скол микросетки на стекле (*в*)

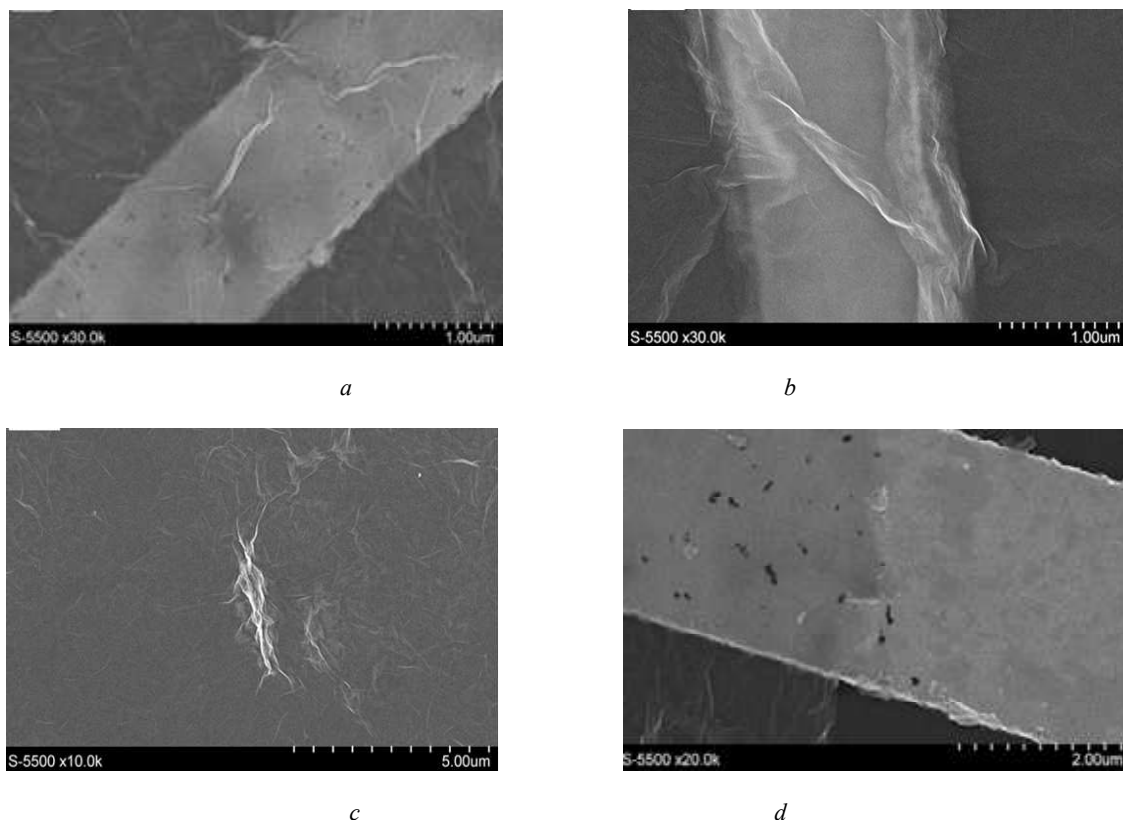


Fig. 2. SEM-images of composite coatings of GO (0, 01 ml / cm<sup>2</sup>) / Cu micromesh (*a*) and GO (0, 05 ml / cm<sup>2</sup>) / Cu micromesh (*b*); the morphology of the graphene oxide film inside the micromesh cell (*c*); the boundary of the composite coating of GO (0,01 ml / cm<sup>2</sup>) / Cu micromesh (*d*)

Рис. 2. СЭМ-изображения композиционных покрытий ОГ (0,01 мл/см<sup>2</sup>) / Cu-микросетка (*a*) и ОГ (0,05 мл/см<sup>2</sup>) / Cu-микросетка (*б*); морфология пленки оксида графена внутри ячейки микросетки (*в*); граница композиционного покрытия ОГ (0,01 мл/см<sup>2</sup>) / Cu-микросетка (*г*)

The presence of folds characteristic of graphene materials is the evidence of the high-quality coating of the micromesh with a graphene oxide film and indicates its coherence.

The main advantage of the spray-method is the high homogeneity and continuity of the graphene oxide film over the entire area (fig. 2, *c*, *d*).

**Optoelectronic properties of OG / Cu micromesh composite coatings.** The spectral dependences of the optical transmittance of the composite coating at the main technological stages were measured in the range of 400–800 nm with the aid of Shimadzu UV-3600 spectrophotometer (KRSKC FIC KSC SB RAS) and are shown in fig. 3, *a*. The micromesh coating with a metallization thickness of 70 nm has a flat transmission spectrum in the entire considered range. Fresnel reflection from the substrate boundaries is about 9.5 % at the wavelength of 550 nm; the transmittance of the micromesh is 89.5 % without taking into account the influence of the substrate. The composite coating of GO (0.01 ml / cm<sup>2</sup>) / Cu micromesh has uneven transmission, greatly losing transparency in the blue-violet spectral region due to the passivating layer of graphene oxide, which has an absorption peak in the UV region characteristic of aromatic compounds [15]. At the wavelength of 550 nm, the composite coating has a transparency of 86.8 % (minus Fresnel reflection from the substrate). The transparency of the graphene oxide layers at the wavelength of 550 nm was 97.3 % for a film of 0.01 ml / cm<sup>2</sup> and 90.2 % for a film of 0.05 ml / cm<sup>2</sup>, respectively.

Fig. 3, *b* shows Raman spectrum of a graphene oxide film (measurements were performed on a HoribaJobinYvon T64000 spectrometer, KRSKC FIC KSC SB RAS). The spectrum of graphene oxide shows two main peaks characteristic of this system: the G-line, which characterizes the vibrations of the sp<sup>2</sup> carbon bond system (~1580 cm<sup>-1</sup>) (graphite-like zone), and the 2D-line (~2700 cm<sup>-1</sup>), which is an overtone of D-line (defective area) (~1330 cm<sup>-1</sup>). The appearance of the D-line for samples of GO indicates the formation of a defective structure with respect to graphite. The appearance

of a regular peak in the region of 2700 cm<sup>-1</sup> indicates a small number of layers in the GO structure [16]. Overtones D + G and 2D' are typical for graphene oxide, but they are not used for the qualitative characterization of graphene oxide films.

The effect of the thickness of magnetron sputtered copper and the thickness of the graphene oxide film on the optoelectronic properties of composite coatings are given in table.

Increasing the thickness of the metal threefold reduces the surface resistance of the coating while reducing transparency by 3.8 %; it is also one of the advantages of mesh microstructures.

**Stability of composite coatings.** The resistance of the coatings to oxidation by atmospheric oxygen was evaluated by the change in the specific resistance of the coatings during the test. As it is known from the literature, thin vacuum copper is slowly oxidized by atmospheric oxygen. The resistance of the copper mesh with the thickness of 70 nm at room temperature and humidity increased by 36 % for 30 days due to oxidation by oxygen in the air. A micromesh passivated by a graphene oxide film remained stable throughout the entire observation time (fig. 4, *a*). Moreover, in these conditions, the thickness of the GO film does not matter.

Fig. 4, *b* shows the stability of the coatings during their exposure at a temperature of 100 °C within 24 hours. The coating on the basis of copper micromesh without a passivating graphene oxide layer increased its resistance from 21.3 Ohm/sq to 3.2 kOhm/sq during the test, which resulted in a complete loss of functionality. The composite coating with a protective film of graphene oxide (0.01 ml / cm<sup>2</sup>) increased its resistance by 7.6 % from 21.7 Ohm / sq to 23.3 Ohm / sq during the test. A slight degradation of the coating by the graphene oxide protective film is most likely due to the presence of a certain number of open tracks, which begin to oxidize during the heating process. A passivating graphene oxide layer with a specific concentration of 0.05 ml / cm<sup>2</sup> showed complete tightness during the entire observation period.

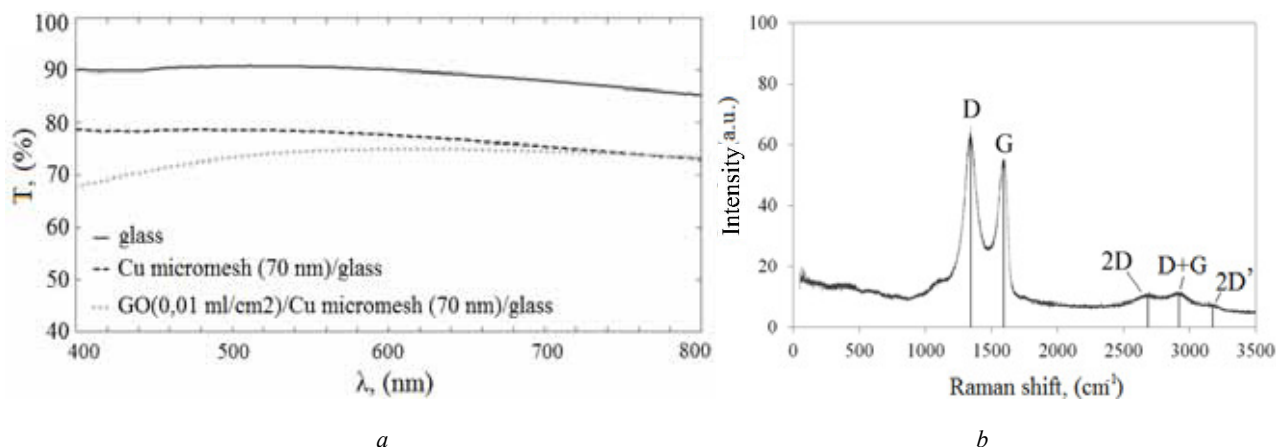
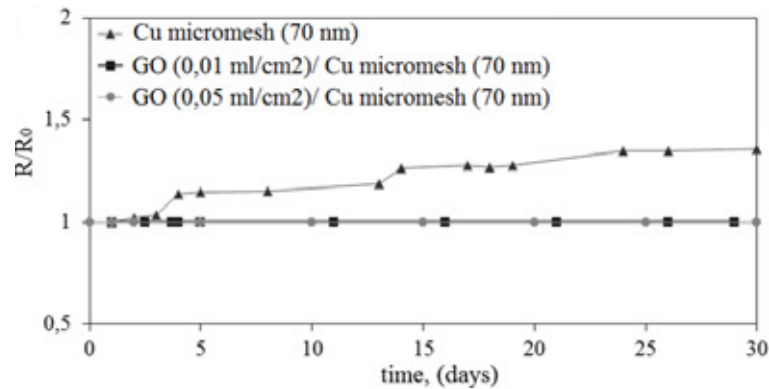


Fig. 3. Spectral transmittance of the composite coating at the main technological stages (*a*); Raman spectrum of a thin graphene oxide film (*b*)

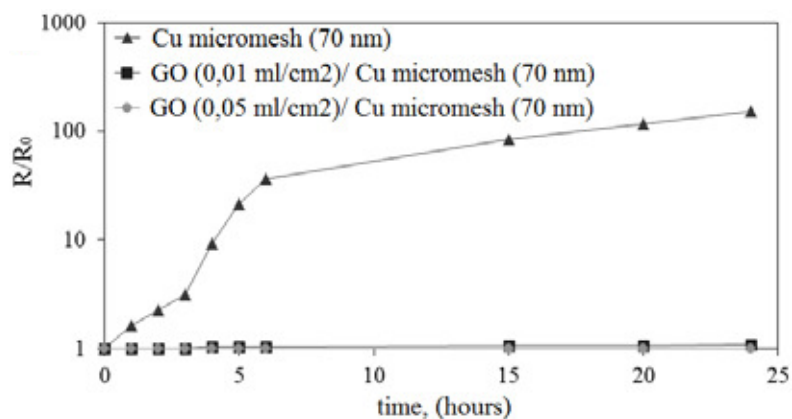
Рис. 3. Спектральное пропускание композиционного покрытия на основных технологических этапах (*a*); спектр комбинационного рассеяния тонкой пленки оксида графена (*b*)

## The influence of technological parameters on the optoelectronic characteristics of composite coatings

Coating	$h_{Cu}$ , nm	$R_s$ , Ohm/sq	$T(550\text{ nm})$ , %
Cu micromesh	70	21.3	89.5
Cu micromesh	140	14.2	87.9
Cu micromesh	210	8.6	85.7
GO (0.01 ml/cm <sup>2</sup> ) / Cu micromesh	140	15.3	85.1
GO (0.01 ml/cm <sup>2</sup> ) / Cu micromesh	210	8.9	82.8
GO (0.05 ml/cm <sup>2</sup> ) / Cu micromesh	140	15.5	77.2
ITO (commercial sample)	200	15	90



a



b

Fig. 4. Change in sheet resistance of coatings with exposure to air for a month (a) and daily exposure at 100 °C (b)

Рис. 4. Изменение удельного поверхностного сопротивления покрытий при выдержке на воздухе в течение месяца (a) и суточной выдержке при 100 °C (б)

**The study of a transparent heating element.** The operation modes of the transparent heater were investigated on the GO system (0.05 ml / cm<sup>2</sup>) / Cu micromesh (140 nm) / glass, the surface resistance of the coating was 15.3 Ohm / sq.

In the heater operation mode, a constant electric current was passed through the composite coating, heating it according to the Joule–Lenz law [17]

$$Q = I^2 R_s \Delta t. \quad (1)$$

The heat released by the composite coating consists of three components, which can be written with consideration of Ohm's law as follows:

$$\frac{U^2}{R_s} \Delta t = Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{rad}, \quad (2)$$

where  $Q_{cond}$  is the summand responsible for the substrate heating,  $Q_{conv}$  is the convective summand,  $Q_{rad}$  is the summand responsible for radiant heat transfer [17].



Thermograms were measured using a Testo 875-2 thermal imager. Fig. 5, *a* shows a thermogram of the composite coating under investigation with a scattered power of  $0.6 \text{ W/cm}^2$ . The thermogram demonstrates the heating of high uniformity over the entire area of the coatings under study, in some areas there is a slight variation of  $3\text{--}5 \text{ }^\circ\text{C}$ , which is most likely due to fluctuations of the surface resistance of the mesh coating. The heating rate of the system is due to the thermal conductivity and thickness of the substrate, as well as the heat transfer coefficient of the composite coating. The composite coating on glass has a response time of about 200 seconds (fig. 5, *b*), the same for all samples and determined by the substrate.

When the voltage of 15 V was applied, the specific power dissipated on the coating was  $0.6 \text{ W/cm}^2$ , as a result of which the coating heated to the temperature of  $97.2 \text{ }^\circ\text{C}$  (fig. 5, *b*). The coating functioned within 24 hours without change in conductivity.

In general, it is worth noting that composite coatings on glass are able to work stably up to temperatures of about  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $1 \text{ W/cm}^2$ ). Further increase in temperature

above  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  leads to thermal degradation of the graphene oxide film. According to a thermogravimetric analysis carried out in [18], heating of graphene oxide in air above  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  is accompanied by its oxidation to gaseous products with loss of 20 % of weight, and the subsequent oxidation of the copper micromesh, which causes an increase in surface resistance by 50 % (fig. 5, *c*).

Fig. 6 shows the comparison of the effectiveness of a composite transparent heater with an ITO-based heater on a 2 mm thick glass substrate [17]. Since the substrates in experiments are the same, it is appropriate to compare their effectiveness.

The linear approximation of the experimental points obtained for the composite coating in the present work and for the ITO coating from [17] makes it possible to estimate the thermal resistance of heaters, measured in  $^\circ\text{C}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{W}^{-1}$ , and determining to what temperature the coating will heat up during power dissipation  $1 \text{ W/cm}^2$ . Approximation results give heat resistance values of  $94.04 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{W}^{-1}$  for ITO and  $134.2 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{W}^{-1}$  for composite coating, which is comparable to the best literary results.

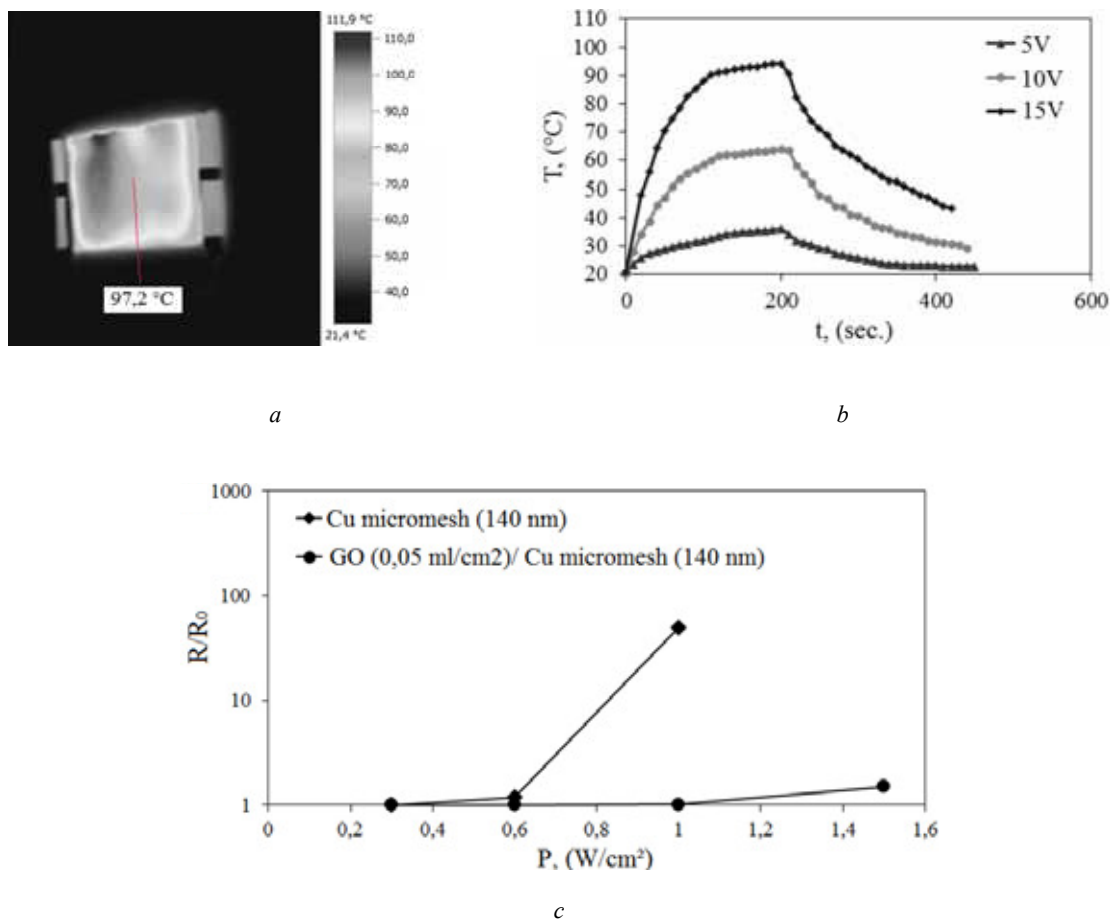


Fig. 5. Thermogram of the coating of the GO / Cu micromesh (140 nm) at the voltage of 15 V and dissipated power of  $0.6 \text{ W/cm}^2$  (*a*); temperature profiles of the composite coating at the different dissipated power (*b*); the stability of coatings at critical values of the power dissipated (*c*)

Рис. 5. Термограмма покрытия ОГ / Cu-микросетка (140 нм) при напряжении 15 В и рассеиваемой мощности  $0,6 \text{ Вт/см}^2$  (*a*); температурные профили композиционного покрытия при различной рассеиваемой мощности (*б*); стабильность покрытий при критических значениях рассеиваемой мощности (*в*)

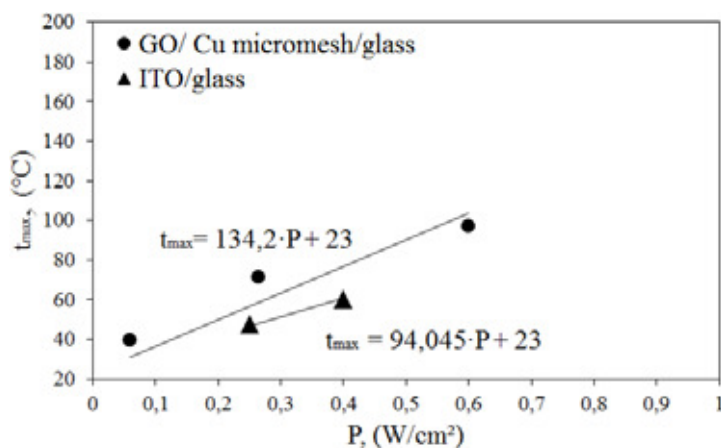


Fig. 6. Comparative efficiency of a composite coating with a literature ITO on an equivalent substrate [17]

Рис. 6. Сравнительная эффективность композиционного покрытия с литературным ITO на эквивалентной подложке [17]

The disadvantages of mesh coatings include extensive areas with low thermal conductivity (mesh cells), as a result of which certain areas of the coating can significantly overheat. In this context, it is interesting to consider the possibility of the reduction of graphene oxide having a thermal conductivity in thin films of  $> 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , which will allow a more even distribution of heat in space unoccupied by metal. An example of such a composite was proposed in [19].

**Conclusion.** The results of the study of a new approach to the formation of transparent heaters with enhanced performance characteristics with respect to classical solutions based on oxide films are presented. The composite coating is a copper micromesh, obtained using a self-organized template stabilized with graphene oxide. A composite coating with the surface resistance of  $8.9 \text{ Ohm/sq}$  was obtained with the transparency of 82.8 %.

High uniformity of heating and stability of the composite coating are shown when operating under heating up to  $97.2^\circ\text{C}$  for a long time (24 hours). Composite transparent heaters of GO / Cu micromesh demonstrate higher efficiency relative to common transparent heaters based on ITO. The composite GO / Cu micromesh coating on a glass substrate, 2 mm thick, is characterized by the thermal resistance value of  $134.2^\circ\text{C}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{W}^{-1}$ , while the ITO literary sample on an equivalent substrate is characterized by the thermal resistance of  $94.04^\circ\text{C}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{W}^{-1}$ . This fact opens up prospects for the use of the composite GO / Cu micromesh coating as a transparent anti-icing coating in aerospace industry.

**Acknowledgments.** This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project «mol\_a» № 18-38-00852.

**Благодарности.** Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект «мол\_а» № 18-38-00852.

## References

1. Im K., Cho K., Kim J. et al. Transparent heaters based on solution-processed indium tin oxide nanoparticles. *Thin Solid Films*. 2010, Vol. 518, P. 3960–3963.

2. Kim C., Park J.-W., Kim J. et al. A highly efficient indium tin oxide nanoparticles (ITO-NPs) transparent heater based on solution-process optimized with oxygen vacancy control. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017, Vol. 726, P. 712–719.

3. Hudaya C. Park J. H., Choi W. et al. Characteristics of fluorine-doped tin oxide as a transparent heater on PET prepared by ECR-MOCVD. *ECS Trans.* 2013, Vol. 53, P. 161–166.

4. Ashida T., Miyamura A., Oka N. et al. Thermal transport properties of polycrystalline tin-doped indium oxide films. *Journal of Applied Physics*. 2009, Vol. 105, P. 073709.

5. Gupta R., Rao K. D. M., Kiruthika S. et al. Visibly transparent heaters. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2016, Vol. 8, No. 20, P. 12559–12575.

6. Kim T.Y., Kim Y. W., Lee H. S. et al. Uniformly interconnected silver-nanowire networks for transparent film heaters. *Adv. Funct. Mater.* 2013, Vol. 23, P. 1250–1255.

7. Zhai H., Wang R., X. Wang et al. Transparent heaters based on highly stable Cu nanowire films. *Nano Research*. 2016, Vol. 9, No. 12, P. 3924–3936.

8. Kim H.-J., Kim Y., Jeong J.-H. et al. A cupronickel-based micromesh film for use as a high-performance and low-voltage transparent Heater. *J. Mater. Chem. A*. 2015, Vol. 3, P. 16621–16626.

9. Kwon N., Kim K., Heo J. et al. Study on Ag mesh/conductive oxide hybrid transparent electrode for film heaters. *Nanotechnology*. 2014, Vol. 25, No. 26, P. 5702–5712.

10. Lordan D., Burke M., Manning M. et al. Asymmetric pentagonal metal meshes for flexible transparent electrodes and heaters. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2017, Vol. 9, No. 5, P. 4932–4940.

11. Celle C., Cabos A., Fontecave T. et al. Oxidation of copper nanowire based transparent electrodes in ambient conditions and their stabilization by encapsulation: application to transparent film heaters. *Nanotechnology*. 2018, Vol. 29, No. 08, P. 5701–5710.



12. Khartov S. V., Simunin M. M., Voronin A. S. et al. *Setchataya mikro i nanostruktura v chastnosti dlya opticheski prozrachnykh provodyaschikh pokritii i sposob ee polucheniya* [A micro- and nanostructure mesh, in particular for optically transparent conductive coatings, and a method for producing it]. Patent RF no. 2574249, 2016.
13. Voronin A. S. *Formirovanie serebryanikh mikrosetchatykh prozrachnykh provodyaschikh pokritii pri pomoshchi samoorganizovannykh shablonov i kompoziti na ih osnove. Dis. kand. tehn. nauk.* [Formation of silver micromesh transparent conductive coatings using self-organized templates and composites based on them. PhD. Diss.]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2017, 182 p.
14. Routh A. F. Drying of thin colloidal films. *Rep. Prog. Phys.* 2013, Vol. 76, No. 4, P. 6603–6633.
15. Eda G., Chhowalla M. Chemically derived graphene oxide: towards large-area thin-film electronics and optoelectronics. *Adv. Mater.* 2010, Vol. 22, No. 22, P. 2392–2415.
16. Giannouri M., Bidikoudi M., Pastrana-Martinez L. M. et al. Reduced graphene oxide catalysts for efficient regeneration of cobalt-based redox electrolytes in dye-sensitized solar cells. *Electrochimica Acta.* 2016, Vol. 219, P. 258–266.
17. Ji S., He W., Wang K. et al. Thermal response of transparent silver nanowire/PEDOT: PSS film heaters. *Small.* 2014, Vol. 10, No. 23, P. 4951–4960.
18. Xu X., Wu T., Xia F. et al. Redox reaction between graphene oxide and In powder to prepare In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/reduced graphene oxide hybrids for supercapacitors. *Journal of Power Sources.* 2014, Vol. 266, P. 282–290.
19. Voronin A. S., Ivanchenko F. S., Simunin M. M. et al. High performance hybrid rGO/ Ag quasi-periodic mesh transparent electrodes for flexible electrochromic devices. *Appl. Surf. Sci.* 2016, Vol. 364, P. 931–937.
6. Uniformly interconnected silver-nanowire networks for transparent film heaters / T. Y. Kim [et al.] // *Adv. Funct. Mater.* 2013. Vol. 23. P. 1250–1255.
7. Transparent heaters based on highly stable Cu nanowire films / H. Zhai [et al.] // *Nano Research.* 2016. Vol. 9, №. 12. P. 3924–3936.
8. A cupronickel-based micromesh film for use as a high-performance and low-voltage transparent Heater / H.-J. Kim [et al.] // *J. Mater. Chem. A.* 2015. Vol. 3. P. 16621–16626.
9. Study on Ag mesh/conductive oxide hybrid transparent electrode for film heaters / N. Kwon [et al.] // *Nanotechnology.* 2014. Vol. 25, № 26. P. 5702–5712.
10. Asymmetric pentagonal metal meshes for flexible transparent electrodes and heaters / D. Lordan [et al.] // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2017. Vol. 9, №. 5. P. 4932–4940.
11. Oxidation of copper nanowire based transparent electrodes in ambient conditions and their stabilization by encapsulation: application to transparent film heaters / C. Celle [et al.] // *Nanotechnology.* 2018. Vol. 29, № 08. P. 5701–5710.
12. Пат. № 2574249 Российская Федерация. Сетчатая микро- и наноструктура, в частности для оптически прозрачных проводящих покрытий, и способ ее получения / Хартов С. В., Симунин М. М., Воронин А. С. и др. № 2013141222 ; заявл. 09.09.2013 ; опубл. 10.02.2016.
13. Воронин А. С. Формирование серебряных микросетчатых прозрачных проводящих покрытий при помощи самоорганизованных шаблонов и композиты на их основе : дис. ... канд. техн. наук / СФУ. Красноярск, 2017. 182 с.
14. Routh A. F. Drying of thin colloidal films // *Rep. Prog. Phys.* 2013. Vol. 76, № 4. P. 6603–6633.
15. Eda G., Chhowalla M. Chemically derived graphene oxide: towards large-area thin-film electronics and optoelectronics // *Adv. Mater.* 2010. Vol. 22, № 22. P. 2392–2415.
16. Reduced graphene oxide catalysts for efficient regeneration of cobalt-based redox electrolytes in dye-sensitized solar cells / M. Giannouri [et al.] // *Electrochimica Acta.* 2016. Vol. 219. P. 258–266.
17. Thermal response of transparent silver nanowire/PEDOT:PSS film heaters / Ji S. [et al.] // *Small.* 2014. Vol. 10, №. 23. P. 4951–4960.
18. Redox reaction between graphene oxide and In powder to prepare In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/reduced graphene oxide hybrids for supercapacitors / X. Xu [et al.] // *Journal of Power Sources.* 2014. Vol. 266. P. 282–290.
19. High performance hybrid rGO/ Ag quasi-periodic mesh transparent electrodes for flexible electrochromic devices / A. S. Voronin [et al.] // *Appl. Surf. Sci.* 2016. Vol. 364. P. 931–937.

#### Библиографические ссылки

© Voronin A. S., Fadeev Yu. V., Ivanchenko F. S., Nemtsev I. V., Khartov S. V., 2018

УДК 62-533.7

Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-668-676

**Для цитирования:** Ереско С. П., Ереско Т. Т., Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А. Совершенствование методики расчета угла закручивания карданной передачи с использованием теоретических и экспериментальных исследований // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 4. С. 668–676. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-668-676

**For citation:** Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V., Menovshikov V. A. [Improvement of the method of calculating the universal joints transmission angle with the use of theoretical and experimental studies]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 4, P. 668–676 (In Russ.). Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-668-676

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА УГЛА ЗАКРУЧИВАНИЯ КАРДАННОЙ ПЕРЕДАЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

С. П. Ереско, Т. Т. Ереско, Е. В. Кукушкин\*, В. А. Меновщиков

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

\*E-mail: ironjeck@mail.ru

Предложена методика совершенствования расчета угла закручивания карданного вала карданной передачи. Предложена конструкция стенда для проведения испытаний карданных передач, включающая в себя электродвигатель, выходной вал которого соединен с входным валом механической коробки переключения передач, соединенной выходным валом с входным валом испытываемой карданной передачи, установленными на раме. Выходной вал карданной передачи соединен с входным валом раздаточного редуктора, установленного на дополнительной раме вместе с устройством нагружения, которое выполнено гидравлическим и представляет собой гидравлический насос, вал которого присоединен к выходному валу раздаточного редуктора. Входной канал гидравлического насоса соединен с гидравлическим баком с рабочей жидкостью, а его выходной канал присоединен к входному каналу дросселя, регулирующему нагрузку. Между дросселем и гидравлическим насосом установлен манометр, отградуированный в единицах тормозного момента, и предохранительный клапан для выпуска избыточного давления в гидравлический бак. Выходной канал дросселя подсоединен к гидравлическому баку через теплообменник. Предохранительный клапан подключен электрически к электроконтактному манометру, который включен в электрическую сеть и представляет собой электромагнитный клапан постоянного тока. Приведены результаты испытания карданных передач на четырех режимах работы, характеризующих переменными значениями крутящего и тормозного моментов и изменением конструктивных параметров карданной передачи в каждом опыте. Получено уравнение линейной регрессионной зависимости угла закручивания карданного вала от следующих факторов: длина карданной передачи; угол излома карданной передачи; мощность электродвигателя; частота вращения двигателя; усилие торможения от давления гидравлической жидкости. Найдены границы доверительных интервалов углов закручивания карданной передачи. Достоверность и адекватность полученных теоретических результатов подтверждаются экспериментальными исследованиями, проведенными на стенде при аналогичных данных теоретических исследований.

**Ключевые слова:** измерительная система, испытательный стенд, карданная передача, погрешность измерений, погрешность эксперимента.

## IMPROVEMENT OF THE METHOD OF CALCULATING THE UNIVERSAL JOINTS TRANSMISSION ANGLE WITH THE USE OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES

S. P. Eresko, T. T. Eresko, E. V. Kukushkin\*, V. A. Menovshikov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: ironjeck@mail.ru

A technique for improving the calculation of the angle of twisting of a universal joint shaft. The design of the stand for testing universal joint gears is proposed, which includes an electric motor whose output shaft is connected to the input shaft by a mechanical gearbox connected by an output shaft to an input shaft tested by cardan gear mounted on the frame. The output shaft of the universal joint gear is connected to the input shaft of the gear reducer mounted on the additional frame together with a loading device which is hydraulic and is a hydraulic pump whose shaft is connected to

*the output shaft of the dispensing gear. The input channel of the hydraulic pump is connected to the hydraulic tank with the working fluid, and its output channel is connected to the input channel of the throttle, which regulates the load. Between the throttle and the hydraulic pump is installed a pressure gauge calibrated in units of braking torque and a safety valve for discharging excess pressure into the hydraulic tank. The output channel of the throttle is connected to the hydraulic tank through the heat exchanger. The safety valve is electrically connected to an electrocontact manometer that is connected to the electrical network and is a DC solenoid valve. The results of the tests of universal joints gears in four modes of operation, characterized by varying values of the torque and braking moment and changing the design parameters of the universal joints transmission in each experiment. The equation of linear regression dependence of the twist angle of the universal joints shaft on the factors: the length of the universal joints gear; angle of kink in universal joints transmission; electric motor power; engine speed; braking force from the hydraulic fluid pressure. The boundaries of the confidence intervals of the angles of twisting of the universal joints transmission are found. The reliability and adequacy of the results of theoretical studies is confirmed by experimental studies carried out at the stand with similar theoretical data.*

*Keywords: measuring system, test bench, universal joint, measurement error, experimental error.*

**Введение.** Исследования по работе карданных передач разделяются на два направления: динамика и кинематика карданных передач. Основополагающими работами по кинематике и динамике карданных передач являются работы Е. А. Чудакова [1], М. И. Лысова [2; 3], Я. Э. Малаховского [4], И. С. Цитовича [5; 6], С. А. Лапшина [7–9], С. Н. Иванова [10–13] и других авторов [14; 15]. Исследования кинематики карданных передач позволили установить, что в одношарнирной передаче при вращении ведущего вала с постоянной угловой скоростью ведомый вал будет вращаться неравномерно с переменной угловой скоростью, при этом коэффициент неравномерности вращения является функцией угла наклона трубы кардана. Трудом Е. А. Чудакова, И. С. Цитовича и др. было показано, что карданные передачи требуют как кинематических, так и динамических расчетов.

Наиболее перспективными направлениями повышения надежности карданных передач транспортно-технологических машин является совершенствование и модернизация элементов конструкции с целью повышения долговечности, безотказности и ремонтно-пригодности элементов, разработка прогрессивных технологий, основанных на рациональных способах технического обслуживания и ремонта, разработка технических средств и методик испытаний [16].

**Постановка задачи.** Задача исследований заключается в совершенствовании методики расчета угла закручивания карданной передачи с использованием теоретических и экспериментальных исследований, а для этого необходимо провести испытания карданных передач на четырех режимах работы, характеризующихся переменными значениями крутящего и тормозного моментов и изменением конструктивных параметров карданной передачи в каждом опыте, провести расчет погрешностей эксперимента.

**Описание оборудования.** Для испытания карданных передач был разработан и изготовлен испытательный стенд [17; 18] для испытаний карданных передач на игольчатых подшипниках (рис. 1), включающий в себя электродвигатель 1, выходной вал которого соединен с входным валом механической коробкой переключения передач 2, соединенной выходным валом с входным валом испытываемой карданной передачи 3, установленными на раме 4.

Выходной вал карданной передачи 3 соединен с входным валом раздаточного редуктора 5, установленного на дополнительной раме 6 вместе с устройством нагружения, которое выполнено гидравлическим и представляет собой гидравлический насос 7, вал которого присоединен к выходному валу раздаточного редуктора 5. Входной канал гидравлического насоса 7 соединен с гидравлическим баком 8 с рабочей жидкостью, а его выходной канал присоединен к входному каналу дросселя 9, регулирующему нагрузку. Между дросселем и гидравлическим насосом установлен манометр 10, отградуированный в единицах тормозного момента, и предохранительный клапан 11 для выпуска избыточного давления в гидравлический бак 8. Выходной канал дросселя подсоединен к гидравлическому баку через теплообменник 12. Предохранительный клапан 11 подключен электрически к электроконтактному манометру, который включен в электрическую сеть и представляет собой электромагнитный клапан постоянного тока.

Согласно поставленной задаче исследований была разработана система измерения [19; 20] контролируемых параметров, которая включает в себя настройку угла излома карданного вала и длину карданной передачи [21], настройку и тарирование манометра гидравлического устройства нагружения [22] и измерительную систему цифрового типа с передачей данных измерений на ПК.

Щит электроуправления подключен к сети питания кабелем 15, система охлаждения подключена шлангами 16 к водопроводу и канализации, гидравлическая система подключена к гидронасосу рукавами высокого давления 17. Система автоматизированного управления стенда работает следующим образом: (рис. 2, 3) вращающий момент от электродвигателя передается на испытываемую карданную передачу, гидронасос при этом передает испытываемой карданной передаче тормозной момент, создаваемый дросселем с регулирующим элементом, соединенным с приводом управления положением регулирующего элемента дросселя. Если происходит нагрев рабочей жидкости, которая при этом расширяется, включается привод управления положением регулирующего элемента дросселя с помощью поступившего в элемент сравнения 14 электрического сигнала с датчика давления 17 и в автоматическом режиме регулирует

дроссель, уравнивая давление рабочей жидкости до заданного параметра. В случае перегрева рабочей жидкости включается привод управления положением регулирующего элемента термклапана 19 с помощью электрического сигнала, поступающего в элемент сравнения 14 с датчика температуры 18, который на-

правляет поток рабочей жидкости через теплообменник. При избытке рабочего давления включается предохранительный клапан для предупреждения скачка заданного давления рабочей жидкости в гидравлической системе, который выпускает избыточное давление в гидравлический бак.

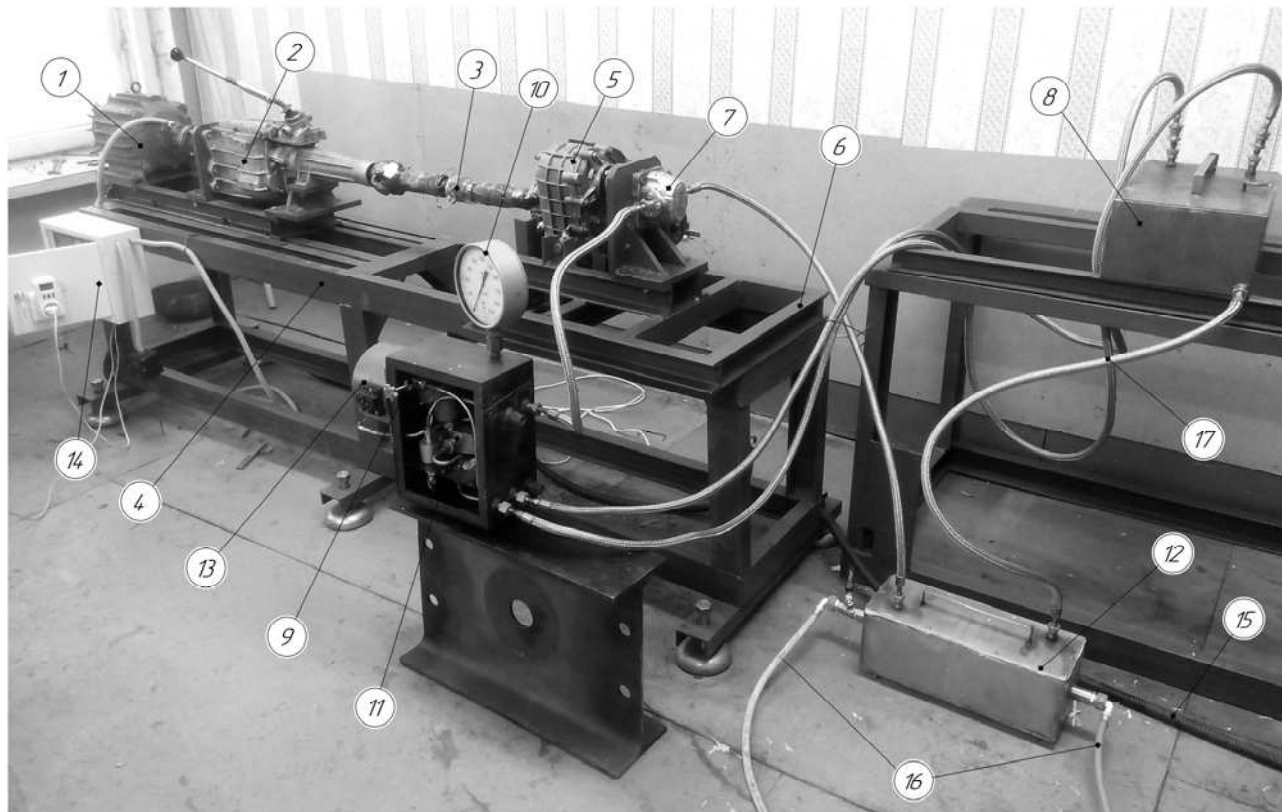


Рис. 1. Стенд для испытания карданных шарниров на игольчатых подшипниках

Fig. 1. Stand for testing universal joints on needle bearings

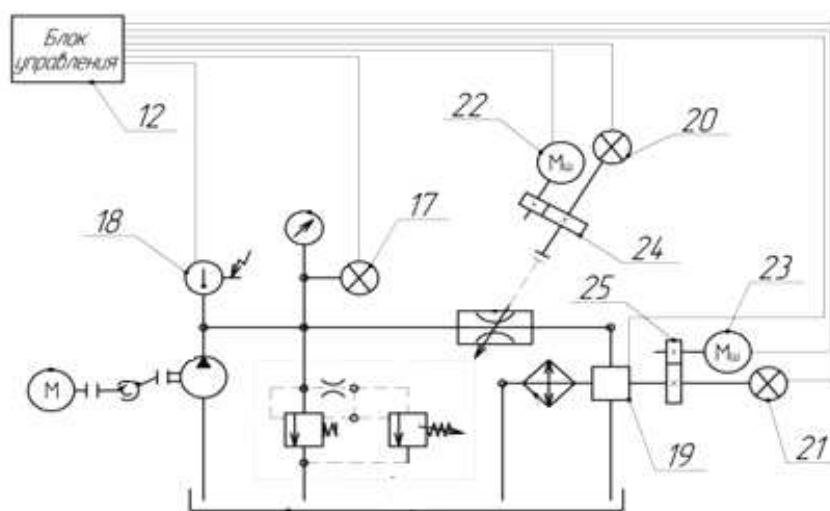


Рис. 2. Система автоматизированного управления гидравлического устройства

Fig. 2. Hydraulic device automated control system

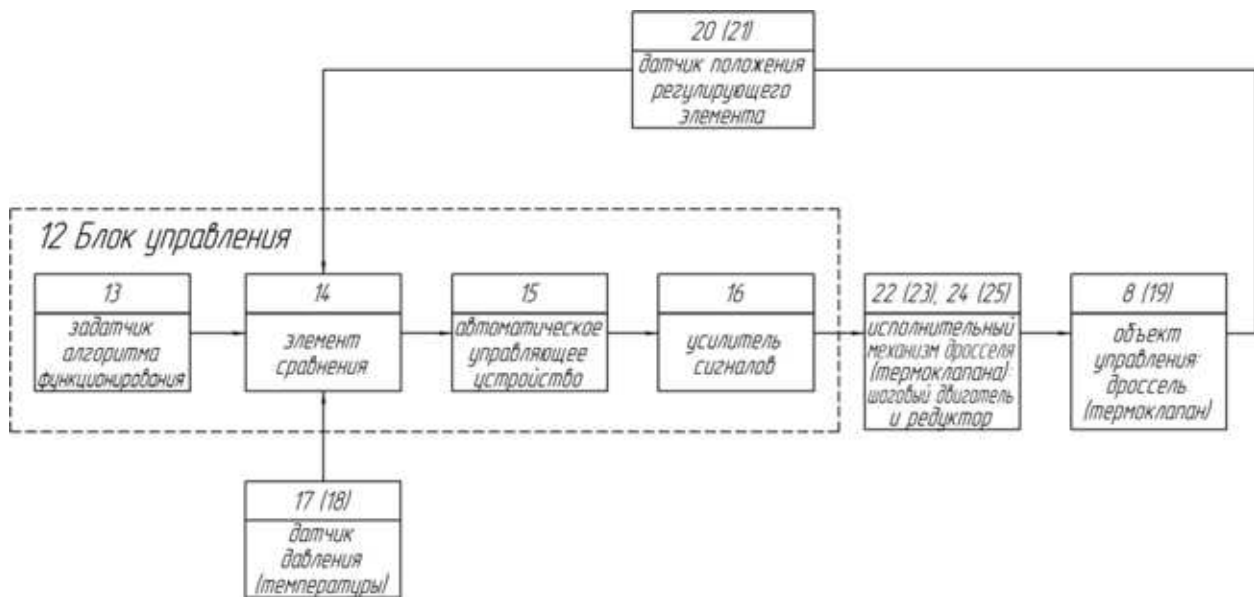


Рис. 3. Схема автоматизированного управления стэнда

Fig. 3. Scheme of automated control of the stand

Регулирование давления обеспечивается следующим образом: с датчика давления 17 поступает электрический сигнал на элемент сравнения 14, который сравнивает электрические сигналы с задатчика алгоритма функционирования 13 и датчика положения регулирующего элемента дросселя 20, далее вырабатывается электрический сигнал рассогласования, поступающий на автоматическое управляющее устройство 15, после которого электрический сигнал усиливается усилителем сигналов 16 и отправляется на исполнительный механизм дросселя: шаговый двигатель 22 и редуктор 24, которые в зависимости от полярности сигнала рассогласования приводят в движение объект управления – дроссель, связанный с датчиком положения регулирующего элемента дросселя 20, сигнал с которого возвращается на элемент сравнения 14. При достижении равенства сигналов с задатчика алгоритма функционирования 13, датчика давления 17 и датчика положения регулирующего элемента дросселя 20, исполнительный механизм дросселя – шаговый двигатель 22 и редуктор 24 останавливаются.

Регулирование температуры рабочей жидкости обеспечивается следующим образом: с датчика температуры 18 поступает электрический сигнал на элемент сравнения 14, который сравнивает электрические сигналы с задатчика алгоритма функционирования 13 и датчика положения регулирующего элемента термоклапана 21, далее вырабатывается электрический сигнал рассогласования, поступающий на автоматическое управляющее устройство 15, после которого электрический сигнал усиливается усилителем сигналов 16 и отправляется на исполнительный механизм термоклапана 19: шаговый двигатель 23 и редуктор 25, которые в зависимости от полярности сигнала рассогласования приводят в движение объект управления – термоклапан 19, связанный с датчиком поло-

жения регулирующего элемента термоклапана 21, сигнал с которого возвращается на элемент сравнения 14. При достижении равенства сигналов с задатчика алгоритма функционирования 13, датчика температуры 18 и датчика положения регулирующего элемента термоклапана 21, исполнительный механизм термоклапана 19 – шаговый двигатель 23 и редуктор 25 останавливаются [22–27].

**Основная часть.** При постановке эксперимента [28] использовался план факторного эксперимента  $N = 4^{5-2}$ , факторами которого являются длина карданной передачи ( $L$ , мм), угол излома карданной передачи ( $\gamma$ , град), мощность электродвигателя ( $N$ , Вт), частота вращения двигателя ( $n$ , мин<sup>-1</sup>), усилие торможения от давления гидравлической жидкости ( $P$ , Нм). В качестве параметра оптимизации  $Y$  выбираем величину закручивания карданного вала ( $Y$ , Нм).

Под действием тормозного момента в карданной передаче возникает упругая деформация кручения, способствующая возникновению и росту деформации кручения, выраженной суммарным углом закручивания карданной передачи  $Y$ . На вычисления и измерение данного угла влияют погрешности изготовления отдельных деталей конструкции карданной передачи, температура, различная жесткость отдельных элементов конструкции карданной передачи, а также люфты и зазоры в соединениях.

Испытания карданных передач выполняли на четырех режимах работы, характеризующихся переменными значениями крутящего и тормозного моментов и изменением конструктивных параметров карданной передачи в каждом опыте. Обработку полученных экспериментальных данных производили с помощью программного продукта для ЭВМ EREGRE [29]. Для обработки результатов испытаний применена методика статистической обработки результатов испытаний с применением правила «трёх сигм». Правило «трёх



сигм», или эмпирическое правило, утверждает, что для нормального распределения есть вероятность того, что  $\sigma$  принимает значения, отличающиеся от математического ожидания не более чем на три среднеквадратических отклонения.

**Результаты исследования.** В результате проведения эксперимента получим уравнение линейной математической модели:

$$y = -4,1548 - 0,1151x_1 + 0,0018x_2 + 0,9862x_3 - 0,0003x_4 + 2,3444x_5. \quad (1)$$

Для обработки полученных значений необходимо выполнить расчет нагрузок. Определим крутящий момент электродвигателя (Нм) по формуле [30; 31]

$$T_{\text{дв}} = \frac{9550 \cdot N}{n}, \quad (2)$$

где  $N$  – мощность двигателя, кВт;  $n$  – частота вращения двигателя,  $\text{мин}^{-1}$ .

Угловую скорость карданной передачи определим по формуле ( $\text{сек}^{-1}$ )

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}. \quad (3)$$

Определим вращающий момент, передаваемый карданной передаче (Нм):

$$T = T_{\text{дв}} \cdot i, \quad (4)$$

где  $i$  – передаточное число.

Угол закручивания карданного вала определим для каждого участка карданного вала по формуле

$$\theta = \frac{T \cdot L_i \cdot 180 \cdot k_d}{J_p \cdot G \cdot \pi}, \quad (5)$$

где  $L_i$  – длина карданного вала, мм;  $k_d$  – поправочный коэффициент, равен 0,96 по результатам эксплуатации;  $J_p$  – полярный момент инерции карданного вала,  $\text{мм}^4$ ;  $G$  – модуль упругости при кручении, равный  $8,5 \cdot 10^4$  МПа.

Получаем график значений углов закручивания карданного вала (рис. 4).

При всех значениях величины закручивания карданного вала, для которых проводилось измерение параметров, проводим статистическую обработку по оценке средних значений параметров  $m_q(D_j)$  и их среднеквадратических отклонений  $\sigma_q(D_j)$ . Результаты статистической обработки результатов испытаний представлены на рис. 5.

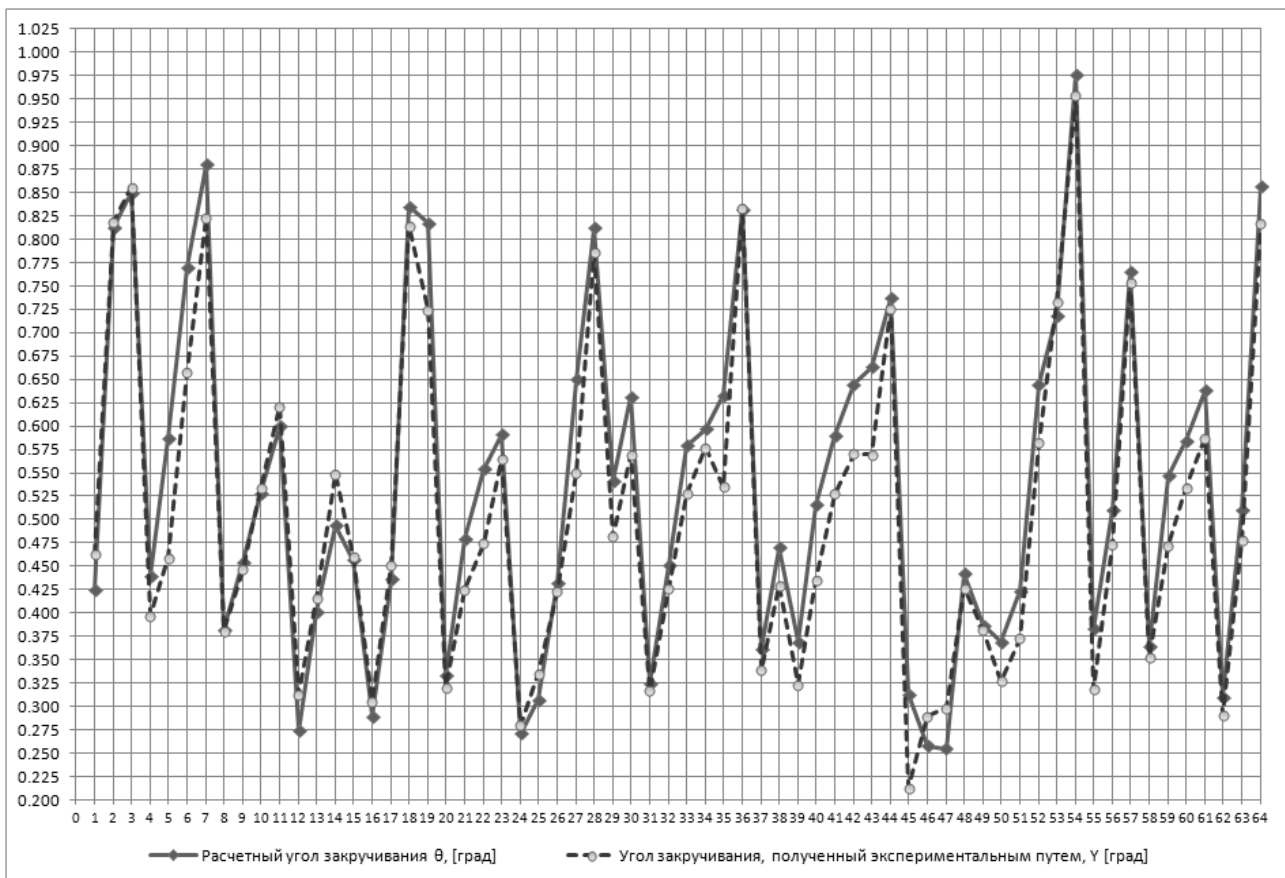


Рис. 4. График значений углов закручивания карданного вала

Fig. 4. Graph of the values of the angles of shaft tightening

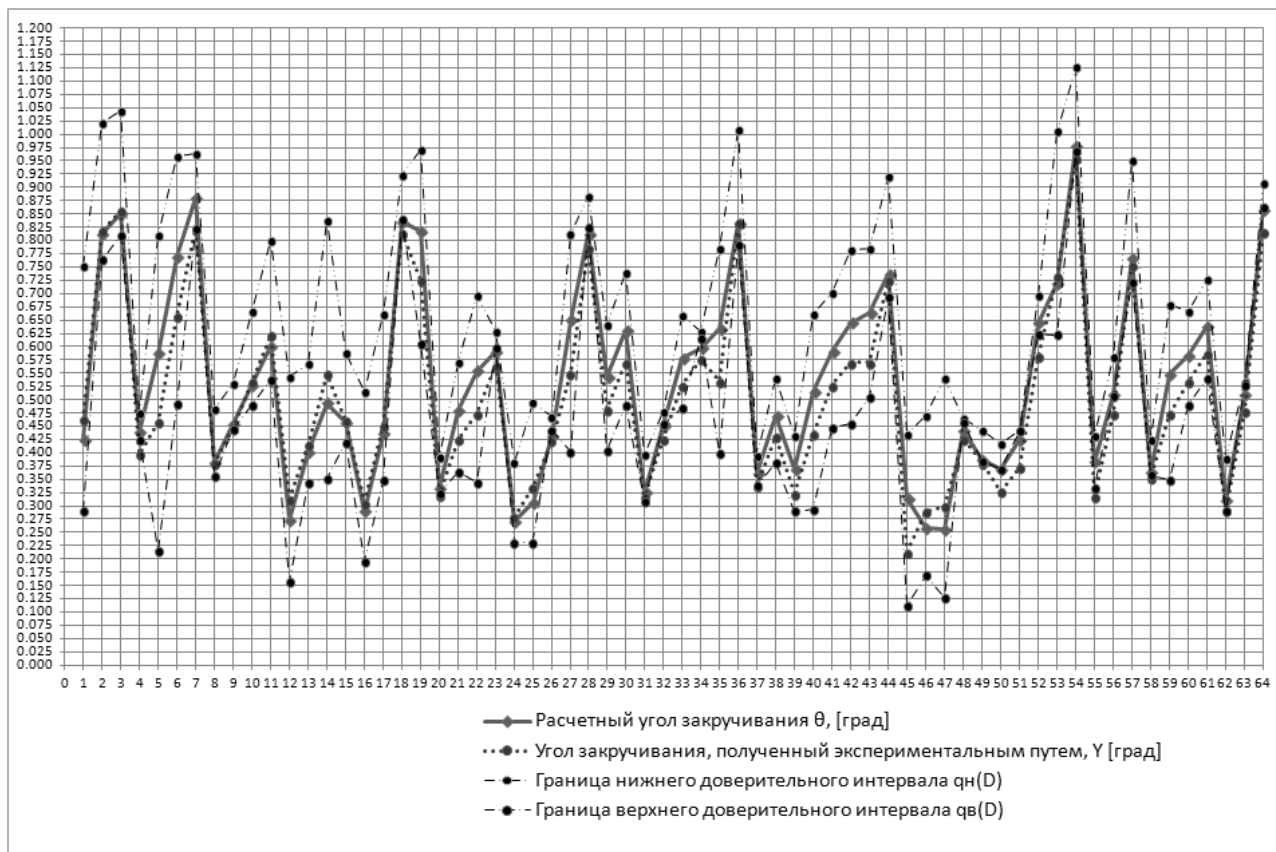


Рис. 5. График результатов статистической обработки параметра углов закручивания карданного вала

Fig. 5. Graph of the results of static processing of the parameters of the angles of spiral shaft

**Закключение.** Приведены результаты испытания карданных передач на четырех режимах работы, характеризующих переменными значениями крутящего и тормозного моментов и изменением конструктивных параметров карданной передачи в каждом опыте. Получено уравнение линейной регрессионной зависимости угла закручивания карданного вала от следующих факторов: длина карданной передачи; угол излома карданной передачи; мощность электродвигателя; частота вращения двигателя; усилие торможения от давления гидравлической жидкости. В результате выполненных расчетов и проведенных исследований усовершенствована методика расчета карданных передач на игольчатых подшипниках, введен поправочный коэффициент в расчет угла закручивания карданного вала, значение которого получено по результатам экспериментальных исследований.

Достоверность и адекватность полученных теоретических результатов [32–36] подтверждается экспериментальными исследованиями, проведенными на стенде при аналогичных данных теоретических исследований.

#### Библиографические ссылки

1. Чудаков Е. А. Расчет автомобиля. М. : Машгиз, 1947. 450 с.
2. Лысов М. И. Карданные механизмы. М. : ОНТИ, 1945. 280 с.
3. Лысов М. И. Карданные передачи автомобиля. М. : Машгиз, 1961. 320 с.
4. Малаховский Н. Э. Карданные передачи. М. : Машгиз, 1952. 220 с.
5. Цитович И. С. Исследование кинематики и динамики карданной передачи автомобиля : дис. ... канд. техн. наук. М., 1948. 147 с.
6. Цитович И. С., Альгин В. Б. Динамика автомобиля. Минск : Наука и техника, 1981. 107 с.
7. Лапшин С. А. Некоторые нагрузки в трансмиссии автомобиля, вызванные работой карданной передачи // Труды НАМИ. 1965. Вып. 72. 60 с.
8. Лапшин С. А. Основные направления повышения долговечности карданных передач тракторов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1976. 33 с.
9. Лапшин С. А., Борисов С. Г. Пути повышения долговечности карданных передач тракторов // Тракторы и сельхозмашины. 1971. № 4. С. 15–17.
10. Пути совершенствования конструкции карданной передачи / Ю. К. Есеновский-Лашков [и др.] // Автомобильная промышленность. 1974. № 7. С. 17–19.
11. Зельцер Е. А., Иванов С. Н. К вопросу снижения динамической нагруженности трансмиссии автомобиля // Автомобильная промышленность. 1981. № 4. С. 17–18.
12. Иванов С. Н. Некоторые результаты исследования крутильных колебаний в трансмиссии автомо-

биля «Запорожец» // Труды НАШ. 1965. № 1972. С. 78–80.

13. Иванов С. Н. Влияние колебаний карданной передачи на крутильные колебания в трансмиссии // Труды НАШ. 1965. № 72. С. 116–119.

14. Куликовская Н. М., Яковлев А. И. К расчету осевых сил карданного вала // Автомобильная промышленность. 1958. № 8. С. 10–12.

15. Красников О. К. Исследование крутильных колебаний систем с одношарнирными карданными передачами // Газодинамика двигателей, динамика и прочность машин. Пермь, 1967. С. 10–12.

16. Пастухов А. Г. Повышение надежности карданных передач трансмиссий сельскохозяйственной техники : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.03. М., 2008. 399 с.

17. Конструкция стенда для проведения испытаний карданных шарниров на игольчатых подшипниках в широком диапазоне размеров с изменением угла излома карданной передачи / Е. В. Кукушкин [и др.] // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2016. № 2. С. 58–73. DOI: 10.15593/24111678/2016.02.05.

18. Расчет гидравлической системы тормозного устройства стенда для испытания трансмиссий транспортно-технологических машин / А. С. Ереско [и др.] // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2016. № 4. С. 60–79. DOI: 10.15593/24111678/2016.04.06.

19. Ереско Т. Т., Кукушкин Е. В., Орлов А. А. Разработка измерительной системы стенда для испытания карданных передач // Решетневские чтения : материалы XXI Междунар. науч. конф. / СибГУ им. акад. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2017. С. 559–561.

20. Разработка модуля измерения деформаций с помощью тензорезисторов с использованием arduino / А. С. Ереско [и др.] // Механика XXI века. Братск : БрГУ, 2017. С. 82–85.

21. Ереско Т. Т., Кукушкин Е. В., Орлов А. А. Тензометрические измерения деформаций карданных передач на испытательном стенде // Решетневские чтения : материалы XXI Междунар. науч. конф. / СибГУ им. акад. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2017. С. 562–564.

22. Определение динамических параметров привода экспериментального стенда для исследования карданных передач / А. В. Стручков [и др.] // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17, № 3. С. 638–644.

23. Пат. 2649601 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G 01 N 13/00. Стенд для испытания карданных передач / Ереско С. П., Ереско А. С., Ереско Т. Т., Ереско В. С., Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А., Орлов А. А., Хоменко И. И. № 2016140015 ; заявл. 11.10.2016 ; опубл. 04.04.2018, Бюл. № 10. 10 с.

24. Ереско С. П., Ереско Т. Т., Кукушкин Е. В. Система автоматического регулирования гидравлического тормозного устройства стенда для испытания карданных передач // Решетневские чтения : материалы XXII Междунар. науч. конф. / СибГУ им. акад. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2018. С. 481–483.

25. Gumarova A. A., Kukushkin E. V. Automated control system for hydraulic test loading unit // Journal of

Advanced Research in Technical Science. 2018. No. 11. P. 5–9.

26. Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V. Method of preparation of the experiment for investigation of universal joints on needle bearings // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 1. С. 120–136.

27. Сравнительный анализ конструкций испытательных стендов для испытания карданных шарниров / С. П. Ереско [и др.] // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 902–909.

28. Планирование эксперимента по исследованию карданных передач на игольчатых подшипниках / С. П. Ереско [и др.] // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17, № 4. С. 1062–1071.

29. Регрессионный анализ многофакторных экспериментальных исследований (EREGRE) : свид. об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2004610534 (РФ) / Ереско С. П. Заявл. 24.12.2003, № 2003612713 ; зарег. Роспатент 24.02.2004.

30. Ереско С. П., Ереско Т. Т., Кукушкин Е. В. Совершенствование методики расчета угла закручивания карданной передачи // Решетневские чтения : материалы XXI Междунар. науч. конф. / СибГУ им. акад. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2017. С. 564–567.

31. Совершенствование методики расчета коэффициента полезного действия карданной передачи с целью оптимизации ее конструктивных и эксплуатационных параметров / А. С. Ереско [и др.] // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2017. № 3. С. 25–45. DOI: 10.15593/24111678/2017.03.02.

32. Повышение долговечности карданной передачи за счет совершенствования конструкции карданного шарнира и способа его технического обслуживания / С. П. Ереско [и др.] // Строительные и дорожные машины. 2018. № 1. С. 45–51.

33. Влияние вибрационных нагрузок на процесс перекося тел качения в игольчатом подшипнике карданного шарнира / С. П. Ереско [и др.] // Вестник машиностроения. 2018. № 5. С. 10–15.

34. Повышение долговечности подшипников карданного шарнира неравных угловых скоростей / С. П. Ереско [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 2. С. 19–24. DOI: 10.18324/2077-5415-2018-2-19-24.

35. Influence of Vibrational Loads on Needle Skew in Cardan-Joint Bearings / S. P. Eresko [et al.] // Russian Engineering Research. 2018. Vol. 38, No. 9. P. 651–655. DOI: 10.3103/S1068798X18090125.

36. Кукушкин Е. В. Совершенствование конструкции и методов проектирования карданных передач с шарнирами неравных угловых скоростей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13. Братск, 2018. 18 с.

## References

1. Chudakov E. A. *Raschet avtomobilya* [Vehicle Calculation]. Moscow, MASHGIZ Publ., 1947, 450 p.
2. Lysov M. I. *Kardannyye mekhanizmy* [Universal joints mechanisms]. Moscow, ONTI Publ., 1945, 280 p.
3. Lysov M. I. *Kardannyye peredachi avtomobilya* [Universal joints transmission car]. Moscow, MASHGIZ Publ., 1961, 320 p.



4. Malakhovskiy N. E. *Kardannye peredachi* [Universal joints]. Moscow, MASHGIZ Publ., 1952, 220 p.
5. Tsitovich I. S. *Issledovanie kinematiki i dinamiki kardannoy peredachi avtomobilya. Doct. Diss.* [Study of kinematics and dynamics of universal joints transmission of a car. Doct. Diss.]. Moscow, 1948, 147 p.
6. Tsitovich I. S., Al'gin V. B. *Dinamika avtomobilya* [Vehicle Dynamics]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1981, 107 p.
7. Lapshin S. A. [Some loads in the vehicle's transmission caused by the operation of the universal joints gear]. *Trudy NAMI*. 1965, No. 72, 60 p. (In Russ.).
8. Lapshin S. A. *Osnovnye napravleniya povysheniya dolgovechnosti kardannykh peredach traktorov. Doct. Diss.* [The basic directions of increase of durability of universal joints gears of tractors. Doct. Diss.]. Moscow, 1976, 33 p.
9. Lapshin S. A., Borisov S. G. [Ways of increase of durability of universal joints gears of tractors]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 1971, No. 4, P. 15–17 (In Russ.).
10. Esenovskiy-Lashkov Yu. K., Ivanov S. N., Stefanovich Yu. G., Chernyaykin V. A. [Ways of improving the design of the universal joints transmission]. *Avtomobil'naya promyshlennost*. 1974, No. 7, P. 17–19 (In Russ.).
11. Zel'tser E. A., Ivanov S. N. [On the issue of reducing the dynamic load of a car's transmission]. *Avtomobil'naya promyshlennost*. 1981, No. 4, P. 17–18 (In Russ.).
12. Ivanov S. N. [Some results of the investigation of torsional oscillations in the transmission of the Zaporozhets car]. *Trudy NASH*. 1965, Vol. 72, P. 78–80 (In Russ.).
13. Ivanov S. N. [Influence of oscillations of a universal joints transmission on torsional oscillations in transmission]. *Trudy NASH*. 1965, Vol. 72, P. 116–119 (In Russ.).
14. Kulikovskaya N. M., Yakovlev A. I. [To the calculation of the axial forces of the universal joints shaft]. *Avtomobil'naya promyshlennost*. 1958, No. 8, P. 10–12 (In Russ.).
15. Krasnikov O. K. [Investigation of torsional vibrations of systems with single-pivoted universal joints gears]. *Gazodinamika dvigateley, dinamika i prochnost' mashin*. 1967, P. 10–12 (In Russ.).
16. Pastukhov A. G. *Povyshenie nadezhnosti kardannykh peredach transmissiy sel'skokhozyaystvennoy tekhniki. Doct. Diss.* [Increase of reliability of universal joints gears of agricultural machinery transmissions. Doct. Diss.]. Moscow, 2008, 399 p.
17. Kukushkin E. V., Eresko S. P., Eresko T. T., Menovshchikov V. A., Orlov A. A. [Stand construction for testing the universal joint on needle bearings in wide range of sizes with the angle changing driveline]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*. 2016, No. 2, P. 58–73. DOI: 10.15593/24111678/2016.02.05 (In Russ.).
18. Eresko A. S., Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A., Orlov A. A. [Calculation of the hydraulic system of brake device of stand for the test of transmissions of transport-technological machines]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*. 2016, No. 4, P. 60–79. DOI: 10.15593/24111678/2016.04.06 (In Russ.).
19. Eresko T. T., Kukushkin E. V., Orlov A. A. [Development of the measuring system of the stand for testing the universal joint transmissions]. *Materialy XXI mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XXI Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2017, P. 559–561 (In Russ.).
20. Eresko A. S., Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V., Orlov A. A. [Development of strain measurement module using strain gages using arduino]. *Materialy XV Mezhdunar. nauch. konf. "Mechaniki XXI veku"* [Materials Intern. Scientific. Conf "Mechanics of XXI century"]. Bratsk, Bratsk State University Publ., 2017, P. 82–85 (In Russ.).
21. Eresko T. T., Kukushkin E. V., Orlov A. A. [Tensometric measurements of the deformations of universal joint transmissions at the test stand]. *Materialy XXI mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XXI Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2017, P. 562–564 (In Russ.).
22. Struchkov A. V., Kukushkin E. V., Eresko S. P., Eresko T. T. [Determination of dynamic parameters of drive of experimental stand for research of cardan transmissions]. *Vestnik SibGAU*. 2016, No. 17, P. 638–644 (In Russ.).
23. Eresko S. P., Eresko A. S., Eresko T. T., Eresko V. S., Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A., Orlov A. A., Khomenko I. I. *Stend dlya ispitaniy kardanikh peredach* [The test stand driveline]. Patent RF, no. 2649601, 2018.
24. Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V. [Automatic control system of hydraulic brake device stand for testing of universal joint transmissions]. *Materialy XXII mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XXII Intern. Scientific. Conf. "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2018, P. 481–483 (In Russ.).
25. Gumarova A. A., Kukushkin E. V. Automated control system for hydraulic test loading unit. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2018, No. 11, P. 5–9.
26. Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A., Orlov A. A. [Method of preparation of the experiment for investigation of universal joints on needle bearings]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 1, P. 120–136 (In Russ.).
27. Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A., Mikhayev A. E. [Comparative analysis of structures test apparatus for universal joint]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 902–909 (In Russ.).
28. Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A., Khomenko I. I. [Planning of experiment on research of universal joint transmissions on the needle-shaped bearing]. *Vestnik SibGAU*. 2016, No. 17, P. 1062–1071 (In Russ.).
29. Eresko S. P. *Regressivnii analiz mnogoaktornikh eksperimentalnykh issledovaniy (EREGRE)* [Multivariate regression analysis of experimental studies (EREGRE)]. Patent RF, no. 2004610534, 2004.
30. Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V. [Improvement of the method of calculation of universal joint

transfer turning]. *Materialy XXI mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XXI Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2017, P. 564–567 (In Russ.).

31. Eresko A. S., Eresko S. P., Eresko T. T., Ivanenko E. V., Kukushkin E. V. [Perfection of the methodology for calculating the efficiency of the use of universal joint gear in order to optimize its design and operational parameters]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*. 2017, No. 3, P. 25–45. DOI: 10.15593/24111678/2017.03.02 (In Russ.).

32. Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A. [Increasing the durability of the transmission for the account of improving the design of the and the method of its technical service]. *Stroitel'nye i Dorozhnye mashiny*. 2018, No. 1, P. 45–51 (In Russ.).

33. Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A. [Influence on the process vibration loads sag rolling elements in the universal joint]. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2018, No. 5, P. 10–15 (In Russ.).

34. Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V., Kukushkin S. V., Menovshchikov V. A. [Increasing the longevity of the bearings of the universal joint unequal angular velocities]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2018, No. 2, P. 19–24 (In Russ.). DOI: 10.18324/2077-5415-2018-2-19-24.

35. Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A. Influence of Vibrational Loads on Needle Skew in Cardan-Joint Bearings. *Russian Engineering Research*. 2018, Vol. 38, No. 9, P. 651–655. DOI: 10.3103/S1068798X18090125.

36. Kukushkin E. V. *Sovershenstvovanie konstruktсии i metodov proektirovaniya kardannykh peredach s sharnirami neravnykh uglovykh skorostey*. Kand. diss. [Perfection of the design and methods of designing universal joints gears with hinges of unequal angular velocities. Cand. Diss.]. Bratsk, 2018, 18 p.

© Ереско С. П., Ереско Т. Т., Кукушкин Е. В.,  
Меновщиков В. А., 2018

**For citation:** Zalizniak V. E., Zolotov O. A., Zolotova O. P. [Mathematical model of conducting nanopore for molecular dynamics simulations]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 4, P. 677–682. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-677-682

**Для цитирования:** Зализняк В. Е., Золотов О. А., Золотова О. П. Математическая модель проводящей нанопоры для расчетов методом молекулярной динамики // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 4. С. 677–682. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-677-682

## MATHEMATICAL MODEL OF CONDUCTING NANOPORE FOR MOLECULAR DYNAMICS SIMULATIONS

V. E. Zalizniak<sup>1</sup>, O. A. Zolotov<sup>1</sup>, O. P. Zolotova<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

<sup>2</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\* E-mail: zolotova@sibsau.ru

*An electrostatic model of conducting nanopore is presented in the paper. The model does not require solution of the Poisson equation for the potential. This model is intended for use in simulation of transport phenomena of charged particles in conducting nanopores by the method of molecular dynamics. This method is based on Newton's equations of motion and it allows one to determine the variation of position, velocity and acceleration of particles with time. The electric field from the charge distributed over the nanopore surface is approximated by the field from fictitious point charges on the same surface. To verify the proposed model of fictitious charges system capacitance is calculated. The obtained values of capacitance are compared with classical results for conducting tubule and with the results obtained by the other similar method. The comparison shows that relative discrepancy between results is less than 10 %. There is a need to further develop the proposed model both in case of a large number of fictitious charges and in case when charged particles are in close proximity to the nanopore surface. The proposed method can be easily applied to an arbitrary shape nanopore. The model can be used in the development of various nanodevices, among them the devices used in life support systems of manned space vehicles.*

**Keywords:** conducting nanopore, ion transport, molecular dynamics.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОВОДЯЩЕЙ НАНОПОРЫ ДЛЯ РАСЧЕТОВ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

В. Е. Зализняк<sup>1</sup>, О. А. Золотов<sup>1</sup>, О. П. Золотова<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

<sup>2</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\* E-mail: zolotova@sibsau.ru

*Представлена электростатическая математическая модель проводящей нанопоры. Расчет потенциала проводящей нанопоры не требует решения уравнения Пуассона. Модель предназначена для компьютерного моделирования транспорта заряженных частиц в проводящих нанопорах методом молекулярной динамики. Этот вычислительный метод основан на втором законе Ньютона и позволяет получить траекторию, которая описывает положения, скорости и ускорения частиц со временем. Электрическое поле распределенного по поверхности нанопоры заряда аппроксимировано полем фиктивных точечных зарядов, расположенных на той же поверхности. Выполнено сравнение электроемкости системы фиктивных зарядов, рассчитанной предложенным методом, с классическими решениями для проводящего тубулена и с решениями, полученными другим подобным методом. Предложенный метод показал достаточную точность (около 10 %) и предсказуемость поведения. Необходимо его дальнейшее исследование и развитие как для случая достаточно большого числа фиктивных зарядов, так и для случая достаточно сильного приближения ионов к поверхности нанопоры. Рассмотренный метод введения фиктивных зарядов может быть легко применен к нанопорам произвольной*

формы. Результаты выполненного моделирования могут быть использованы при разработке различных нанотехнологических устройств, в том числе используемых в качестве компонентов систем жизнеобеспечения пилотируемых космических аппаратов.

**Ключевые слова:** проводящая нанопора, транспорт ионов, молекулярная динамика.

**Introduction.** Nanopores represent a type of pores with a diameter of about several nanometers. Channels of such size can be both natural and artificially made objects. Currently researchers take great interest in the issues of studying and modeling of nanopore properties due to their broad application in science and technology [1; 2]. Artificial nanopores can be used, for example, for imitation of biological nanopore functions. They also have attractive potential applications in nanofluid fields [3]. Among these applications are desalination, ionic sieves [4], sensors for biological agents and sequencing of DNA or RNA [5].

Various forms of artificial nanopores using different production technologies and materials, including polymers, inorganic substances, biotic and composite materials have been developed [6; 7].

Conducting nanopores attract considerable attention due to their important potential applications. In a number of works production methods of similar structures are given. For example, such nanopores can be made via integration of carbon structures into the corresponding nanoporous material. A multilayered carbon nanotube was made inside a pore and on the surface of an anode aluminum oxidic membrane, applying the method of chemical sedimentation from a steam phase [8]. Strengthened single-layer metal carbon nanotubes were grown on a silicon plate via chemical sedimentation from a steam phase [9]. Synthesis of conducting carbon tubules inside the pores of the anode aluminum and oxidic membrane was investigated [10]. Similar structures can be of interest in terms of production of selective membranes switched by electric field.

In recent years mathematical and electrostatic models of ion transport in various types of nanopores and nanochannels have been vigorously developed, computer modeling of processes have been carried out as well [11–13].

At computer modeling of ion transport, applying methods of molecular dynamics, the problem of electric field defining, created in the system, has to be solved at each step in time. In presence of electro-conductive elements in the system, solving such a task with classical methods becomes rather resource-intensive. Therefore, problem solving methods of such electrostatic tasks should be fairly simple, although they are not as accurate as classical ways. In this regard there is a problem of such methods accuracy assessment in comparison with classical ones. A rather typical assessment might be a comparison of integrated electric parameters of the system, obtained by the offered methods, with classical decisions. In this work electric capacitance parameter will be compared with the data from the reference book [14].

The purpose of this work is to simulate the conducting nanopore electric field in presence of external charges (ions). This model is intended for use in fundamental research of charged particles transfer phenomenon (ions and charged proteinaceous residue) in conducting nanopores.

In the work [15] a method of the conducting nanopore electric field in the presence of external charges (ions) modeling in relation to problems of molecular dynamics was offered. In the present work an alternative for further development of this method is being investigated.

The results of simulation can be used when developing various devices, including, for instance, a component of life support systems in piloted spacecrafts.

**Problem definition.** The membrane containing a nanopore is simulated in the form of  $L$  wide uniform dielectric plate. The nanopore is a cylindrical hole with radius  $a$  and length  $L$  (fig. 1).

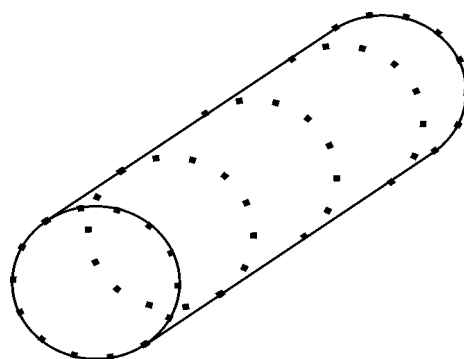


Fig. 1. Model of nanopore. Dots denote fictitious electric charges

Рис. 1. Модель нанопоры. Точками обозначены фиктивные электрические заряды

We shall consider the problem of ion transport in the context of continual electrostatic model. We shall assume that the ion is located in random position  $\mathbf{r}^*$ . Electrostatic potential of  $\varphi(\mathbf{r})$  in and outside the nanopore satisfies the Poisson's equation

$$\Delta\varphi = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{n=1}^N q_n \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_n^*), \quad (1)$$

where  $\Delta$  – Laplasian operator;  $q_n$  – ion charge;  $N$  – ion number;  $\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_n^*)$  – delta-Dirac function. The equation (1) has to be solved across all the space, except the area of membrane material with the potential set of boundary conditions on the tubulen surface. It is also necessary to demand the continuity of the membrane, normal to the surface, components of electric induction vector and, whenever possible, decrease of potential while being removed from the system.

Under consideration of charged particles transport phenomenon, we are interested in the force affecting the ion from the conducting nanopore which is expressed as  $\mathbf{f} = -q \cdot \text{grad}(\varphi(\mathbf{r}^*))$ .

The solution of the equation (1) with the set boundary conditions is a difficult task. The problem becomes even

more complicated if to consider not only cylindrical, but also other forms of nanopores. Further we will try to present simple and rather universal model of conducting nanopores which does not require solving the Poisson equation for the potential.

**Electrostatic model of conducting nanopore.** We shall approximate electric field distributed on the body (tubulen) of the charge by the field of the dot charges located on the same surface. We shall place these fictitious charges in the chosen in advance surface dots. We will determine their size from the condition of maximum approach to mechanical balance. Assuming that fictitious charges could move on a tubulen surface, then equality to zero projection on the tubulen surface of total force affecting each charge from other charges would be condition of balance. This case is equivalent to the requirement of equality to zero projections on the tubulen surface of total electric field strengths created by all other charges in the point of each fictitious charge. In our case as positions of charges are fixed, the above-stated requirement is generally impracticable. Therefore, we shall demand the minimal sum of these projections squares.

Thus, we shall place the fictitious charges  $Q_k$ ,  $k = 1, \dots, K$ , at the point with coordinates  $\mathbf{r}_k$ . Then we obtain electric-field vector Projection  $\mathbf{E}_{it}$  at point  $\mathbf{r}_i$ :

$$\mathbf{E}_{it}(\mathbf{r}_i) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{k \neq i} Q_k \frac{(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_k) - \mathbf{n}_i(\mathbf{n}_i * (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_k))}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_k|^3}, \quad (2)$$

where  $\mathbf{n}_i$  – normal vector to the surface at the point  $\mathbf{r}_i$ ;  $*$  is dot product of vectors.

By summing squares (2) where all  $i = 1, \dots, K$ , we obtain

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^K \mathbf{E}_{it}^2(\mathbf{r}_i) &= \frac{1}{16\pi^2\epsilon_0^2} \times \\ &\times \sum_{i=1}^K \sum_{k \neq i} \sum_{l \neq i} Q_k Q_l \frac{(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_k) * (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_l) - (\mathbf{n}_i * (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_k))(\mathbf{n}_i * (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_l))}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_k|^3 |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_l|^3}. \end{aligned} \quad (3)$$

We shall look for the minimum (3) on condition of specified total charge  $q$  of conducting tubulen:

$$q = \sum_{i=1}^K Q_i. \quad (4)$$

Considering that a set of unknown charges is vector  $\mathbf{Q} = (Q_k)$ , than we have a standard problem of square form minimization of (3):

$$\sum_{i=1}^K \mathbf{E}_{it}^2(\mathbf{r}_i) = \frac{1}{16\pi^2\epsilon_0^2} \mathbf{Q}' \times \hat{\mathbf{A}} \times \mathbf{Q}, \quad (5)$$

$$\hat{\mathbf{A}}_{kl} = \sum_{i \neq k, l} \frac{(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_k) * (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_l) - (\mathbf{n}_i * (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_k))(\mathbf{n}_i * (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_l))}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_k|^3 |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_l|^3}.$$

Under condition (4):

$$q = \mathbf{1}' \times \mathbf{Q}. \quad (6)$$

Here  $\times$  denotes dot product of vectors of  $K$  dimension and vectors and dimensional matrix  $K \times K$ ; stroke de-

notes transposing operation of a vector column in a vector line;  $\mathbf{1} = (1, 1, 1, \dots, 1)$  – made of units dimension vector  $K$ .

Solution to variational problem (5), (6), on condition that nondegenerate matrix  $\hat{\mathbf{A}}$ , will be vector

$$\mathbf{Q} = q \frac{\hat{\mathbf{A}}^{-1} \times \mathbf{1}}{\mathbf{1}' \times \hat{\mathbf{A}}^{-1} \times \mathbf{1}}. \quad (7)$$

In case of nondegenerate matrices  $\hat{\mathbf{A}}$ , under condition that  $\mathbf{a}_0$  – evector  $\hat{\mathbf{A}}$ , corresponding to zero evalue, non-orthogonal  $\mathbf{1}$ , we obtain

$$\mathbf{Q} = q \frac{\mathbf{a}_0}{\mathbf{1}' \times \mathbf{a}_0}. \quad (8)$$

The result (8) can be easily summarized and in case of greater 1 dimension of the evector subspace, corresponding to zero evalue  $\hat{\mathbf{A}}$ : in this case  $\mathbf{a}_0$  – any non orthogonal to  $\mathbf{1}$  vector from that subspace. However, in case  $\mathbf{a}_0$  is orthogonal to  $\mathbf{1}$ , the task should be reduced, while decreasing  $\hat{\mathbf{A}}$  size and leaving behind only zero evalues. It should be noted that from the method  $\hat{\mathbf{A}}$  it is clear that  $\hat{\mathbf{A}}$  is symmetrical non-negative matrix.

We shall consider the alternative where  $\hat{\mathbf{A}}$  is a degenerate matrix. Generally this is true: we shall place nonzero dot charges of one sign on the tubulen surface and allow them to move on a tubulen surface. It is obvious that such system has a stationary position of charges. If to arrange fictitious charges similarly, then the matrix  $\hat{\mathbf{A}}$  will degenerate as there are charge values at which vector projection of electric field strength affecting each charge is equal to zero. Moreover, another stationary position, mostly continuously depending on charges, corresponds to a different set of value sizes which are freely moving on the tubulen surface. Therefore, we have a rather big area of coordinates of fictitious charges at which the matrix degenerate. At numerical calculations it will mean that if we chose the “wrong” positions of fictitious charges, and the matrix is not degenerated, then, while increasing in number of fictitious charges, generally, conditionality ratio of this matrix will grow.

The present work is devoted to preliminary assessment of the offered method practical applicability under molecular and dynamic calculations, therefore further cases of small number of fictitious charges at which in the reviewed examples matrix  $\hat{\mathbf{A}}$  is not degenerated are investigated.

The offered method is a further development of [15]. In the work [15] comparative analysis of the presented method of electrostatic task solution with other methods of electrostatics is carried out. As a comparative criterion, the results of electric capacitance calculation given in the reference book [14] were used. In this work for the above method applicability assessment we will use the results of electric capacitance of the conducting tubulen calculations and compare them with the results [14] and [15].

We shall continue the above suggested calculations in order to obtain estimates of conducting tubulen electric capacitance. We shall receive these estimates, comparing

the energy of the system considered with the expression for the energy of the conducting body:

$$W = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i \neq j} \frac{Q_i Q_j}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} = \frac{q^2}{2C}, \quad (9)$$

where  $C$  – conducting tubulen electric capacitance. Adding (7) to (9), finally obtain the expression for electric capacitance:

$$C = 2\pi\epsilon_0 \frac{(\mathbf{1}' \times \hat{\mathbf{A}}^{-1} \times \mathbf{1})^2}{\mathbf{1}' \times \hat{\mathbf{A}}^{-1} \times \hat{\mathbf{B}} \times \hat{\mathbf{A}}^{-1} \times \mathbf{1}}, \quad (10)$$

$$\hat{\mathbf{B}}_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|}, & i \neq j; \\ 0 & i = j. \end{cases}$$

It shall be noted that in [15] nondegenerate matrices  $\hat{\mathbf{B}}$  was proved

**Model validation.** In order to validate the accuracy of the model suggested, we shall calculate the self-capacitance of the cylindrical hole of radius  $a$  and length  $L$  and compare it with the data given in the table [14].

We shall place the fictitious charges in points  $(z_n, a, \theta_m)$  of the cylindrical system of coordinates, where

$$z_n = (n-1) \frac{L}{N-1}, \quad n = 1, \dots, N, \quad (11)$$

$$\theta_m = (m-1) \frac{2\pi}{N-1}, \quad m = 1, \dots, N.$$

Then  $K = N^2$ . Calculations are given in table for  $5 \leq L/a \leq 20$  и  $N = 10, 20, 30$ . Electrical capacitance value from the reference book [14] are marked  $C_0$ , discrepancy between calculated and table-based [14] capacitance value  $d = (C - C_0)/C_0$ .

In fig. 2 the obtained results are presented graphically, the best results from the work [15] obtained under the

same algorithm of fictitious charges arrangement and  $N = 80$  are given.

Results presented in table and fig. 2 show that when  $L/a > 8$ , discrepancy amounts to less than 15 % already for  $N = 20$ , and smoothly decreases under increase both  $L/a$ , and  $N$ , which is also an advantage of the suggested method. For comparison we must note that given in fig. 2 works [15] do not possess this property. From the practical point of view it might be expected that at  $L/a > 10$ ,  $N = 30$  parameters of charged particles interaction with the conducting nanopore are defined to a precision of less than 10 %.

**Conclusion.** One electrostatic model of conducting nanopore is presented in the work. The model is intended for use when modeling a nanopore, applying the method of molecular dynamics. This computing method is based on the second law of Newton. In case force intensity operating on each of atoms is known, integration of the movement equations allows to obtain a trajectory which describes positions, velocities and accelerations of particles over the time.

If fictitious charges are not entered, then to find the force operating on charged particle from the conducting nanopore, at first it is necessary to solve the equation (1) in each timepoint. In [15] the method allowing a single invert of the matrix of equation system by fictitious charges introduction is offered. The method presented in this work is similar, but demonstrates a better accuracy as it is shown in table and fig. 2. It is obvious that the offered model can be easily applied to nanopores of any form.

Thus, the offered method showed the sufficient accuracy and predictability. Therefore, its further research and development is necessary for both large number of fictitious charges leading to significant growth of matrix conditionality and for the case of rather close approximation of ions to a nanopore surface.

The results of calculations of the electrical capacitance of a conducting nanopore

$L/a$ , relative units.	$N = 10$		$N = 20$		$N = 30$		$C_0/2\pi\epsilon_0 a$ , [14], relative units.
	$C/2\pi\epsilon_0 a$ , relative units.	$d$ , %	$C/2\pi\epsilon_0 a$ , relative units.	$d$ , %	$C/2\pi\epsilon_0 a$ , relative units.	$d$ , %	
5	2.294	35.58	2.129	25.83	2.073	22.52	1.692
6	2.457	30.90	2.283	21.63	2.223	18.43	1.877
7	2.604	28.34	2.418	19.17	2.354	16.02	2.029
8	2.740	25.75	2.543	16.70	2.475	13.58	2.179
9	2.869	23.45	2.660	14.46	2.588	11.36	2.324
10	2.993	21.47	2.772	12.50	2.696	9.42	2.464
11	3.113	19.68	2.879	10.69	2.799	7.61	2.601
12	3.229	18.06	2.983	9.07	2.899	6.00	2.735
13	3.342	16.65	3.083	7.61	2.995	4.54	2.865
14	3.451	15.30	3.180	6.25	3.088	3.17	2.993
15	3.557	14.08	3.276	5.07	3.179	1.96	3.118
16	3.659	12.90	3.369	3.95	3.268	0.83	3.241
17	3.759	11.84	3.461	2.98	3.355	-0.18	3.361
18	3.855	10.78	3.551	2.04	3.441	-1.12	3.480
19	3.948	9.73	3.639	1.14	3.524	-2.06	3.598
20	4.038	8.75	3.726	0.35	3.607	-2.85	3.713

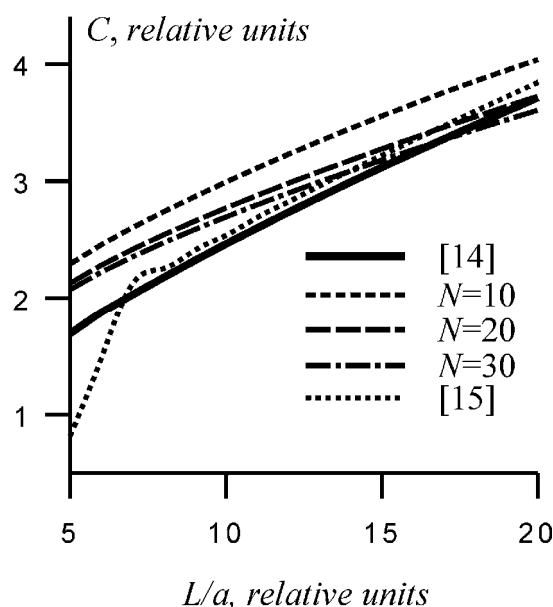


Fig. 2. Relationship between capacitance of a nanopore and the value of  $L/a$  for various numbers of fictitious charges. Solid line – tabulated data on capacitance [14]

Рис. 2. Зависимость емкости нанопоры от величины  $L/a$  при различном количестве фиктивных зарядов. Сплошная жирная линия – табличные значения емкости [14]

## References

1. Dekker C. Solid-state nanopores. *Nature Nanotechnology*. 2007, Vol. 2, No. 4, P. 209–215. DOI: 10.1038/nnano.2007.27.
2. Thomas M., Corry B., Hilder T. A. What have we learnt about the mechanisms of rapid water transport, ion rejection and selectivity in nanopores from molecular simulation? *Small*. 2014, Vol. 10, No. 8, P. 1453–1465. DOI: 10.1002/smll.201302968.
3. Daiguji H. Ion transport in nanofluidic channels. *Chemical Society Reviews*. 2010, Vol. 39, No. 3, P. 901–911. DOI: 10.1039/B820556F.
4. Majd S., Yusko E. C., Billeh Y. N. et. al. Applications of biological pores in nanomedicine, sensing, and nanoelectronics. *Current Opinion in Biotechnology*. 2010, Vol. 21, No. 4, P. 439–476. DOI: 10.1016/j.copbio.2010.05.002.
5. Singer A., Rapireddy S., Ly D. H., Meller A. Electronic barcoding of a viral gene at the single-molecule level. *Nano Letters*. 2012, Vol. 12, No. 3, P. 1722–1728. DOI: 10.1021/nl300372a.
6. Hou X., Zhang H., Jiang L. Building bio-inspired artificial functional nanochannels: from symmetric to asymmetric modification. *Angewandte Chemie International Edition*. 2012, Vol. 51, No. 22, P. 5296–5307. DOI: 10.1002/anie.201104904.
7. Zhang Y., Kong X. Y., Gao L. et. al. Fabrication of nanochannels. *Materials*. 2015, Vol. 8, No. 9, P. 6277–6308. DOI: 10.3390/ma8095304.
8. Kasi J. K., Kasi A. K., Wongwiriyan W. et. al. Synthesis of carbon nanotube and carbon nanofiber in nanopore of anodic aluminum oxide template by chemical vapor deposition at atmospheric pressure. *Advanced Materials Research – Trans Tech Publications*. 2012, Vol. 557–559, P. 544–549. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.557-559.544.
9. Choi W., Ulissi Z. W., Shimizu S. F. et. al. Diameter-dependent ion transport through the interior of isolated single-walled carbon nanotubes. *Nature Communications*. 2013, Vol. 4, P. 2397. DOI: 10.1038/ncomms3397.
10. Simunin M. M., Khartov S. V., Shiverskii A. V. et. al. Structures based on graphitized nanotubulenes with a common electrode in a matrix of porous anodic alumina for the purpose of forming electrically switchable membranes. *Technical Physics Letters*. 2015, Vol. 41, No. 11, P. 1047–1050. DOI: 10.1134/S1063785015110103.
11. Levin Y. Electrostatics of ions inside the nanopores and trans-membrane channels. *Europhysics Letters*. 2006, Vol. 76, No. 1, P. 163–169. DOI: 10.1209/epl/i2006-10240-4.
12. Modi N., Winterhalter M., Kleinekathoefer U. Computational modeling of ion transport through nanopores. *Nanoscale*. 2012, Vol. 4, No. 20, P. 6166–6180. DOI: 10.1039/b000000x.
13. Hilder T. A., Gordon D., Chung S. H. Computational modeling of transport in synthetic nanotubes. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*. 2011, Vol. 7, No. 6, P. 702–709. DOI: 10.1016/j.nano.2011.02.011.
14. Iossel Yu. Ya., Kochanov E. S., Strunsky M. G. *Raschet elektricheskoy emkosti* [Calculation of Electric Power]. Leningrad, Energoizdat, 1981, 288 p. (In Russ.).
15. Zolotov O. A., Zalizniak V. E. Simple mathematical model of conducting nanopore. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya Matematika i fizika*. 2018, Vol. 11, No. 4, P. 505–512. DOI: 10.17516/1997-1397-2018-11-4-505-512.

### Библиографические ссылки

1. Dekker C. Solid-state nanopores // *Nature Nanotechnology*. 2007. Vol. 2. P. 209–215.
2. Thomas M., Corry B., Hilder T. A. What have we learnt about the mechanisms of rapid water transport, ion rejection and selectivity in nanopores from molecular simulation? // *Small*. 2014. Vol. 10. P. 1453–1465.
3. Daiguji H. Ion transport in nanofluidic channels // *Chemical Society Reviews*. 2010. Vol. 39. P. 901–911.
4. Applications of biological pores in nanomedicine, sensing, and nanoelectronics / S. Majd [et al.] // *Current Opinion in Biotechnology*. 2010. Vol. 21. P. 439–476.
5. Electronic barcoding of a viral gene at the single-molecule level / A. Singer [et al.] // *Nano Letters*. 2012. Vol. 12. P. 1722–1728.
6. Hou X., Zhang H., Jiang L. Building bio-inspired artificial functional nanochannels: from symmetric to asymmetric modification // *Angewandte Chemie International Edition*. 2012. Vol. 51. P. 5296–5307.
7. Fabrication of nanochannels / Y. Zhang [et al.] // *Materials*. 2015. Vol. 8. P. 6277–6308.
8. Synthesis of carbon nanotube and carbon nanofiber in nanopore of anodic aluminum oxide template by chemical vapor deposition at atmospheric pressure / J. K. Kasi [et al.] // *Advanced Materials Research – Trans Tech Publications*. 2012. Vol. 557–559. P. 544–549.
9. Diameter-dependent ion transport through the interior of isolated single-walled carbon nanotubes / W. Choi [et al.] // *Nature Communications*. 2013. Vol. 4. P. 2397.
10. Структуры на основе графитизированных нанотрубок с общим электродом в матрице пористого анодного оксида алюминия для задачи формирования переключаемых электрическим полем мембран / М. М. Симуни [и др.] // *Письма в журнал технической физики*. 2015. № 21 (41). С. 52–59.
11. Levin Y. Electrostatics of ions inside the nanopores and trans-membrane channels // *Europhysics Letters*. 2006. Vol. 76. P. 163–169.
12. Modi N., Winterhalter M., Kleinekathoefer U. Computational modeling of ion transport through nanopores // *Nanoscale*. 2012. Vol. 4. P. 6166–6180.
13. Hilder T. A., Gordon D., Chung S. H. Computational modeling of transport in synthetic nanotubes // *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*. 2011. Vol. 7. P. 702–709.
14. Иоссель Ю. Я., Кочанов Э. С., Струнский М. Г. Расчет электрической емкости. Л. : Энергоиздат, 1981. 288 с.
15. Золотов О. А., Зализняк В. Е. Простая математическая модель проводящей нанопоры // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Математика и физика»*. 2018. № 4 (11). С. 505–512.

© Zalizniak B. E., Zolotov O. A.,  
Zolotova O. P., 2018



**Для цитирования:** Ковалев И. В., Ковалев Д. И., Колесник В. В., Лосев В. В., Карасева М. В. Анализ технологического оборудования систем автоматизированного мониторинга дымовых газов тепловых электростанций // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 4. С. 683–690. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-683-690

**For citation:** Kovalev I. V., Kovalev D. I., Kolesnik V. V., Losev V. V., Karaseva M. V. [Technological equipment analysis of automated monitoring systems of flue gases at power plants]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 4, P. 683–690 (In Russ.). Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-683-690

## АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОНИТОРИНГА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

И. В. Ковалев<sup>1,2</sup>, Д. И. Ковалев<sup>1</sup>, В. В. Колесник<sup>3</sup>, В. В. Лосев<sup>1</sup>, М. В. Карасева<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

<sup>3</sup>Филиал ПАО «ОГК-2» – Красноярская ГРЭС-2  
Российская Федерация, 663690, г. Зеленогорск, ул. Первая Промышленная, 2

\*E-mail: karaseva-margarita@rambler.ru

Одной из приоритетных задач энергетической стратегии России на сегодняшний день является организация постоянно действующих систем непрерывного промышленного мониторинга вредных выбросов пылеугольных теплоэлектростанций в атмосферу. Рассматривается оборудование производственно-экологического мониторинга отечественных разработчиков и производителей, которое эксплуатируется на многих теплоэлектростанциях РФ на нижнем уровне систем непрерывного мониторинга выбросов. На этом уровне обеспечивается проведение замеров на основе согласованных и аттестованных методик, сбор и преобразование первичной информации к стандартному виду, текущее обслуживание и контроль функционирования измерительных систем и вспомогательного оборудования. При организации непрерывного мониторинга на теплоэлектростанциях могут быть использованы различные газоанализаторы и сечения газового тракта для определения состава продуктов сгорания. Выбор конкретных газоаналитических систем связан с определенными трудностями, так как все такие системы имеют свои преимущества и недостатки, и для оптимального выбора оборудования требуется учесть множество различных факторов и параметров. Задача выбора газоаналитических систем является многокритериальной. Трудности при решении данной задачи вызваны тем, что критерии могут противоречить друг другу (например, высокие технические возможности могут усложнять эксплуатацию системы и повышать ее стоимость) и не иметь количественной оценки.

Выбор газоаналитических систем для производственно-экологического мониторинга должен быть максимально объективным, не зависящим от предпочтений отдельных экспертов и специалистов. Представленное описание оборудования производственно-экологического мониторинга позволяет провести экспертное сравнение технических характеристик газоанализаторов. Опираясь на методы обоснования решений по выбору состава оборудования в инновационных проектах, сделаны выводы по результатам анализа, выполненного по 11 экспертно-значимым параметрам. Проведенный экспертный анализ может дополнить результаты предварительного обследования персоналом теплоэлектростанций или специализированной организацией, осуществляющей проектирование систем непрерывного мониторинга выбросов теплоэлектростанций, используемые при разработке технического задания. Рекомендуется выполнять технико-экономическое обоснование принимаемых решений с учетом особенностей оборудования, условий производства, требований безопасности и удобства обслуживания.

**Ключевые слова:** мониторинг, экология, тепловая электростанция, выбросы, газоаналитическая система, контроль.

# TECHNOLOGICAL EQUIPMENT ANALYSIS OF AUTOMATED MONITORING SYSTEMS OF FLUE GASES AT POWER PLANTS

I. V. Kovalev<sup>1,2</sup>, D. I. Kovalev<sup>1</sup>, V. V. Kolesnik<sup>3</sup>, V. V. Losev<sup>1</sup>, M. V. Karaseva<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochoy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup>Siberian Federal University  
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

<sup>3</sup>Branch of "OGK-2" – Krasnoyarskaya GRES-2  
2, Pervaya Promyshlennaya Str., Zelenogorsk, 663690, Russian Federation

\*E-mail: karaseva-margarita@rambler.ru

*Nowadays one of the priorities of Energy Strategy of Russia is to organize constantly operating systems of continuous industrial monitoring of harmful emission out of coal-fired power plants into the atmosphere. The given paper considers the equipment for production and environmental monitoring of home developers and manufacturers, operated at some power plants of the Russian Federation at the lower level of monitoring of gas emission. At this level, measurements on the basis of agreed and certified methods, gathering and conversion of primary information to a standard form, routine maintenance and monitoring of the functioning of measuring systems and auxiliary equipment are carried out. Various gas analyzers and gas sections can be used to determine the composition of the combustion products in organization continuous monitoring at power plants. The selection of specific gas analytical systems is associated with certain difficulties, since they all have their advantages and disadvantages. Moreover, it is necessary to take into account a lot of different factors and parameters for the optimal selection of the equipment. The task of gas analytical systems selection is multicriterial. Difficulties in solving this problem are caused by the fact that the criteria may contradict each other (for example, high technical capabilities may complicate the operation of the system and increase its cost) and they may not be quantified.*

*The selection of gas analytical systems for production and environmental monitoring should be as objective as possible, independent of the preferences of individual experts and specialists. The presented description of the equipment for production and environmental monitoring allows for an expert comparison of the technical characteristics of gas analyzers. Based on the methods of substantiating decisions on the selection of the structure of equipment in innovative projects, conclusions are drawn from the results of the analysis performed on 11 expert-relevant parameters. The recent expert analysis can supplement the results of the preliminary survey by the personnel of the power plant or a at power plants applied for the development of the technical specifications. It is recommended to carry out a feasibility investigation in decision making, taking into account the features of the equipment, production conditions, safety requirements and serviceability.*

**Keywords:** monitoring, ecology, power plant, gas emission, gas analytic system, control.

**Введение.** Организация постоянно действующих систем непрерывного промышленного мониторинга вредных выбросов пылеугольных теплоэлектростанций (ТЭС) в атмосферу является одной из приоритетных задач энергетической стратегии России [1]. Существует два вида мониторинга вредных выбросов: мониторинг окружающей среды (определение содержания вредных веществ в атмосфере и контроль ее текущего состояния) и производственный мониторинг (контроль конкретного промышленного источника выбросов – ТЭС [2]). Осуществление производственного мониторинга уходящих дымовых газов пылеугольных теплоэлектростанций является одним из важнейших путей выполнения п. 1.1.7. «Обязанности работника энергообъекта» СО 153-34.20.501–2003 (Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации), требующего от каждого работника [3]:

- снижения вредного влияния производства на людей и окружающую среду;
- использования достижений научно-технического прогресса в целях повышения экономичности, надежности и безопасности, улучшения экологии энергообъекта и окружающей среды.

Достичь выполнения требований позволяет реализация современных систем непрерывного мониторинга выбросов (СНМВ) ТЭС, которая строится на основе четкого распределения функций и информационного обмена между ее составными частями [4; 5]. В работе [6] показано, что с учетом функциональной схемы СНМВ и организационных структур ТЭС, а также региональной энергосистемы наиболее оптимальной является трехуровневая организационно-иерархическая схема СНМВ.

В настоящей статье рассматривается нижний уровень СНМВ, который включает станционное оборудование и измерительную аппаратуру, а также обслуживающий технический персонал. Именно на нижнем уровне обеспечивается проведение замеров на основе согласованных и аттестованных методик, сбор и преобразование первичной информации к стандартному виду (формату), текущее обслуживание и контроль функционирования измерительных систем и вспомогательного оборудования [7].

Для данного уровня иерархии СНМВ важным аспектом технической реализации является решение следующих вопросов: что и чем измерять для обеспечения производственного мониторинга уходящих

газов пылеугольных ТЭС. При организации непрерывного мониторинга на ТЭС могут быть использованы различные газоанализаторы и сечения газового тракта для определения состава продуктов сгорания. Принципиально возможны три способа организации промышленного мониторинга на ТЭС: непрерывный контроль массовых выбросов вредных веществ на дымовой трубе ТЭС; непрерывный контроль концентраций вредных веществ в дымовых газах на каждом котельном агрегате ТЭС; комбинация этих двух способов.

Основным нормативным документом, определяющим номенклатуру измерений уходящих газов является СО 34.35.101–2003 «Методические указания по объему технологических измерений, сигнализации, автоматического регулирования на тепловых электростанциях», обязывающие все тепловые электростанции осуществлять непрерывный контроль и регистрацию содержания  $O_2$ ,  $CO$  и  $NO_x$  в дымовых газах, а также при наличии установки золоулавливания, сероочистки и газоочистки – концентрацию оксидов серы в пересчете на  $SO_2$  и концентрацию оксидов азота в пересчете на  $NO_2$  [8].

В период с 1990 по 2010 гг. по распоряжению РАО «ЕЭС России» были разработаны нормативные документы по организации и проведению химико-технологического мониторинга, методики измерений и расчета указанных выше технологических параметров в дымовых газах для пылеугольных тепловых электростанций:

- РД 34.11.306–86 (МТ 34-70-021–86) «Методика выполнения измерений содержания кислорода в уходящих газах энергетических котлов»;
- РД 153-34.1.11.353–2001 «Методика измерений массовых выбросов загрязняющих веществ от котельных установок с применением газоанализаторов с электрохимическими датчиками»;
- РД 34.02.305–98 «Методика определения валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок ТЭС»;
- СО 34.02.320–2003 «Организация контроля состава продуктов сгорания стационарных паровых и водогрейных котлов»;
- СО 153-34.02.304–2003 «Методические указания по расчету выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов тепловых электростанций»;
- СТО 70238424.13.040.40.002–2008 «Тепловые электрические станции. Экологическая безопасность. Установки по очистке дымовых газов от оксидов серы. Нормы и требования» (стандарт организации НП «ИНВЭЛ»).

Вышеупомянутые документы и явились отправной точкой для разработки, внедрения и совершенствования приборов и систем производственно-экологического мониторинга дымовых газов для пылеугольных тепловых электростанций.

**Анализ технологического оборудования СНМВ ТЭС.** В настоящее время большое количество отечественных предприятий осуществляют разработку и производство приборов и систем производственно-экологического мониторинга дымовых газов для тепловых электростанций. Необходимость оснащения

ими пылеугольных ТЭС диктуется Федеральным законом от 21.07.2014 г. № 219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» в рамках разработки программ экологической эффективности предприятий и определения повышенных коэффициентов при исчислении платы за негативное воздействие на окружающую среду для юридических лиц и предпринимателей, осуществляющих хозяйственную деятельность, для стимулирования к проведению мероприятий по снижению негативного воздействия на окружающую среду.

Одним из решений этого вопроса является оснащение и реконструкция уже существующих систем газоочистки и экологического мониторинга дымовых газов пылеугольных тепловых электростанций. В этом контексте хочется отметить, что разработчики и производители котельного оборудования, начиная с 2000 г., в рамках требований по объему непрерывных измерений технологических параметров котельного оборудования отдельно выделяют требование по оснащению средствами непрерывного экологического мониторинга уходящих газов.

В [9] показано, что выбор конкретных газоаналитических систем связан с определенными трудностями, так как все они имеют свои преимущества и недостатки, и для оптимального выбора оборудования требуется учесть множество различных факторов и параметров, т. е. данная задача является многокритериальной. Причем ряд критериев могут противоречить друг другу (например, высокие технические возможности могут усложнять эксплуатацию системы и повышать ее стоимость) и не иметь количественной оценки.

Выбор газоаналитических систем для производственно-экологического мониторинга должен быть максимально объективным, не зависящим от предпочтений отдельных экспертов и специалистов. Однако даже при использовании более объективного математического аппарата критериального анализа в [10] отмечается, что количественная оценка значимости каждого критерия (весовой коэффициент) может быть установлен только экспертным путем.

Для рассмотрения в рамках статьи отобрано оборудование производственно-экологического мониторинга следующих отечественных разработчиков и производителей, которое уже эксплуатируется на многих теплоэлектростанциях РФ:

- ФГУП «СПО «Аналитприбор» (г. Смоленск), разрабатывающее весь спектр приборов и систем экологического мониторинга для многих отраслей промышленности, энергетики и транспорта;
- АО «Проманалитприбор» (г. Бердск), специализирующееся на разработке и производстве газоанализаторов дымовых газов под торговой маркой «Экомер»;
- фирма аналитического приборостроения «Информаналитика» (Санкт-Петербург), разрабатывающая и производящая линейку газоанализаторов для контроля дымовых газов для тепловых пылеугольных электростанций.

Рассмотрим построение и принцип работы отобранных газоанализаторов.

1. Стационарный многокомпонентный газоанализатор техноэкологического контроля АНК-410 (разработчик и производитель – ФГУП «СПО «Аналитприбор» (г. Смоленск)) осуществляет непрерывный контроль всей линейки процентного содержания в уходящих газах  $O_2$ ,  $CO$  и  $NO_x$  на  $SO_2$ ,  $NO_2$ .

Принцип действия газоанализатора – электрохимический, основан на использовании эффекта окисления или восстановления определяемого газа на рабочем электроде электрохимической ячейки (ЭЯ). Ток, который возникает при электрохимической реакции, есть мера концентрации определяемого компонента. Ток, пропорциональный концентрации, усиливается, нормируется и преобразуется в цифровую форму.

Конструктивно газоанализатор выполнен одноблочным, в металлическом корпусе и состоит из модуля коммутации и аналоговых входов, двух устройств релейных и токовых выходов (далее – устройство РТВ), устройства РТВ для управления элементами пробоподготовки, адаптера интерфейса, модуля первичных преобразователей, платы клавиатуры и индикации, платы питания и электроклапанов.

Газоанализатор имеет встроенное программное обеспечение (ПО), структура которого включает следующие модули:

- модуль связи;
- модуль визуализации данных;
- модуль измерения и расчета содержания определяемых компонентов;
- модуль формирования управляющих воздействий для управления исполнительными устройствами;
- модуль преобразования данных для формирования выходного унифицированного токового сигнала, пропорционального содержанию массовой концентрации определяемых компонентов.

Основные функции ПО:

- расчет содержания определяемого компонента по каждому измерительному каналу;
- вычисление значения избытка воздуха ( $\alpha$ );
- вычисление объемной концентрации диоксида углерода ( $CO_2$ );
- вычисление объемной концентрации суммы оксидов азота ( $NO_x$ );
- регистрация входных унифицированных токовых сигналов 4–20 мА;
- отображение измеренных и расчетных единиц на индикаторе;
- формирование унифицированного выходного сигнала, пропорционального содержанию определяемого компонента назначенного измерительного канала;
- включение звуковой сигнализации при достижении содержания определяемого компонента установленного порогового значения с одновременным переключением «сухих» контактов реле;
- связь с внешними устройствами по цифровым каналам RS232 и RS485.

При электрохимическом методе измерения газовая смесь поступает в модуль электрохимической ячейки.

При проникновении детектируемого газа через пористую мембрану электрохимическая ячейка формирует токовый сигнал, пропорциональный концентрации измеряемого компонента. Проходя по тракту преобразования и усиления, сигналы концентрации электрохимической ячейки преобразуются в пропорциональные напряжения и поступают на аналоговые входы микроконтроллера (плата управления электрохимической ячейки).

Модуль первичных преобразователей (МПП) предназначен для преобразования физических величин (содержания измеряемых компонентов) в электрический сигнал, обработки сигнала и передачи его по каналу на центральный вычислитель (ЦВ), а также для управления клапанами пневматической схемы (при наличии) и контроля состояния внешней среды.

В состав МПП входит модуль электрохимической ячейки с платой управления электрохимической ячейки и элементы газового тракта.

Микроконтроллер выполняет следующие функции:

- преобразует аналоговые сигналы в цифровую форму;
- осуществляет обработку сигналов, управление элементами газового тракта и электрическими режимами ЭЯ по команде ЦВ.

Центральный вычислитель осуществляет управление всеми элементами газоанализатора, вычисление физических величин, индикацию.

Устройства РТВ осуществляют переключение контактов реле для управления внешними цепями по команде ЦВ, а также выдают выходной токовый сигнал. Устройство РТВ для управления элементами пробоподготовки осуществляет управление побудителем расхода пробы, воздуха и нагревателями по команде ЦВ.

Адаптер интерфейса предназначен для подключения к газоанализатору ПЭВМ по каналам RS232 и RS485. Модуль коммутации и аналоговых сигналов предназначен для присоединения входных унифицированных сигналов 4–20 мА от внешних датчиков.

2. Стационарный газоанализатор ПЭМ-2М осуществляет непрерывный контроль всей линейки процентного содержания в уходящих газах  $O_2$ ,  $CO$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$  (разработчик и производитель – АО «Проманалитприбор» (г. Бердск)).

В соответствии с устройством и структурной схемой газоанализатора газовая проба из газохода через пробоотборный зонд попадает в модуль управления пробоотбором (МУП), в который входят клапаны системы пробоотбора, продувки фильтра подогреваемого, защитный контроллер МУП, силовой блок питания ЛП, источник питания контроллера, коммутационная панель, силовой блок питания линии транспортировки пробы и защитный автомат питания МУП.

Информация из контроллера МУП по внутреннему интерфейсу RS485 передается в контроллер блока приема пробы (БПП) и далее – в удаленный компьютер. Далее проба через клапан пробы попадает в линию транспортировки пробы и по ней – в БПП, расположенный в шкафу. Транспортировка пробы (прокачка) обеспечивается насосом пробы БПП. Из линии транспортировки проба попадает на вход БПП.

Назначение контроллера БПП – управление по заданной программе всеми составляющими БПП.

Газовая проба, закачиваемая в измерительную кювету блока аналитического (БА), освобождается от механических примесей в системе фильтров, от лишней влаги – в холодильнике. Влага, выделенная из газовой пробы, по заданной программе удаляется наружу. Засорение системы фильтров, работоспособность газового насоса и концентрация кислорода в газе контролируются блоком контроля режима влаги (КРВ).

Блок аналитический смонтирован в верхней части шкафа ПЭМ-2М и служит для определения концентраций газов CO, NO, NO<sub>2</sub> в газовой пробе. В состав БА входят: оптический блок – BA1, контроллер БА – BA2, жидкокристаллический дисплей – BA3, клавиатура – BA4, блок питания ACE 723A – BA5, блок подсветки – BA6, сетевой разъем – BA7, разъем порта RS232 – BA8, устройство сопряжения – BL5 с разъемом порта RS485 – X3.

Жидкокристаллический алфавитно-цифровой дисплей служит для отображения показаний газоанализатора и представления служебной информации при тестировании газоанализатора и проведении поверочных и калибровочных работ. Встроенный клавишный пульт предназначен для выбора режимов работы газоанализатора. На этой же панели расположены клавиша включения питания БА, кнопка подсветки дисплея (опция), разъем соединения БА с БПП по интерфейсу RS485, разъем RS232 для сервисного обслуживания.

Алгоритм работы БПП следующий. При прокачке нулевого газа (режим «Прокачка воздуха») включается газовый насос M1 – насос воздуха. Газ (воздух) через штуцер забора нулевого газа, фильтр F3 (ФТО воздуха) прокачивается через холодильник U10 (блок холодильника), фильтр F4 (фильтр тонкой очистки) и через модуль КРВ попадает в БА. Во время прокачки нулевого газа часть газового потока через фильтр F5 (фильтр химический) направляется на датчик кислорода, и происходит калибровка измерителя кислорода. При прокачке измеряемого газа (режим «Прокачка газа») включается насос M2 (насос пробы). Газ через штуцер забора измеряемого газа, фильтры F1 (фильтр объемный), F2 (влагосборник) прокачивается через холодильник U10, фильтр F4 (фильтр тонкой очистки) и через модуль КРВ попадает в БА. Во время прокачки измеряемого газа часть газового потока через фильтр F5 (фильтр химический) направляется на датчик кислорода, и происходит измерение концентрации кислорода. Через заданное время емкость влагосборника F2 освобождается от конденсата с помощью перистальтического насоса M3 (насос слива). Во время анализа концентраций газов CO, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> прокачка газа прекращается.

Блок холодильника представляет собой полностью автономный модуль, управляемый собственным контроллером. Контроллер холодильника связан с контроллером БПП по внутреннему интерфейсу RS485, по которому передается состояние холодильника и могут изменяться настройки, которые также можно изменять и с помощью кнопок, расположенных на передней панели контроллера.

Холодильник – термоэлектрический, на основе элемента Пельтье. Холодная поверхность элемента Пельтье (термоэлектрического модуля) контактирует с теплоизолированным теплообменником, через который проходит газовая проба, а тепло с горячей поверхности отводится воздушным радиатором, обдуваемым вентилятором. Температура в теплообменнике поддерживается на уровне 3–4 °С, что соответствует остаточной влажности пробы на уровне 5–6 мг/м<sup>3</sup>.

Транспортировка пробы (прокачка) обеспечивается насосом пробы БПП. Пробоотборное устройство предназначено для забора газовой пробы в газоходе. Конструктивно пробоотборное устройство представляет подогреваемый фильтр с зондом из нержавеющей стали, который монтируется на газоходе. Подогрев линий осуществляется обогревающим кабелем с максимальной мощностью тепловыделения 40 Вт/м. Теплоизоляция выполнена алюминированным цилиндрическим теплоизолятором.

Дешифратор RS485 – 8 × (4–20 мА) служит для преобразования сигналов выбранных измерительных каналов (от 1 до 8) из цифрового в аналоговый вид – токовый сигнал (допускается установка двух дешифраторов). Выбор и настройка диапазона каналов происходит при программировании преобразователя и определяется заказчиком на стадии формирования технического задания и изменению пользователем не подлежит.

3. Стационарный быстродействующий газоанализатор «АНГОР-С» (разработчик и производитель – фирма аналитического приборостроения «Информ-аналитика» (г. Санкт-Петербург)) осуществляет контроль процентного содержания в уходящих газах O<sub>2</sub>, CO и NO. Газоанализатор выполнен в виде двух блоков: блока датчиков (БД) и блока индикации и управления (БИУ).

Дополнительно в состав газоанализатора может входить шкаф (щит) пневматики для управления подачей калибровочных смесей в газоанализатор, а также сетевой источник питания для формирования напряжения питания 24 В.

Принцип действия газоанализатора основан на измерении сигналов электрохимических чувствительных элементов (сенсоров). Тип применяемого сенсора определяется газом, подлежащим контролю.

Способ пробоподготовки – фильтрация и нагрев до температуры выше точки росы, подача пробы к газоанализатору – диффузионная или за счет динамического давления потока анализируемого газа в газоходе.

Рассмотрим устройство и конструкцию газоанализатора «АНГОР-С». Блок датчиков предназначен для отбора, подготовки и транспортировки анализируемой пробы к измерительным датчикам концентраций, обработки сигналов датчиков и формирования выходного цифрового сигнала, содержащего информацию об измеряемых компонентах и функциональном состоянии основных элементов БД. Сигналы датчиков поступают в многоканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), обрабатываются микроконтроллером, после чего рассчитанные значения концентраций, а также необходимые диагностические сигналы

выводятся на последовательный цифровой порт RS485 для передачи во внешнее устройство индикации и управления – БИУ. БД включает в себя пробоотборный зонд с крепежным фланцем.

Анализируемая часть потока дымовых газов при помощи трубки зонда перенаправляется к газовым сенсорам, отделенным от анализируемой среды фильтром из многослойной стальной сетки. В качестве датчика кислорода используется твердоэлектродный потенциометрический сенсор на основе циркониевой керамики, в качестве сенсоров CO и NO – высокотемпературные электрохимические сенсоры.

БИУ предназначен для индикации измеренных значений концентраций, аварийных и прочих диагностических сигналов газоанализатора, а также для управления процедурой калибровки и формирования выходных сигналов для вторичных регистрирующих приборов и исполнительных механизмов.

**Выводы и обсуждение.** Представленное описание оборудования производственно-экологического мониторинга позволяет провести экспертное сравнение технических характеристик газоанализаторов [11]. Далее, опираясь на методы обоснования решений по выбору состава оборудования в инновационных проектах [12–14], представлены выводы и обсуждение результатов анализа, выполненного по 11 экспертно-значимым параметрам.

1. По номенклатуре контролируемых газов по предпочтениям на одном уровне находятся стационарный многокомпонентный газоанализатор техноэкологического контроля АНК-410 и стационарный газоанализатор ПЭМ-2М, удовлетворяющие требованиям НТД по перечню контролируемых газов.

Для полного выполнения требований нормативно-технической документации (НТД) по перечню контролируемых газов наряду с применением стационарного быстродействующего газоанализатора «АНГОР-С» необходимо применение дополнительно газоанализатора, измеряющего содержание двуокиси серы.

Необходимо отметить, что фирма аналитического приборостроения «Информаналитика» (г. Санкт-Петербург) выпускает целую линейку электрохимических первичных преобразователей концентрации диоксида серы (сенсоры) для применения в приборах газового анализа других производителей.

2. Наиболее высокий средний срок службы датчиков (электрохимических ячеек) – у стационарного многокомпонентного газоанализатора техноэкологического контроля АНК-410 (разработчик и производитель – ФГУП «СПО «Аналитприбор» (г. Смоленск)). Данные по среднему сроку службы в документации на стационарный быстродействующий газоанализатор «АНГОР-С» (разработчик и производитель – фирма аналитического приборостроения «Информаналитика» (г. Санкт-Петербург)) отсутствуют.

3. Показатели диапазона температуры окружающей среды для нормальной работы газоанализатора самые высокие у быстродействующего газоанализатора «АНГОР-С» (разработчик и производитель – фирма аналитического приборостроения «Информаналитика» (г. Санкт-Петербург)).

4. Одним из важнейших параметров в условиях рыночной экономики являются трудозатраты на обслуживание. Этим параметром для всех типов газоанализаторов является время работы газоанализаторов без корректировок (чем меньше трудозатраты на проведение данной операции, тем эффективнее). Чем больше время работы газоанализатора без корректировки, тем лучше. Самый большой срок работы без корректировки – у газоанализаторов стационарного многокомпонентного газоанализатора техноэкологического контроля АНК-410 (разработчик и производитель – ФГУП «СПО «Аналитприбор» (г. Смоленск)) – 6 месяцев.

5.1. Диапазон измерения содержания кислорода в уходящих газах всех без исключения газоанализаторов соответствует требованиям нормативных документов по организации измерений содержания кислорода в уходящих газах.

5.2. Самый широкий диапазон измерения содержания угарного газа в уходящих газах составляет у стационарного многокомпонентного газоанализатора техноэкологического контроля АНК-410 (разработчик и производитель – ФГУП «СПО «Аналитприбор» (г. Смоленск)) – 0–4000 мл<sup>н</sup>.

5.3. С диапазоном измерения 0–4000 мл<sup>н</sup> содержания окисей азота в уходящих газах лидируют: стационарный многокомпонентный газоанализатор техноэкологического контроля АНК-410 (разработчик и производитель – ФГУП «СПО «Аналитприбор» (г. Смоленск)) и стационарный газоанализатор ПЭМ-2М (разработчик и производитель – АО «Проманалитприбор» (г. Бердск)).

5.4. Наиболее широкий диапазон 0–5000 мл<sup>н</sup> измерений содержания окисей серы – у стационарного газоанализатора ПЭМ-2М (разработчик и производитель – АО «Проманалитприбор» (г. Бердск)). Необходимо отметить, что газоанализаторы обоих производителей укладываются в требования нормативных документов к этой технической характеристике.

6. Опция по наличию выходных аналоговых сигналов реализована только в двух газоанализаторах: в стационарном многокомпонентном газоанализаторе техноэкологического контроля АНК-410 (разработчик и производитель – ФГУП «СПО «Аналитприбор» (г. Смоленск)) с формированием выходных аналоговых сигналов двух типов – 0–5 мА и 4–20 мА, и в стационарном быстродействующем газоанализаторе «АНГОР-С» (разработчик и производитель – фирма аналитического приборостроения «Информаналитика» (г. Санкт-Петербург)) с формированием выходного аналогового сигнала 4–20 мА. Необходимо отметить, что благодаря наличию данных выходных сигналов вышеназванные газоанализаторы могут использоваться для интеграции в общеширокую АСУТП с подключением в модули аналогового ввода устройств связи с объектом (УСО).

7. Опция по наличию выходных дискретных сигналов реализована только в стационарном многокомпонентном газоанализаторе техноэкологического контроля АНК-410 (разработчик и производитель – ФГУП «СПО «Аналитприбор» (г. Смоленск)). Необходимо отметить, что благодаря наличию данных

выходных сигналов вышеназванный газоанализатор может использоваться для интеграции в общешлюзовую АСУТП с подключением в модули дискретного ввода УСО.

8. Все три газоанализатора имеют цифровой выход с интерфейсом RS-485. Стационарный многокомпонентный газоанализатор техноэкологического контроля АНК-410 (разработчик и производитель – ФГУП «СПО «Аналитприбор» (г. Смоленск)) имеет цифровой выход с интерфейсом RS-232. Производителями стационарного быстродействующего газоанализатора «АНГОР-С» (разработчик и производитель – фирма аналитического приборостроения «Информаналитика» (г. Санкт-Петербург)) и стационарного многокомпонентного газоанализатора техноэкологического контроля АНК-410 (разработчик и производитель – ФГУП «СПО «Аналитприбор» (г. Смоленск)) определен протокол обмена ModBus RTU.

9. Самый высокий уровень защиты ПО от непреднамеренных и преднамеренных изменений, соответствующий уровню защиты «А» в соответствии с МИ 3286–2010 (не требуется специальных средств защиты, исключающих возможность несанкционированной модификации, обновления (загрузки), удаления и иных преднамеренных изменений метрологически значимой части ПО СИ и измеренных данных), выполнен в ПО стационарного многокомпонентного газоанализатора техноэкологического контроля АНК-410 (разработчик и производитель – ФГУП «СПО «Аналитприбор» (г. Смоленск)).

У стационарного газоанализатора ПЭМ-2М (разработчик и производитель – АО «Проманалитприбор» (г. Бердск)) выполнен уровень «В» защиты встроенного ПО в соответствии с Р 50.2.077–2014.

В документации на стационарный быстродействующий газоанализатор «АНГОР-С» (разработчик и производитель – фирма аналитического приборостроения «Информаналитика» (г. Санкт-Петербург)) отсутствует определение уровня защиты встроенного ПО в соответствии с вышеуказанными документами, хотя в состав данного газоанализатора входит микроконтроллер собственной разработки и производства.

10. Все газоанализаторы по такой технической характеристике, как наработка на отказ, находятся в равном положении со сроком в 15 000 ч.

11. По назначенному сроку службы самый высокий показатель 10 лет – у стационарного многокомпонентного газоанализатора техноэкологического контроля АНК-410 (разработчик и производитель – ФГУП «СПО «Аналитприбор» (г. Смоленск)).

**Заключение.** Таким образом, проведенный экспертный анализ может дополнить результаты предварительного обследования персоналом ТЭС или специализированной организацией, осуществляющей проектирование СНМВ ТЭС, используемые при разработке технического задания. В частности, исходя из сравнения вышеперечисленных характеристик, лучшим по техническим характеристикам и архитектуре для применения в системах производственно-экологического мониторинга уходящих газов пылеугольных тепловых электростанций является стационарный

многокомпонентный газоанализатор техноэкологического контроля АНК-410 (разработчик и производитель – ФГУП «СПО «Аналитприбор» (г. Смоленск)). При этом необходимо учесть, что проектирование СНМВ ТЭС на основании утвержденного технического задания осуществляется в соответствии с действующими нормативными документами [15]. Рекомендуется выполнять технико-экономическое обоснование принимаемых решений с учетом особенностей оборудования, условий производства, требований безопасности и удобства обслуживания.

**Благодарности.** Представленные авторами результаты получены при выполнении проекта № 18-48-240007 в рамках конкурса РФФИ – Красноярский край – р\_а (Соглашение № 228 между Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Красноярского края о проведении региональных конкурсов проектов фундаментальных научных исследований от 22 декабря 2015 года).

**Acknowledgements.** The results presented by the authors were obtained in the performance of project No. 18-48-240007 within the framework of the RFBR contest – Krasnoyarsky Krai – p\_a (Agreement No. 228 between the Russian Foundation for Basic Research and the Government of Krasnoyarsk Krai on holding regional competitions for projects of fundamental researches dated 22 December 2015).

#### Библиографические ссылки

1. Росляков П. В., Кондратьева О. Е. Первоочередные мероприятия по реализации нового экологического законодательства // Новое в российской электроэнергетике. 2016. № 5. С. 6–17.
2. Система непрерывного контроля (мониторинга) и регулирования вредных газообразных выбросов ТЭС в атмосферу / П. В. Росляков [и др.] // Записки Горного института. 2003. Т. 154. С. 94–96.
3. Организация мониторинга вредных выбросов из дымовых труб ТЭС на основе численных исследований / П. В. Росляков [и др.] // Вестник МЭИ. 2008. № 4. С. 28–39.
4. Информационно-вычислительный комплекс системы непрерывного мониторинга и регулирования выбросов ТЭС / П. В. Росляков [и др.] // Записки Горного института. 2004. № 158. С. 126–128.
5. Борисов Г. М., Балтян В. Н., Скубиенко С. В. Специфика предприятий электрических сетей как источников выбросов вредных веществ в атмосферу // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2003. № 2. С. 51–53.
6. Росляков П. В. Методы защиты окружающей среды. М. : Издат. дом МЭИ, 2007. 336 с.
7. Организация контроля газового состава продуктов сгорания стационарных паровых и водогрейных котлов : СО 34.02.320–2003. М. : СПО ОРГРЭС, 2003.
8. Нормы погрешности измерений технологических параметров тепловых электростанций и подстанций : РД 34.11.321–96. М. : ВТИ, 1997.

9. Кондратьева О. Е. Основные подходы к созданию систем мониторинга воздействия ТЭС на окружающую среду // Энергетик. 2016. № 12. С. 32–40.

10. Коробов В. Б., Тутыгин А. Г. Преимущества и недостатки метода анализа иерархий // Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. 2010. № 122. С. 108–115.

11. Степанов В. Р. Основы теории принятия решений. Экспериментальное учебное пособие. Чебоксары : Клио, 2004. 134 с.

12. Самков А. В., Зяткова А. В. Методы обоснования решений по выбору состава оборудования в инновационных проектах // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2015. № 3. С. 68–72.

13. Копотева А. В. Поддержка принятия решения о модернизации производства на промышленном предприятии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2014. № 325(6). С. 14–25.

14. Гулиева П. В. Кызы. Теоретико-методологические проблемы модернизации промышленных предприятий // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. 2015. № 6(2). С. 130–132.

15. Кондратьева О. Е., Росляков П. В. Основные стадии внедрения систем непрерывного контроля выбросов в атмосферу на ТЭС // Электрические станции. 2016. № 9. С. 25–29.

## References

1. Roslyakov P. V., Kondrat'yeva O. E. [Priority measures for the implementation of the new environmental legislation]. *New in the Russian electric power industry*. 2016, No. 5, P. 6–17 (In Russ.).

2. Roslyakov P. V., Zakirov I. A., Ionkin I. L., Egorova L. E., Karankevich E. N. [The system of continuous monitoring (monitoring) and control of harmful gaseous emissions of thermal power plants in the atmosphere]. *Zapiski Gornogo Instituta*. 2003, Vol. 154, P. 94–96 (In Russ.).

3. Roslyakov P. V., Novozhilova L. L., Egorova L. E. [Organization of monitoring of harmful emissions from chimneys of thermal power plants based on numerical studies]. *Vestnik MEI*. 2008, No. 4, P. 28–39 (In Russ.).

4. Roslyakov P. V., Ionkin I. L., Zakirov I. A., Morokhovets Yu. E., Egorova L. E. [Information and Computing System for Continuous Monitoring and Emission Control of Thermal Power Plants]. *Zapiski Gornogo instituta*. 2004, Vol. 158, P. 126–128 (In Russ.).

5. Borisov G. M., Baltyan V. N., Skubienko S. V. [The specifics of the enterprises of electrical networks as a source of emissions of harmful substances into the at-

mosphere]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki*. 2003, No. 2, P. 51–53 (In Russ.).

6. Roslyakov P. V. *Metody zashchity okruzhayushchey sredy* [Environmental Protection Methods]. Moscow, Izdatel'skii dom MEI Publ., 2007, 336 p. (In Russ.).

7. *Organizatsiya kontrolya gazovogo sostava produktov sgoraniya statsionarnykh parovykh i vodogreynykh kotlov : SO 34.02.320-2003* [Organization of control of the gas composition of products of combustion of stationary steam and hot water boilers : CO 34.02.320-2003]. Moscow, SPO ORGREHS Publ., 2003 (In Russ.).

8. *Normy pogreshnosti izmereniy tekhnologicheskikh parametrov teplovykh elektrostantsiy i podstantsiy : RD 34.11.321-96* [Error limits of measurement of technological parameters of thermal power plants and substations: RD 34.11.321-96]. Moscow, VTI Publ., 1997 (In Russ.).

9. Kondrat'yeva O. E. [The main approaches to the creation of systems for monitoring the impact of thermal power plants on the environment]. *Energetik*. 2016, No. 12, P. 32–40 (In Russ.).

10. Korobov V. B., Tutugin A. G. [Advantages and disadvantages of the hierarchy analysis method]. *Izvestiya Rossiiskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. A. I. Gertsena*. 2010, No. 122, P. 108–115 (In Russ.).

11. Stepanov V. R. *Osnovy teorii prinyatiya reshenii* [Basics of decision theory]. Cheboksary, Klio Publ., 2004, 134 p. (In Russ.).

12. Samkov A. V., Zyat'kova A. V. [Methods to justify decisions on the choice of equipment in innovative projects]. *Ventilyatsiya, otopeniye, konditsionirovaniye vozdukh, teplosnabzheniye i stroitel'naya teplofizika*. 2015, No. 3, P. 68–72 (In Russ.).

13. Kopoteva A. V. [Support decision making on the modernization of production at an industrial enterprise]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2014, Vol. 325, No. 6, P. 14–25 (In Russ.).

14. Gulieva P. V. Kyzy. [Theoretical and methodological problems of modernization of industrial enterprises]. *Gumanitarnye, sotsial'no-ehkonomicheskie i obshchestvennye nauki*. 2015, No. 6(2), P. 130–132 (In Russ.).

15. Kondrat'yeva O. E., Roslyakov P. V. [The main stages of the introduction of systems for continuous monitoring of emissions into the TPP]. *Elektricheskiye stantsii*. 2016, No. 9, P. 25–29 (In Russ.).

© Ковалев И. В., Ковалев Д. И., Колесник В. В.,  
Лосев В. В., Карасева М. В., 2018



УДК 544.623.032.52

Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-691-697

**Для цитирования:** Морозов Е. А., Трифонов С. В., Мурыгин А. В., Тихомиров А. А. Автоматическая система контроля концентраций  $O_2$  и  $H_2$  в технологических газовых контурах биотехнических систем жизнеобеспечения космического назначения // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 4. С. 691–697. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-691-697

**For citation:** Morozov Ye. A., Trifonov S. V., Murygin A. V., Tikhomirov A. A. [Automatic control system of  $O_2$  and  $H_2$  concentrations in technological gas circuits of BTLSS space application]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 4, P. 691–697 (In Russ.). Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-691-697

## АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ $O_2$ И $H_2$ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ КОНТУРАХ БИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Е. А. Морозов<sup>1,2\*</sup>, С. В. Трифонов<sup>1,2</sup>, А. В. Мурыгин<sup>2</sup>, А. А. Тихомиров<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт биофизики СО РАН

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/50

<sup>2</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: yegormorozov@ibp.ru

В Институте биофизики СО РАН разрабатывается физическая экспериментальная модель замкнутой экосистемы (ЭМЗЭ), моделирующей массообменные потоки в присутствии расчетной доли метаболизма человека. Модель создана с целью проверки совместимости звена высших растений с разрабатываемыми биологическим и физико-химическим звеньями переработки органических отходов. В этой связи ЭМЗЭ не содержит в себе ряд вспомогательных реакторов (разложения мочевины, нитрификации аммиака и синтеза перекиси водорода), непосредственное взаимодействие которых с растительным звеном либо исключено, либо не несет негативного воздействия на культивируемые растения. Отсутствие перечисленных реакторов ведет к дисбалансу потоков веществ в системе, в частности, образуется избыточный кислород в результате процесса «мокрого» сжигания органических отходов в перекиси водорода. Для компенсации модельного газового баланса разрабатывается специальный газовый контур, в котором кислород удаляется путем связывания с водородом, получаемым электролизом внесистемной воды. Для управления данным процессом разработана система автоматического контроля концентрации газов, позволяющая без присутствия оператора поддерживать концентрацию водорода в безопасном диапазоне, останавливать процесс при достижении заданной концентрации кислорода, а также записывать показания датчиков в базу данных для дальнейшей обработки. Помимо предложенного методологического подхода в работе с ЭМЗЭ разработанная система управления может быть использована в полномасштабных биотехнических системах жизнеобеспечения для контроля состава кислород/водородсодержащей газовой среды в газовых контурах других физико-химических технологических процессах, например, при синтезе перекиси водорода и нитрификации аммиака.

**Ключевые слова:** замкнутые системы жизнеобеспечения, круговорот, «мокрое» сжигание, автоматизация, переработка отходов, анализ газа, контроль состава атмосферы.

## AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF $O_2$ AND $H_2$ CONCENTRATIONS IN TECHNOLOGICAL GAS CIRCUITS OF BTLSS SPACE APPLICATION

Ye. A. Morozov<sup>1,2\*</sup>, S. V. Trifonov<sup>1,2</sup>, A. V. Murygin<sup>2</sup>, A. A. Tikhomirov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Biophysics SB RAS

50/50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: yegormorozov@ibp.ru

The Institute of Biophysics SB RAS is developing a physical experimental model of a closed ecosystem (EMCS) simulating mass-exchange flows in the presence of a calculated proportion of human metabolism. The model is designed to check the compatibility of the higher plant link with the biological and physicochemical links in the processing of organic wastes that are being developed. In this connection, the EMCS does not contain a number of auxiliary reactors (decomposition of urea, nitrification of ammonia and synthesis of hydrogen peroxide), the direct interaction of

*which with the plant link is either excluded, or do not have a negative impact on cultivated plants. The absence of these reactors leads to an imbalance in the flow of substances in the system; in particular, excess oxygen is formed as a result of the process of "wet combustion" of organic wastes in hydrogen peroxide. To compensate for the model gas balance, a special gas circuit is developed in which oxygen is removed by binding to hydrogen obtained by electrolysis of off-system water. To control this process, an automatic gas concentration monitoring system has been developed that allows maintaining the concentration of hydrogen in a safe range without an operator's presence, stopping the process by achieving the required oxygen concentration, and also recording the sensor readings into the database for further processing. In addition to the proposed methodological approach, the developed control system can be used in full-scale biotechnical life-support systems to monitor the oxygen / hydrogen composition of a gas medium in a gas circuit of other physicochemical processes, for example, in the synthesis of hydrogen peroxide and ammonia nitrification.*

*Keywords: closed life support systems, turnover, wet combustion automation, waste treatment, gas analyses, atmosphere composition control.*

**Введение.** В Институте биофизики СО РАН, где находится базовая кафедра ЗЭС СибГУ им. М. Ф. Решетнева, ведутся эксперименты по гранту РНФ 14-14-00599(П) с экспериментальной моделью замкнутой экосистемы (ЭМЗЭ) [1–9]. Целью экспериментов является тестирование совокупности технологий нового поколения [10] для вовлечения отходов жизнедеятельности человека в круговорот биотехнической системы жизнеобеспечения (БТСЖО) [2; 3] в течение нескольких месяцев. ЭМЗЭ включает звено высших растений и имитирует 6 % газообмена человека и 8 % массообмена с вовлечением в него органических отходов. Одной из задач данного эксперимента является проверка динамики состава атмосферы замкнутой камеры с конвейером культурных растений с целью определения возможных потенциально опасных газовых микропримесей [7] в накопительном режиме [2; 3] для планируемого полномасштабного эксперимента БИОС-4, включающего человека, а также исследования возможных дисбалансов газового состава. В случае обнаружения таковых необходимо будет предложить пути их устранения.

Для утилизации плотных и жидких выделений человека в ЭМЗЭ используется метод «мокрого» сжигания в водном растворе  $H_2O_2$  под действием переменного тока [4; 5]. До сих пор открытым является вопрос методов синтеза перекиси водорода для работы реактора [10]. В данной экспериментальной модели ЗЭС, рассчитанной на включение доли метаболизма человека, перекись водорода вносилась извне, что приводило к выделению избыточного количества  $O_2$  в атмосферу камеры при утилизации отходов человека. Это связано с тем, что при окислении отходов порядка 20–40 %  $H_2O_2$  распадается до воды и кислорода, не вступая в реакцию с органическим веществом. В полномасштабной системе этот избыточный кислород будет вновь использован для синтеза перекиси водорода.

Для регуляции газообмена по кислороду в ЭМЗЭ необходимо разработать физико-химический метод фиксации кислорода из газовой среды. В качестве такого способа предложен контур переработки газов, в котором избыточный кислород каталитически связывается с водородом, получаемым электролизом внесистемной воды. Далее синтезируемая вода может мерно изыматься из системы, и таким образом избыточный кислород в составе воды выводится из массообмена. Для регуляции концентраций газов в таком

газовом контуре и предотвращения детонации взрывоопасной в широком диапазоне концентраций смеси  $O_2$  и  $H_2$  должна быть разработана система автоматического управления работой контура переработки газов, способная снижать концентрацию кислорода до заданных значений в безопасном режиме.

Целью данного исследования является определение кинетических характеристик каталитического процесса связывания кислорода с водородом в газовой среде и создание системы автоматического контроля работы контура переработки газов.

**Контур переработки газов.** Для определения кинетических характеристик каталитического процесса связывания кислорода с водородом был создан экспериментальный газовый контур, в котором газ из реактора «мокрого» сжигания рабочим объемом 0,25 л после фиксации аммиака в кислоте [7] поступает в газгольдер, подключенный к замкнутому контуру переработки газа (рис. 1). В контуре газ циркулирует с заданной скоростью (1 л/мин) при использовании насоса и ротаметра. Избыточный кислород реагирует с водородом в каталитической камере объемом 35 мл за счет контакта с платиновым катализатором площадью 80  $cm^2$ , нагретым до температуры 600–650 °С. На платиновом катализаторе также происходит окисление органических примесей за исключением метана, накопление которого в ЭМЗЭ в течение нескольких месяцев не приводит к негативному влиянию на растения, а его концентрация не превышает 0,1 об. % в ЭМЗЭ при ее функционировании в течение года. Параметры каталитической камеры обеспечивают время контакта с катализатором в течение 2 с при скорости потока газа 1 л/мин.

Водород поступает в контур из U-образного электролизера, объемом 350 мл, в котором содержится водный раствор КОН с концентрацией 355,8 г/л. Сила тока, проходящего через электролизер, в соответствии со вторым законом электрохимии [11] пропорциональна скорости поступления водорода в контур и в условиях стационарной концентрации водорода определяет скорость связывания кислорода.

Для определения зависимости скорости фиксации кислорода от силы тока в электролизере был проведен эксперимент по снижению концентрации кислорода в 5 л газа в режиме стационарной концентрации водорода – 1,45–1,50 об. %. Для обеспечения данной концентрации водорода через электролизер пропускали

ток 1,5 А. Чтобы избежать эффекта влияния изменения объема газа, концентрацию  $O_2$  снижали с 20 до 18 об. % (рис. 2). Результаты данного эксперимента показали, что зависимость скорости фиксации от тока составляет 0,09 л/(ч·А). Таким образом, можно рассчитать силу тока в электролизере, необходимую для снижения в течение суток концентрации кислорода в суточной норме газа из реактора «мокрого» сжигания, поступающего в ЭМЗЭ.

Для поддержания заданной расчетной доли метаболизма человека в массообменном цикле ЭМЗЭ тре-

буется ежесуточная переработка 250 мл раствора экзометаболитов человека и перекиси водорода. Объем выделяющегося газа при минерализации 250 мл данной смеси составляет  $18 \pm 1$  л. В его состав входит в основном кислород (68 об. %), водород (28 об. %) и углекислый газ (4 об. %), а также примеси летучих органических соединений [7]. Для снижения концентрации кислорода с 68 до 10 об. % в данном объеме газа в течение суток, в условиях стационарной концентрации водорода необходим ток в электролизере, равный 6 А.

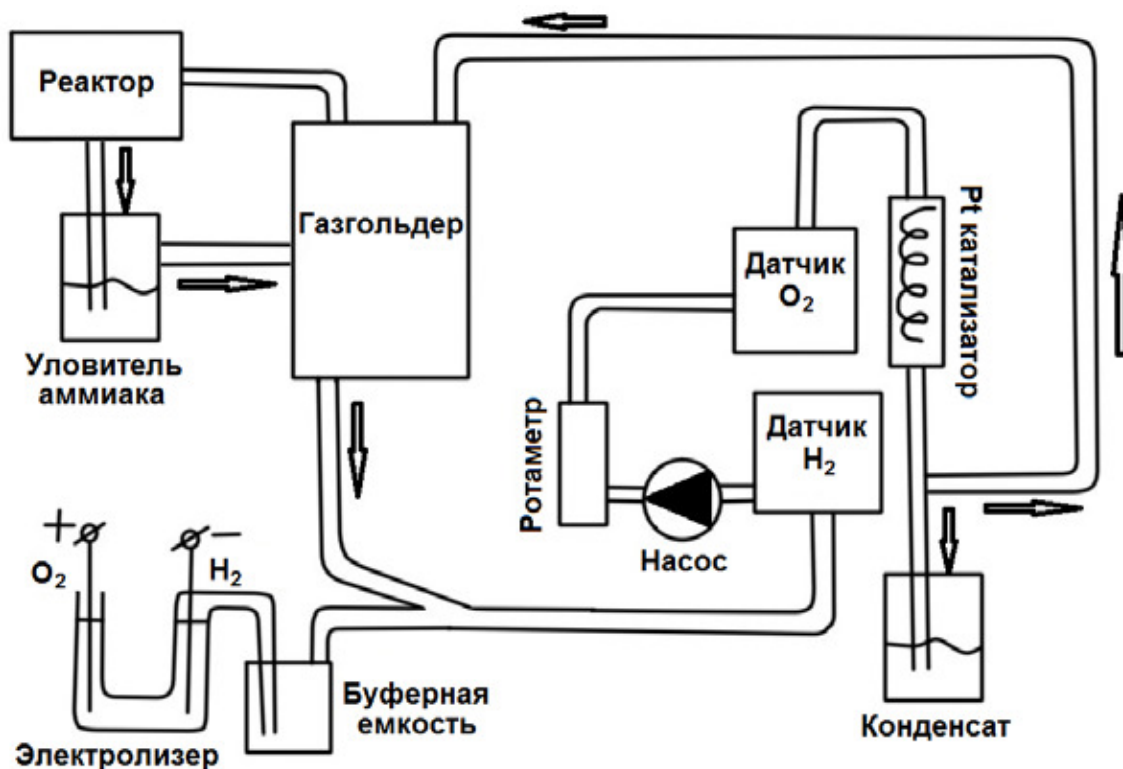


Рис. 1. Схема устройства контура переработки газа из реактора «мокрого» сжигания

Fig. 1. Scheme of the installation of the gas processing circuit from the “wet” combustion reactor

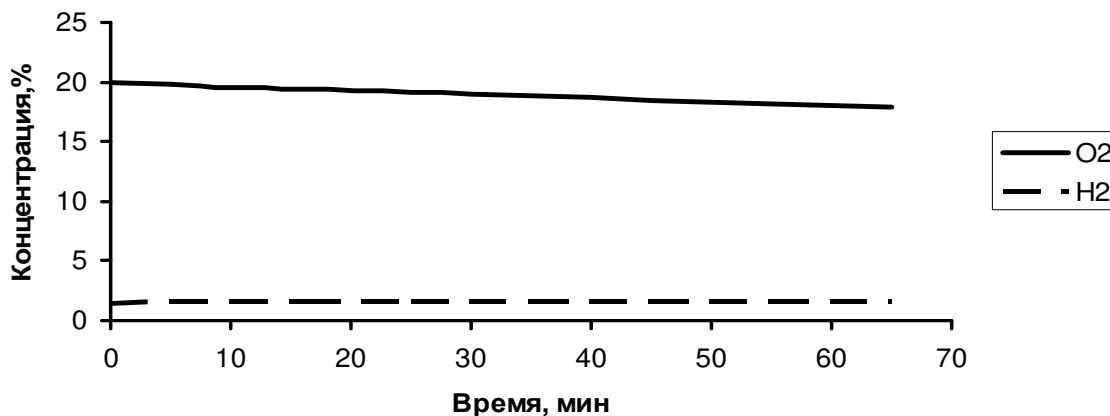


Рис. 2. Кинетические характеристики каталитического процесса связывания кислорода с водородом

Fig. 2. The kinetic characteristics of the catalytic process of oxygen binding to hydrogen

**Система автоматического контроля работы контура переработки газов.** Смесь  $O_2$  и  $H_2$  взрывоопасна в широком диапазоне концентраций – от 4 до 70 об. % водорода. Поэтому для предотвращения взрывов в процессе связывания кислорода была организована система контроля концентрации водорода в газовом контуре посредством включения и выключения электролизера в зависимости от показаний датчика водорода (см. рис. 1). Процесс переработки газа завершается при достижении заданного значения концентрации кислорода в соответствии с показаниями датчика кислорода (см. рис. 1): происходит отключение электролизера, каталитической камеры и насоса. Алгоритм работы автоматической системы представлен на рис. 3.

Аппаратно-программный комплекс выполнен с помощью датчика «Верба-Д» серии ИГС-98 исполнения 009, предназначенного для непрерывного автоматического измерения концентрации водорода, и датчика «Клевер-Д» серии ИГС-98 исполнения 021,

предназначенного для непрерывного автоматического измерения концентрации кислорода (рис. 4). Данные датчики подключены к системе контроля загазованности А-4М, предназначенной для непрерывного контроля и измерения численных значений концентраций газов в атмосфере рабочей зоны (рис. 4). Для отслеживания и фиксации в базу данных показаний с датчиков в реальном времени было осуществлено подключение к компьютеру через COM-порт с помощью конвертера сигнала RS232-RS485 [12]. Для дальнейшей обработки необходимые показания из базы данных можно вывести в файл Microsoft Excel [13].

Эксперименты, моделирующие пороговые условия, с электролизером и датчиками на водород и кислород показали, что система автоматического контроля способна успешно поддерживать концентрацию  $H_2$  в контуре в безопасном диапазоне 1,5–2,5 об. % (рис. 3) и завершать работу контура при достижении целевого значения концентрации кислорода.

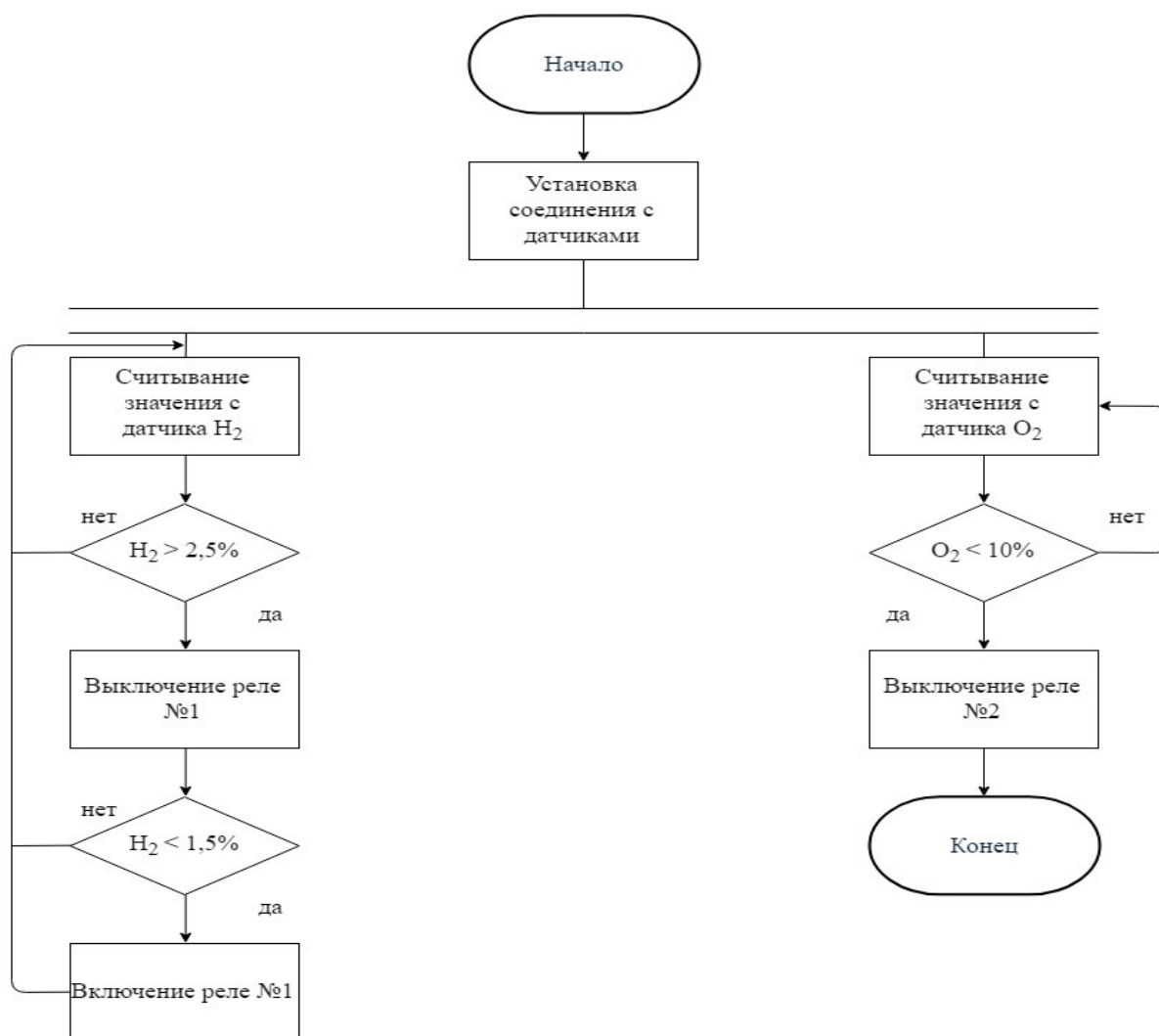


Рис. 3. Алгоритм работы автоматической системы управления контуром переработки газа

Fig. 3. The algorithm of the automatic control system of the gas processing circuit

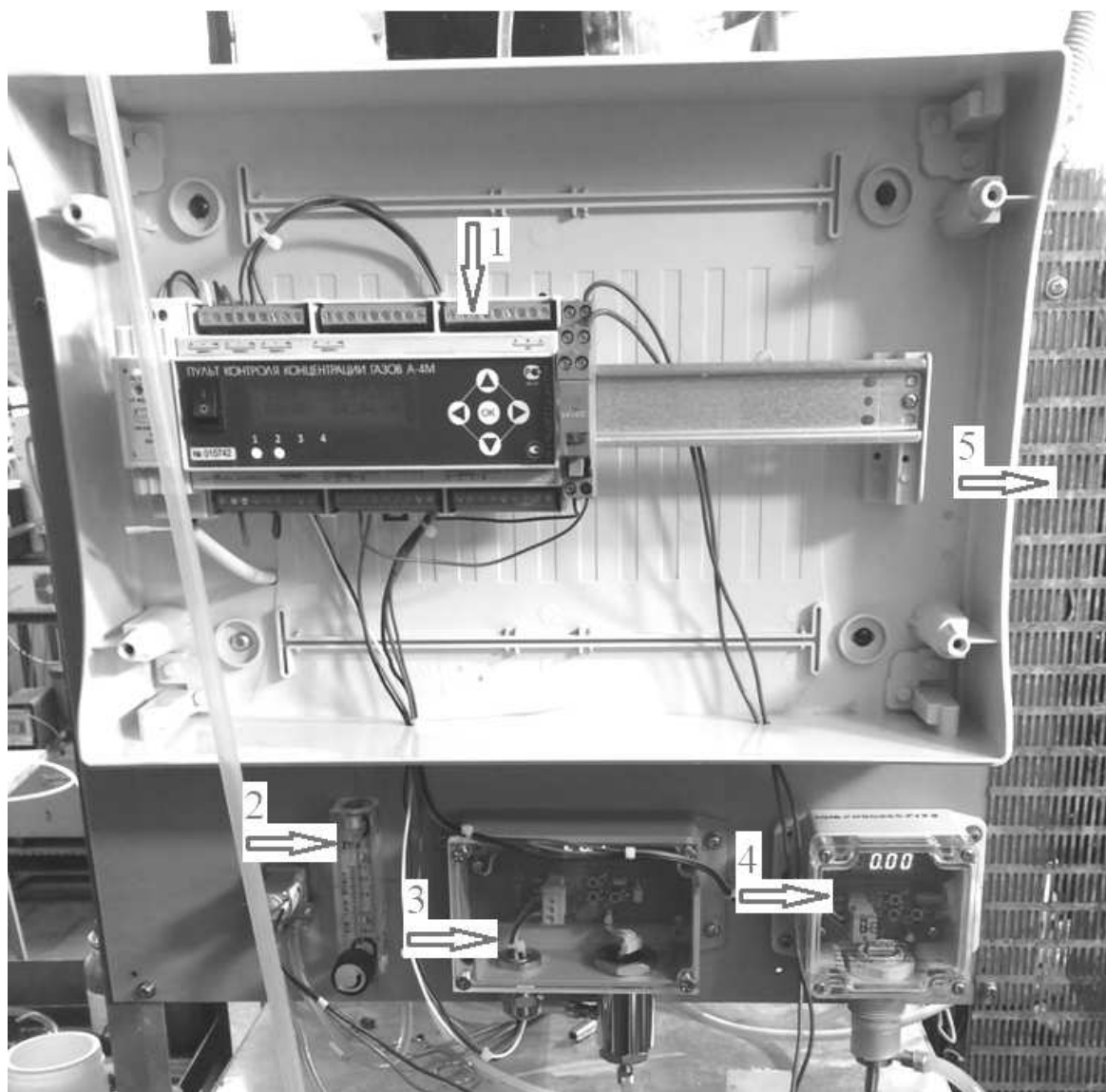


Рис. 4. Фрагмент системы автоматического контроля работы контура переработки газов:  
1 – пульт контроля А-4М; 2 – ротаметр; 3 – датчик кислорода «Клевер-Д»;  
4 – датчик водорода «Верба-Д»; 5 – каталитическая камера

Fig. 4. Fragment of the automatic control system of the gas processing circuit:  
1 – control panel A-4M; 2 – a rotameter; 3 – oxygen sensor “Klever-D”;  
4 – hydrogen sensor “Verba-D”; 5 – catalytic chamber

**Закключение.** Был сконструирован экспериментальный контур переработки газа из реактора «мокрого» сжигания и создана автоматизированная система контроля концентрации газов в данном контуре. Эксперименты по определению кинетических характеристик каталитического связывания кислорода с водородом показали, что для снижения концентрации кислорода в суточной норме газа из реактора «мокрого» сжигания, поступающего в ЭМЗЭ, требуется ток в электролизере, равный 6 А. Данное значение действительно для условий стационарной концентрации водорода, которая может быть установлена путем повышения скорости потока газа до 4 л/мин и достаточным временем контакта с катализатором. Поддержание концентрации водорода в безопасном диапазоне значений (в случае выхода контура переработки газа

из стационарного режима) завершение процесса и сохранение данных динамик концентраций газов может быть осуществлено разработанной автоматизированной системой контроля концентрации газов.

Созданная система контроля концентраций водорода и кислорода может быть также использована в замкнутых газовых контурах других физико-химических процессов полномасштабных БТСЖО, требующих определенных концентраций данных газов. Например, разрабатываемые процессы нитрификации аммиака [14] и синтеза перекиси водорода [15] могут требовать повышенных концентраций кислорода [16]. При соответствующем алгоритме работы система контроля способна поддерживать данные процессы, обеспечивая содержание кислорода в пределах требуемого диапазона.

**Благодарности.** Работы по созданию экспериментального контура переработки газов были выполнены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект 14-14-00599П) в ИБФ СО РАН. Работы по созданию цифровой системы записи данных датчиков контура переработки газов выполнены в рамках реализации интеграционного проекта № 5 (блок № 4) СО РАН и государственного задания ИБФ СО РАН по теме № 56.1.4. на 2013–2020 годы.

**Acknowledgements.** The work on creation of the gas treatment circuit was conducted with the financial support of the Russian Scientific Foundation grant (project 14-14-00599П) at IBP SB RAS. The works on creating the digital data recording system of the gas treatment circuit sensors readings were conducted in the framework of the integration project number 5 (unit number 4) of SB RAS and the Institute of Biophysics SB RAS on State task theme № 56.1.4. for 2013–2020.

### Библиографические ссылки

1. Biological life support systems for a Mars mission planetary base: Problems and prospects [Электронный ресурс] / А. А. Тихомиров [et al.] // *Advances in Space Research*. 2007. Vol. 40, iss. 11. P. 1741–1745. URL: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.11.009>.
2. Gitelson J. I., Lisovsky G. M., MacElroy R. Man-made Closed Ecological Systems. Taylor & Francis Inc., 2003. 400 p.
3. Замкнутая система: человек – высшие растения / под ред. Г. М. Лисовского. Новосибирск : Наука, 1979. 160 с.
4. Возможные пути включения экзометаболитов человека в массообмен биологической системы жизнеобеспечения / С. А. Ушакова [и др.] // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2009. Т. 43, № 2. С. 61–63.
5. Перспективы использования «мокрого» сжигания органических отходов в перексиде водорода для замкнутых систем жизнеобеспечения / С. В. Трифонов [и др.] // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2014. Т. 22, № 2. С. 203–208.
6. Разработка технологии минерализации рыбных отходов в реакторе «мокрого» сжигания для ЗЭС космического назначения / С. В. Трифонов [и др.] // *Сибирский журнал науки и технологий*. 2017. Т. 18, № 4. С. 949–955.
7. Assessing the feasibility of involving gaseous products resulting from physicochemical oxidation of human liquid and solid wastes in the cycling of a bio-technical life support system / A. Tikhomirov [et al.] // *Adv. in Space Res.* 2012. Vol. 49. P. 249–253.
8. Feasibility of incorporating all products of human waste processing into material cycling in the BTLSS [Электронный ресурс] / Ye. A. Morozov [et al.] // *Life Sciences in Space Research*. 2018. Vol. 18. P. 29–34. URL: <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2018.05.002>.
9. Барцев С. И. Отношение подобия и редукция сложности моделей экосистем // *Математическое моделирование в экологии : материалы конференции (ЭкоМатМод-2009)*. Пушино, 2009. С. 25–26.

10. Подсистема физико-химических реакторов минерализации отходов для биолого-технических систем жизнеобеспечения космического назначения / Е. А. Морозов [и др.] // *Сибирский журнал науки и технологий*. 2017. Т. 18, № 3. С. 585–591.

11. Скорчеллетти В. В. Теоретическая электрохимия. 4-е изд., испр. и доп. Л. : Химия, 1974. 568 с.

12. SN75185 Multiple RS-232 drivers and receivers. Texas Instruments SLLS181D [Электронный ресурс]. December 1994, revised January 2006. URL: [www.ti.com/lit/ds/symlink/sn75185.pdf](http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn75185.pdf).

13. Кильдишов В. Д. Использование приложения MS Excel для моделирования различных задач : практ. пособие. М. : Солон-Пресс, 2015. 160 с.

14. Оценка состава и токсичности газов для растений при физико-химической переработке экзометаболитов человека применительно к биолого-техническим СЖО [Электронный ресурс] / А. А. Тихомиров [и др.] // *Доклады Академии наук*. 2011. Т. 441, № 2. С. 266–268. URL: <http://dx.doi.org/10.1134/S1607672911060032>.

15. Электросинтез перекиси водорода из кислорода в газодиффузионных электродах в растворах минерализованных экзометаболитов [Электронный ресурс] / Г. А. Колягин [и др.] // *Электрохимия*. 2013. Т. 49, № 10. С. 1120–1124. URL: <http://dx.doi.org/10.7868/S0424857013100095>.

16. Schumb W. C., Satterfield C. N., Wentworth R. L. Hydrogen peroxide // A. C. S. Monograph No. 128. New York : Reinhold Publishing Corporation, 1955. 759 p.

### References

1. Tikhomirov A. A., Ushakova S. A., Kovaleva N. P., Lamaze B., Lobo M., Lasseur Ch. Biological life support systems for a Mars mission planetary base: Problems and prospects. *Advances in Space Research*, 2007, Vol. 40, Iss. 11, P. 1741–1745. URL: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.11.009>.
2. Gitelson J. I., Lisovsky G. M., MacElroy R. Man-made Closed Ecological Systems. Taylor & Francis Inc., 2003. 400 p.
3. Lisovsky G. M. et al. *Zamknutaya sistema: chelovek – vysshie rastenya* [A closed system: human – higher plants]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979, P 160.
4. Ushakova S. A., Tikhomirov A. A., Kudenko Yu. A., Tikhomirova N. A., Anischenko O. V. [Possible ways of human exometabolites inclusion into mass turnover of biological life support systems]. *Aerospace and ecological medicine*. 2009, Vol. 43, No. 2, P. 61–63 (In Russ.).
5. Trifonov S. V., Kudenko Yu. A., Tikhomirov A. A., Klevetz V. V. [Prospects for using wet incineration of organic waste in hydrogen peroxide for closed life support systems]. *Khimia v interesakh ustoichivogo razvitiya*. 2014, Vol. 22, No. 2, P. 203–208 (In Russ.).
6. Trifonov S. V., Morozov Ye. A., Murygin A. V., Tikhomirov A. A. Development of fish wastes mineralization technology in “wet combustion” reactor for space application CES. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 949–955 (In Russ.).
7. Tikhomirov A., Kudenko Yu., Trifonov S. et al. Assessing the feasibility of involving gaseous products re-

sulting from physicochemical oxidation of human liquid and solid wastes in the cycling of a bio-technical life support system. *Adv. in Space Res.* 2012, Vol. 49, P. 249–253.

8. Morozov Ye. A., Trifonov S. V., Ushakova S. A., Anishchenko O. V., Tikhomirov A. A. Feasibility of incorporating all products of human waste processing into material cycling in the BTLSS. *Life Sciences in Space Research.* 2018, Vol. 18, P. 29–34. URL: <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2018.05.002>.

9. Bartsev S. I. [Similarity relationships and complexity reduction in ecosystems models]. *EcoMathMod 2009* [Materials Scientific Conf. “Mathematical modelling in ecology”]. Puschino, 2011, P. 25–26. (In Russ.).

10. Morozov Ye. A., Trifonov S. V., Saltykov M. Yu., Murygin A. V., Tikhomirov A. A. Physico-chemical waste mineralization reactors subsystem for closed bio technical life support systems for space application. *Siberian Journal of Science and Technology.* 2017, Vol. 18, No. 3, P. 585–591.

11. Scorchelletti V. V. Theoretical Electrochemistry. Ed. 4th, cor. and add. Leningrad: Chemistry, 1974, 568 p.

12. SN75185 Multiple RS-232 drivers and receivers. Texas Instruments SLLS181D. December 1994, revised January 2006. URL: [www.ti.com/lit/ds/sym-link/sn75185.pdf](http://www.ti.com/lit/ds/sym-link/sn75185.pdf).

13. Kildishov V. D. *Ispol'zovanie prilozheniya MS Excel dlya modelirovaniya razlichnykh zadach. Prakticheskoe posobie* [Use of MS Excel applications to simulate various tasks. Practical Manual]. Moscow, Solon-Press Publ., 2015, 160 p.

14. Tikhomirov A. A., Kudenko Yu. A., Degermendzhi A. G. et al. Assessment of Composition and Toxicity for Plants of Gases Produced during Physicochemical Processing of Human Exometabolites as Applied to Biotechnical Life Support Systems. *Doklady Biochemistry and Biophysics.* 2011, Vol. 441, No. 2, P. 266–268. URL: <http://dx.doi.org/10.1134/S1607672911060032>.

15. Kolyagin G. A., Kornienko V. L., Kudenko Yu. A., Tikhomirov A. A., Trifonov S. V. [Electrosynthesis of hydrogen peroxide from oxygen in gas-diffusion electrode in solutions of mineralized exometabolites]. *Russian Journal of Electrochemistry.* 2013, Vol. 49, No. 10, P. 1120–1124 (In Russ.). URL: <http://dx.doi.org/10.7868/S0424857013100095>.

16. Schumb W. C., Satterfield C. N., Wentworth R. L. Hydrogen peroxide. *A. C. S. Monograph.* 1955, No. 128, 759 p.

© Морозов Е. А., Трифонов С. В.,  
Мурыгин А. В., Тихомиров А. А., 2018

UDC 666.3.015

Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-698-702

**For citation:** Simunin M. M. [Features of synthesis of composite material based on silicon dioxide and carbon nanotubes]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 4, P. 698–702. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-698-702

**Для цитирования:** Симунин М. М. Особенности синтеза композиционного материала на основе диоксида кремния и углеродных нанотрубок // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 4. С. 698–702. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-698-702

## FEATURES OF SYNTHESIS OF COMPOSITE MATERIAL BASED ON SILICON DIOXIDE AND CARBON NANOTUBES

M. M. Simunin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Federal Research Center KSC SB RAS

50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

<sup>2</sup>Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

\*E-mail michanel@mail.ru

*Today, there are many papers showing the effectiveness of the use of carbon nanotubes as additives to composites. Their use in polymers is especially successful, but the efficiency of their use in ceramics poses many questions. The aim of the work was to study the effect of the addition of carbon nanotubes on the properties of ceramics. For this purpose, pure silica, obtained by the hydrolysis of tetraethoxysilane in an alkaline medium, was taken as a model. The obtained granules of the material were well sintered at 900 °C and it was decided to compound this material with carbon nanotubes. Depending on the method of introducing, the result turned out to be diametrically opposite. Nanotubes introduced during the synthesis of silica played a role in the formation of silicon dioxide grains and effectively compacted the material, increasing its hardness. On the contrary, nanotubes grown in ceramic pores wedged the grain of silicon dioxide, making the material softer. In the first case, it is important to note that the synthesis of ceramics is not affected by the synthesis of nanotubes. In turn, nanotubes always affect the process of forming ceramics. This influence leads to a change in the structure of the grains of ceramics, and as a consequence of the mechanism of interaction between them, which in turn changes the density and strength of the ceramics.*

*In the second case, in order to grow nanotubes in the pores and cavities of the ceramic material, one must first impregnate the ceramic material with a catalyst. Thus, there is a requirement for a precursor of the catalyst – the absence of its interaction with ceramics. The second requirement is for inertness of the ceramics, both to the catalyst and to the entire synthesis process. In addition, it is necessary that the structure of the pores does not change during the synthesis, i.e. they did not close during the synthesis of nanotubes, but provided transportation of the starting materials and reaction products.*

*Therefore two mechanisms that affect the formation of a composite ceramic material have been described. The described composite can be used in the rocket and space industry for compounding ceramic fairings and thermal insulation.*

*Keywords: quartz ceramics, carbon nanotubes, composite materials.*

## ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ И УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

М. М. Симунин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

\*E-mail michanel@mail.ru

*На сегодняшний день существует множество работ, показывающих эффективность использования углеродных нанотрубок в качестве присадок к композитам. Особенно удачно их применение в полимерах, однако эффективность их использования в керамиках оставляет много вопросов. Цель статьи – изучение влияния добавки углеродных нанотрубок на свойства керамики. Для этого в качестве модельной среды был взят чистый*



кремнезём, полученный методом гидролиза тетраэтоксисилана в щелочной среде. Полученные гранулы материала хорошо спекались при 900 °С, и было решено компаундировать этот материал углеродными нанотрубками. В зависимости от способа введения результат оказался диаметрально противоположным. Нанотрубки, вводимые в процессе синтеза кремнезёма, играли роль в формировании зёрен диоксида кремния и эффективно уплотняли материал, повышая его твёрдость. Напротив, нанотрубки, выращенные в порах керамики, расклинивали зёрна диоксида кремния, отчего материал становился мягче. В первом случае важно отметить, что на процесс формирования керамики не влияет синтез нанотрубок. В свою очередь, нанотрубки всегда влияют на процесс формирования керамики. Это влияние приводит к изменению структуры зёрен керамики и, как следствие, механизма взаимодействия между ними, что, в свою очередь, меняет плотность и прочность керамики.

Во втором случае, чтобы вырастить нанотрубки в порах и полостях керамического материала, нужно прежде напитать керамический материал катализатором. Таким образом, возникает требование к прекурсор катализатора – это отсутствие взаимодействия его с керамикой. Вторым требованием, очевидно, будет являться требование к инертности керамики, как к катализатору, так и ко всему процессу синтеза. Кроме того, необходимо, чтобы в процессе синтеза не менялась структура пор, т. е. они не закрывались в процессе синтеза нанотрубок, а обеспечивали транспорт исходных материалов и продуктов реакции.

Таким образом, были описаны два механизма, влияющие на формирование композитного керамического материала. Описываемый композит может быть использован в ракетно-космической отрасли для компаундирования керамических обтекателей и теплоизоляции.

**Ключевые слова:** кварцевая керамика, углеродные нанотрубки, композитные материалы.

**Introduction.** The unique properties of carbon nanotubes such as their strength and chemical resistance [1; 2] determine the interest in their use as an additive to various materials for the production of composites. At present time, there are a lot of works [3–8] showing the efficiency of the use of carbon nanotubes as additives to composites. Their application in polymers is especially successful [9–12], but the effectiveness of their use in ceramics leaves many questions. For example, direct mixing of ceramic particles with carbon nanotubes leads to a deterioration in the strength of a composite with an increase in the proportion of nanotubes [13] and only using them in materials with a large proportion of the amorphous phase, including glass and crystalline glass [14], increases the strength of such a composite.

**Materials used and experiment.** Carbon nanotubes were obtained from ethanol [15] on a  $[\text{Ni}(\text{NH}_3)_6]\text{Cl}_2$  precursor at a temperature of 600 °C.

As a model ceramics, we used quartz ceramics produced from a slurry of aqueous ammonia and tetraethoxysilane obtained by annealing in colloid suspension. The structure of such ceramics is grains of amorphous  $\text{SiO}_2$  (fig. 1) with the size of 200–500 nm. Ceramic material was obtained by hydrolysis of tetraethoxysilane followed by sol-gel precipitation and annealing at 900 °C.

Since the efficiency of direct mixing of nanotubes with ceramic particles does not always give an effective result, and it is very difficult to achieve uniformity of distribution of nanotubes in this case, the authors used only two methods, which guaranteed uniform mixing. On the one hand, carbon nanotubes can get into ceramics during its formation from a suspension, and on the other hand, carbon nanotubes can already be placed in ceramics by growing them in pores and cavities of the material.

To implant nanotubes into ceramics at the growth stage, the following method was used. The nanotubes were dispersed by ultrasound in 2-propanol to obtain a stable colloid. Then dispersion containing 0.1 mas. % of nanotubes was added to tetraethoxysilane in a volume

ratio of 1:10, respectively. After that, ammonia was added to the mixture, and the suspension was received by agitation. The suspension, after drying, was annealed at 900 °C.

The growth of nanotubes in ceramics was provided by introducing a catalyst into the pores of ceramics annealed at 900 °C and was carried out at a temperature of 600 °C from ethanol. The catalyst was added into ceramics by impregnating the finished material with a precursor.

**Results.** In fig. 2 photographs of received materials are presented. On the left, there is a composite obtained by synthesizing ceramics in a dispersion of carbon nanotubes, on the right, there is a composite with carbon nanotubes grown in the pores of ceramics.

As you can see, with the same amount of substance, completely different volumes of material are obtained. It should be noted that the density of ceramics obtained by synthesis from a dispersion with carbon nanotubes is less than without nanotubes (or with nanotubes grown in the pores of the finished ceramics). This decrease in density is determined by the addition of carbon nanotubes during the synthesis of ceramics and is explained by the fact that carbon nanotubes, having a high specific surface, lower the free energies of the formation of ceramics on their surface. Thus, they act as a catalyst for the growth of ceramics.

Measuring the hardness of ceramic composites clearly indicate the hardening of ceramics obtained on carbon nanotubes, compared with the original, at the same time, the growth of carbon nanotubes reduced the strength of carbon nanotubes (see table).

**Vickers ceramic hardness**

Type of ceramic	Vickers hardness number
Without CNT	300 MPa
Ceramics made with carbon nanotube dispersion	1 GPa
Ceramics with CNT grown in pores	200 MPa

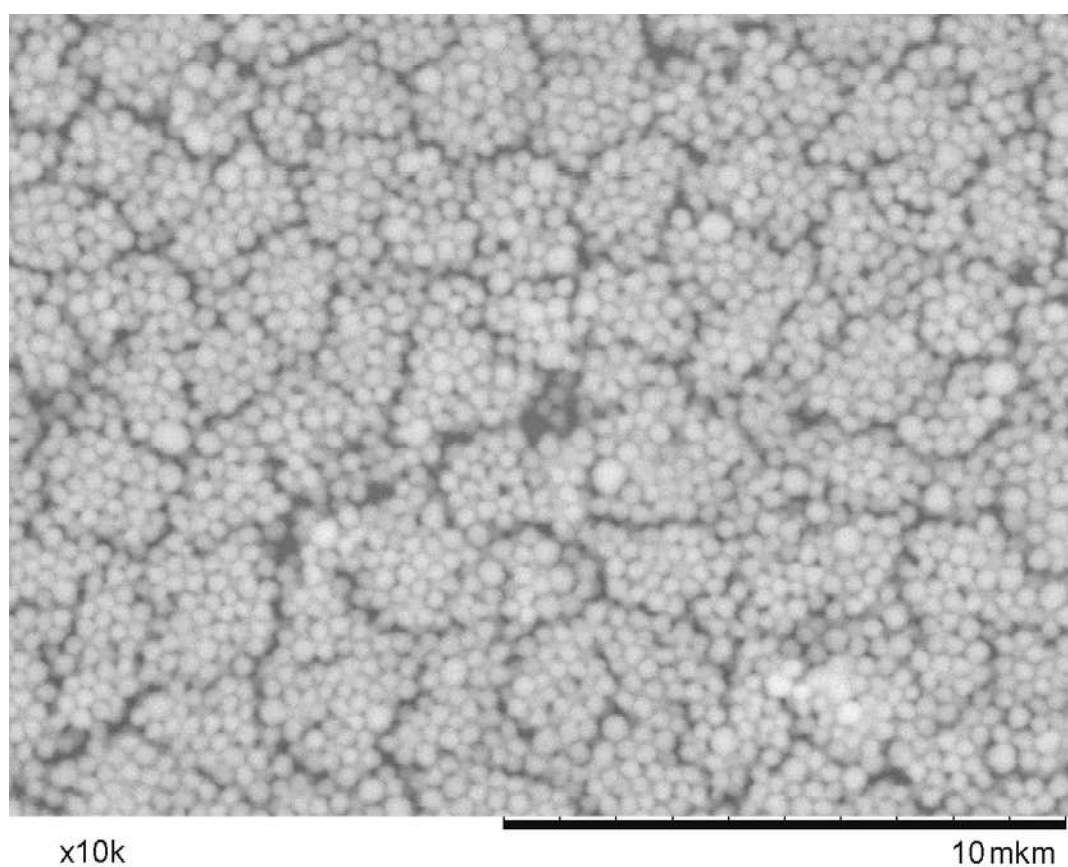


Fig. 1. Quartz ceramics. Scanning electron microscopy

Рис. 1. Кварцевая керамика. Растровая электронная микроскопия

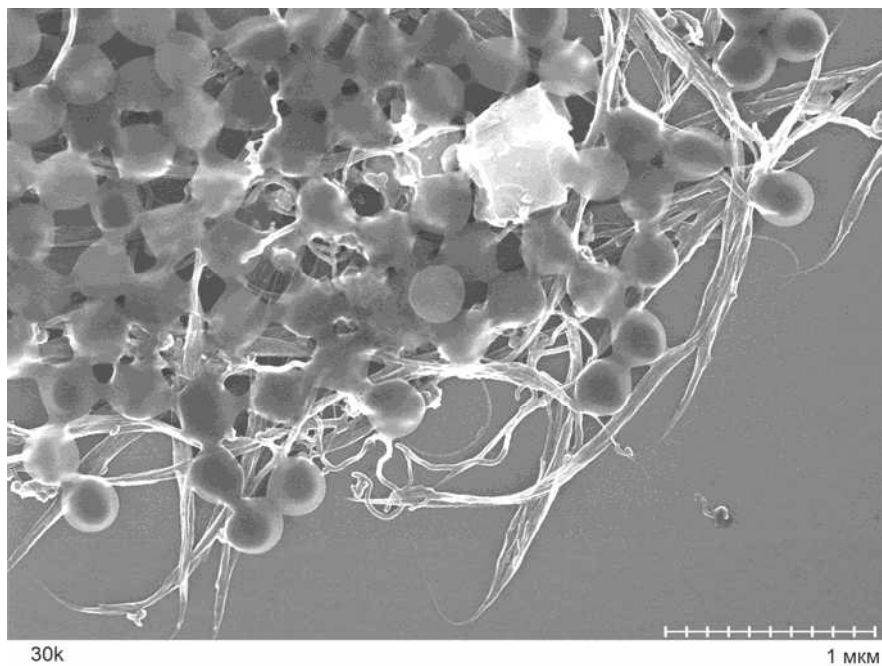


Fig. 2. Quartz ceramics, the samples of equal mass. On the left there is a composite obtained by synthesizing ceramics in a dispersion of carbon nanotubes, on the right there is a composite with carbon nanotubes grown in ceramic pores

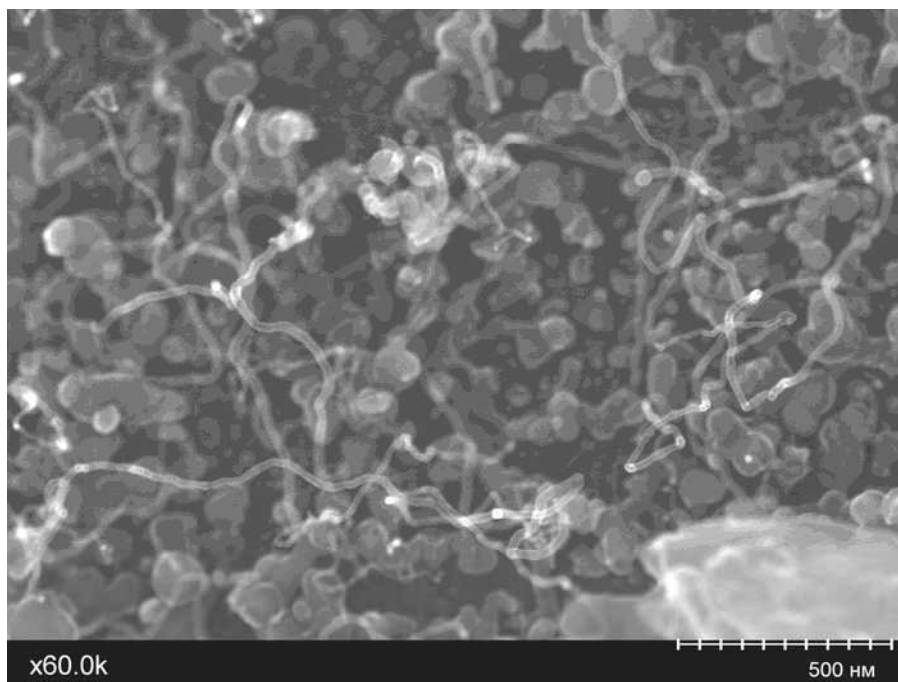
Рис. 2. Кварцевая керамика, образцы равной массы. Слева – композит, полученный синтезом керамики в дисперсии углеродных нанотрубок, справа – композит с углеродными нанотрубками, выращенными в порах керамики

A significant increase in the hardness of ceramics grown on the basis of carbon nanotubes (fig. 3, *a*) is explained by the more dense structure of the original ceramic grains, which was created by a matrix of carbon

nanotubes. That is in the colloid, the formation of silica particles proceeded not only in volume, but also on the surface of carbon nanotubes, which led to a significant compaction of the entire material after annealing.



*a*



*b*

Fig. 3. Composite based on quartz ceramics:  
*a* – ceramics obtained with carbon nanotubes; *b* – ceramics with grown carbon nanotubes in it

Рис. 3. Композит на основе кварцевой керамики:  
*a* – керамика, выращенная на основе углеродных нанотрубок;  
*б* – керамика с выращенными углеродными нанотрубками

The decrease in the hardness of ceramics with carbon nanotubes grown (fig. 3, b) compared to the initial one can be explained by the deformations in ceramics that occur with the growth of carbon nanotubes, which have a wedging effect on grains.

**Conclusion.** In this work, carbon nanotubes were placed in ceramics either during its formation from a suspension, or by growing them in pores and cavities of ceramics.

In the first case, it is important to note that the synthesis of nanotubes does not affect the formation of ceramics. Nanotubes always influence the process of forming ceramics. This influence leads to a change in the structure of the ceramic particles, and as a result of the mechanism of interaction among them, which changes the density and strength of ceramics.

In the second case, in order to grow nanotubes in the pores and cavities of a ceramic material, you should first saturate the ceramic material with a catalyst. Thus, there is a requirement for a catalyst precursor – the lack of its interaction with ceramics. The second requirement is the inertness of ceramics, both to the catalyst and to the entire synthesis process. In addition, it is necessary that the pore structure does not change during the synthesis, i.e. they did not close during the synthesis of nanotubes, but provided the transport of starting materials and reaction products.

### References

1. Iijima S. Helical microtubes of graphitic carbon. *Nature*. 1991, Vol. 354, P. 56–58.
2. Avouris Ph. Carbon nanotube electronics. *Chem Phys*. 2002, Vol. 281, P. 429–445.
3. Rupesh Khare, Suryasarathi Bose Carbon Nanotube Based Composites. *A Review Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*. 2005, Vol. 4, No. 1, P. 31–46.
4. Thostenson E. T., Ren Z. F., Chou T. W. Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review. *Compos Sci Technol*. 2001, Vol. 61, P. 1899–1912.
5. Subhranshu Sekhar Samal, Smrutisikha Bal Carbon Nanotube Reinforced Ceramic Matrix Composites: A Review. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*. 2008, Vol. 7, No. 4, P. 355–370.
6. Rul S., Lefevre-schlick F., Capria E., Laurent Ch., Peigney A. Percolation of single-walled carbon nanotubes in ceramic matrix nanocomposites. *Acta Materialia*. 2004, Vol. 52, P. 1061–1067.
7. Xiaotong Wang, Nitin Padture and Hidehiko Tanaka, Contact damageresistant ceramic/single-wall carbon nanotubes and ceramic/graphite composites. *Nature Materials*. 2004, Vol. 3, P. 539–544.
8. Thostenson E. T., Ren Zhifeng, Tsu-Wei Chou. Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites. *Composite Science and Technology*. 2001, Vol. 61, P. 1899–1912.
9. Podgaetsky V. M. Savranskii V. V. Simunin M. M. Kononov M. A. Laser-induced preparation of volume nanocompositions in aqueous albumin solutions. *Quantum Electronics*. 2007, Vol. 37, Iss. 9, P. 801–803.
10. Young-Hag Koh, Hae-Won Kim, Hyoun-Ee Kim. Mechanical behavior of polymer and ceramic matrix nanocomposites. *Scripta Materialica*. 2001, Vol. 44, No. 8–9, P. 2061.
11. Bokobza L. Mechanical, electrical and spectrometric investigations of carbon nanotube-reinforced elastomers. *Vibr Spectr*. 2009, Vol. 51, P. 52–59.
12. Hou Y., Tang J., Zhang H., Qian C., Feng Y., Liu J. Functionalised few-walled carbon nanotubes for mechanical reinforcement of polymeric composites. *ACS Nano*. 2009, No. 3, P. 1057–1062.
13. Joseph A. Arsecularatne and Liangchi C. Zhang Carbon Nanotube Reinforced Ceramic Composites and their Performance. *Recent Patents on Nanotechnology*. 2007, Vol. 1, P. 176–185.
14. Warriar A., Godara A., Rochez O., Mezzo L., Luiz F., Gorbatiikh L., Lomov S. V., Aart Willem Van Vuure, Verpoest I. The effect of adding carbon nanotubes to glass/epoxy composites in the fibre sizing and/or the matrix. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2010, Vol. 41, Iss. 4, P. 532–538.
15. Bobrinetskii I. I., Nevolin V. K., Simunin, M. M. Production of carbon nanotubes by catalytic gas-phase pyrolysis of ethanol. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2007, Vol. 41, Iss. 5, P. 639–643.

УДК 629

Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-703-715

**Для цитирования:** Титенков С. В., Журавлев В. Ю. Перспективы развития системы технологии гибки трубопроводов 3D-конфигурации на производстве // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 4. С. 703–715. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-703-715

**For citation:** Titenkov S. V., Zhuravlev V. Yu. [Prospects for the development of the system of bending pipelines of 3D configuration in production]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 4, P. 703–715 (In Russ.). Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-703-715

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИИ ГИБКИ ТРУБОПРОВОДОВ 3D-КОНФИГУРАЦИИ НА ПРОИЗВОДСТВЕ

С. В. Титенков<sup>1</sup>, В. Ю. Журавлев<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>АО «Красноярский машиностроительный завод»

Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29

<sup>2</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: vz@sibsau.ru

*Представлено общее описание процесса производства трубопроводов сложной конфигурации (ТСК). Многосторонне описываются узкие направления и специализации, принимающие значительное участие в изготовлении пространственных трубопроводных систем и являющиеся основополагающими технологиями в данном процессе. В качестве объекта описания выступает базовый модуль разгонного блока (БМРБ), имеющий как гражданское назначение – вывод полезной нагрузки ракетами-носителями среднего и тяжелого классов на геостационарную орбиту, траектории, так и специальное назначение. Предметом описания выступает методология процесса гибки трубопроводов. Статья подразделяется на введение, четыре раздела, описывающих данный процесс, и заключение. Дается обоснование актуальности рассматриваемой темы, стратегическая важность отрасли и цель. Определяется государственная потребность в БМРБ для тяжёлых ракет-носителей «Ангара-А5» на ближайшее десятилетие. Описаны функциональные назначения трубопроводов БМРБ и влияние параметров рабочего режима компонентов в трубопроводах на их размеры и материал. Процесс подготовки технологии производства трубопровода подразделён на девять этапов: получение и проработка конструкторской документации (КД) в виде 2D-чертежей с техническими требованиями и размерами; конструкторское моделирование детали в 3D-модель; определение оборудования изготовления детали; технологическая подготовка трубопровода к гибке; операция непосредственного изготовления предварительного изделия – эталона; обмер размеров полученного эталона; анализ и решение возможности дальнейшего использования эталона; корректировка программы гибки станка с числовым программным управлением (ЧПУ) через поправочные коэффициенты; сборка трубопровода в составе сложного трубопровода по пневмогидравлической схеме с директивным утверждением технологии. Описан алгоритм построения модели трубопровода, который подразделен на девять основных этапов. Далее дается общее описание программного модуля для станка с ЧПУ гибки трубопроводов. Рассмотрен международный стандарт, регламентирующий разработку программного модуля для станков с ЧПУ, с кратким описанием последовательности подготовительных и вспомогательных команд. Показана структурная схема создания управляющей программы трубогибного станка. В заключении показаны перспективные направления развития технологии гибки ТСК, в частности, через внедрение в производство новой оснастки – универсального технологического перехвата гибки труб; специальной гибочной головки с индукционной функцией, а также через создание универсального техпроцесса гибки ТСК, позволяющего не прибегать к созданию новых техпроцессов для трубопроводов разных диаметров, длин, материалов и учитывающего особенности работы станка.*

**Ключевые слова:** гибка трубопроводов сложной конфигурации, пространственные трубопроводные системы, базовый модуль разгонного блока, методология гибки трубопроводов, конструкторская документация, станок с числовым программным управлением, пневмогидравлическая схема, управляющая программа для трубогибного станка, универсальный технологический перехват гибки труб, специальная гибочная головка с индукционной функцией.

## PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF THE SYSTEM OF BENDING PIPELINES OF 3D CONFIGURATION IN PRODUCTION

S. V. Titenkov<sup>1</sup>, V. Yu. Zhuravlev<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>JSC "Krasnoyarsk machine-building plant"

29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: vz@sibsau.ru

*The paper presents a general description of the production process of pipelines of complex configuration (TSC). Narrow directions and specializations that take a significant part in the manufacture of spatial piping systems (PTS) and fundamental technologies in this process are described on a multilateral basis. The object of the description is a base module of the upper stage (BMRB), which has both a civilian purpose — output of the payload by missiles carrying medium and heavy classes to a geostationary orbit, trajectories, and a special purpose. The subject of the description is a methodology of the pipeline bending process. The article is divided into introduction, four sections describing this process and conclusion. The beginning of the article provides a rationale for the relevance of the topic under consideration, the strategic importance of the industry and the goal. The state need for BMRB for heavy launch vehicle "Angara-A5" for the next decade is determined. The functional assignments of the BMRB pipelines and the influence of the operating parameters of the components in the pipelines on their dimensions and material are described. The process of preparing the production technology of the pipeline is divided into nine stages: the receipt and study of design documentation (CD) in the form of 2D drawings with technical requirements and dimensions; design modeling of a part in a 3D model; definition of equipment manufacturing parts; technological preparation of the pipeline for bending; the operation of the direct manufacture of the preliminary product — the standard; measurement of the size of the resulting standard; analysis and solution of the possibility of further use of the standard; adjustment of the program of a flexible machine with numerical control (CNC) through the correction factors; assembly of the pipeline as part of a complex pipeline using a pneumatic-hydraulic scheme (CBC) with a directive technology approval. An algorithm for constructing a pipeline model is described; it is divided into nine main stages. Then a general description of the software module for a CNC machine and flexible pipelines are given. An international standard governing the development of a software module for CNC machines with a brief description of the sequence of preparatory and auxiliary commands is considered. A block diagram of creating a control program for a pipe bending machine is shown. In conclusion, the promising directions of the development of the technology of flexible TSK are shown, in particular through the introduction of new equipment into production: universal technological interception of pipe bending; special bending head with induction function, as well as through the creation of a universal process technology of flexible TSK allowing not to resort to the creation of new technological processes for pipelines of different diameters, lengths, materials and taking into account the features of the machine.*

**Keywords:** flexible pipelines of complex configuration, spatial piping systems, base module of the upper stage, pipelines bending methodology, design documentation, computer numerical control machine, pneumatic-hydraulic scheme, control program for a pipe bending machine, universal technological interception of pipe bending, special bending head with induction function.

**Введение.** Актуальность активизации научно-исследовательских работ, совершенствования конструкторских и технологических разработок в ракетно-космической отрасли (РКО) никем не отрицается на фоне сложной внешней военной и дипломатической обстановки в мире. На экономические санкции и всевозможное военно-политическое давление США на предприятия военно-промышленного комплекса (ВПК) России в ответ РКО ставит цель — совершенствовать технологии производства современной военной техники, в том числе путём уменьшения затрат на обслуживание используемой в производстве оснастки станков. Новые технологические возможности в свою очередь расширяют пространство для внедрения конструкторских новаторств (в частности, изготавливать трубопроводы новой, более сложной конфигурации и т. п.) и позволяют решать экономические задачи — производство более современных составных частей (СЧ) изделий с обеспечением требуемого каче-

ства, надёжности, сроков эксплуатации и с конкурентной стоимостью. Совокупность разрабатываемых и внедряемых технических решений специалистами РКО России продляет гарантию безусловной незыблемой обороноспособности страны.

Одним из вкладов АО «Красмаш» в данный процесс является изготовление БМРБ для тяжёлых ракет-носителей «Ангара-А5». В настоящее время суммарно заключено 12 контрактов на постройку ракет «Ангара-А5». До 2027 года для обновления российской орбитальной группировки понадобится порядка 27 пусков ракет «Ангара-А5» [1].

**Функциональные назначения трубопроводов.** Основной частью изготовления вышеуказанных БМРБ (около 40 % от всего объёма производства) является изготовление трубопроводов и их составных частей, основные функции которых следующие:

— подача сухого гелия (–50 °С) для осушки пневмогидравлической системы (ПГС) от влаги;

- подача и слив гелия в баллоны;
- подача и слив окислителя в бак «О»;
- подача и слив горючего в бак «Г»;
- управление дренажём, наддувом и обеспечение вакуумом системы гермочехла;
- контроль давления в баках «О» и «Г»;
- подача гелия с баллонов (находящихся в баке окислителя) в пневмоцилиндр для:
  - а) работы автоматики двигателя;
  - б) продувки трубопроводов двигателя;
  - в) открытия клапана подачи окислителя блока подачи окислителя (БПО);
  - г) открытия клапана подачи горючего блока подачи горючего (БПГ);
  - д) наддува «горячим» (большой объём) гелием баков «О» и «Г»;
  - холодная «раскрутка» турбины насоса БПО гелием;
  - подача продуктов сгорания из БПО в БПГ для:
    - а) раскрутки турбины насоса БПГ;
    - б) управления соплом крена;
  - подача окислителя «О» (переохлаждённого кислорода) из бака «О» в газогенератор двигателя;
  - подача горючего «Г» (синтетического керосина – синтина) из бака «Г» в газогенератор двигателя;
  - подача самовоспламеняющегося компонента (несимметричного диметилгидразина – гептила) из блока многократного запуска (БМЗ) в газогенератор двигателя;
  - подача компонентов смеси «О» (с избытком кислорода), «Г» и гептила в камеру сгорания;
  - сброс остатков продуктов сгорания («мятого газа») из двигателя;
  - сброс остатков компонентов «О» и «Г» из баков их хранения.

В зависимости от назначения и температурных параметров рабочего режима компонентов в трубопроводе, в КД определены материалы и размеры трубопроводов. В АО «Красмаш» для комплектации БМРБ изготавливают изделия из тонкостенных трубопроводов, диаметры которых от Ø8 до Ø80. Основные материалы, используемые при изготовлении трубопроводов – алюминиевые сплавы и нержавеющие стали (12Х18Н10Т-ВД), имеющие свои физико-механические свойства вязкости, твердости (пружинения), прочности и пр.

**Основные этапы подготовки технологии производства трубопроводов.** Методология разработки технологии производства ТСК для БМРБ состоит из следующих этапов:

1. Этап получения и проработки КД с техническими требованиями, размеров ТСК. На данном этапе КД «оцифровывается», а полученная информация помещается в электронный архив, представляющий программно-аппаратный комплекс с PDM-системой Windchill (или программа Lotsia PDM Plus), в состав которого входит высокопроизводительное устройство хранения информации.

2. Этап конструкторского моделирования детали (в нашем случае – трубопровода) в 3D-модель с сохранением полученного результата в электронном архиве. Данную работу выполняют в программе Solid

Works (а также в программах Creo Parametric, «Компас 3D», AutoCAD Inventor, T-Flex) с использованием информационно-справочной системы, в том числе единой системы конструкторской документации (ЕСКД) через ТехноПРО. Большинство современных САПР-программ трехмерного моделирования позволяют построить трубопровод, используя базовый функционал и типовые операции – это дает ощутимое преимущество по сравнению с работой с бумажным чертежом или 2D-чертежной программой и позволяет избежать многих ошибок. Однако гораздо более эффективно применение специализированных приложений, созданных для решения таких задач. В таком случае обеспечивается максимальный выигрыш в производительности и качестве при проектировании трубопроводной конструкции за счет избавления конструктора от множества рутинных операций.

3. Этап определения оборудования (для трубопровода допускается использование трубогибного станка с ЧПУ), на котором будет изготавливаться деталь с последующей разработкой технологического процесса (ТП) и разработкой станочной программы использования автоматизированного трубогибного станка SB-63x4A-3S-V для программирования работы используется программа SOCO Bending Machine. При непосредственном программировании программы гибки для станка пользуются как декартовой системой координат, так и «полярной» системой координат, описывающей изогнутое изделие в координатах YBC (Y – длина прямого участка между гибоми, B – угол поворота трубы вокруг своей оси, C – угол очередного ггиба). В программу непосредственно заносится информация: диаметр трубы, траектория с длиной и радиусами гибки по центральной оси заготовки с учётом параметров оснастки (положение прижима, дорна, гибочных штампов, скорости их работы и т. п.). После завершения создания модели и определения инструментальной оснастки программа автоматически генерирует управляющий ISO-код для управления станком в производстве заданной модели. Программист просматривает видеосимуляцию процесса гибки заданной модели на виртуальном трубогибном станке и вносит, если это требуется, коррективы, ориентируясь на таблицы координат каждого из подвижных элементов станка, а также на управляющий код станка. После этого программу отправляют на исполнение на реальном трубогибном станке. Файл машины гибки (XYZ или YBC/LRA), в котором описывается трасса трубы, которую следует изготовить, является текстовым файлом. Поэтому при необходимости её можно не только просмотреть, но и изменить содержимое файла в текстовом редакторе.

4. Этап подготовки трубы к гибке. Перед гибкой на станке трубопровод подвергают [2]: осмотру поверхности на предмет контроля качества; проверке физико-химического состава на соответствие указанной марки материала (несколько штук из партии); замеру геометрических параметров; обезжириванию поверхностей; разрезке труб-заготовок на технологическую длину (размером, равным длине развертки согнутого трубопровода с припуском на обработку).



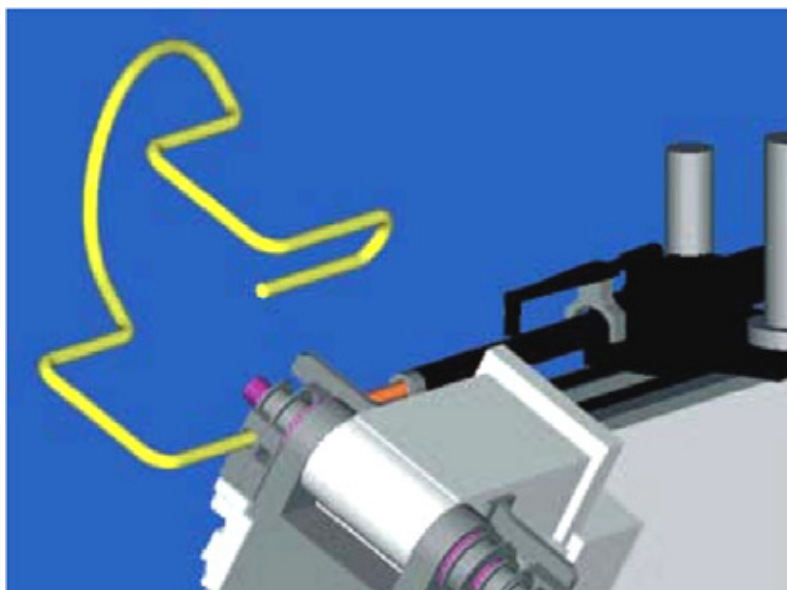


Рис. 1. Процесс гибки на автоматизированном станке с ЧПУ

Fig. 1. The process of bending on an automated CNC machine

5. Этап выполнения операции изготовления (гибки) изделия (рис. 1). Загрузка программы гибки выполняется с помощью электронных программоносителей непосредственно на стойке ЧПУ через меню ввода. В процессе верификации программы гибки (установление правильности программы посредством её опытной проверки) оператор станка на мониторе стойки ЧПУ полностью отслеживает весь процесс гибки.

При возникновении ошибок (соударение детали с агрегатами и станиной станка) система выдаст отчет с указанием проблемных участков трубопровода. Поэтому в процессе верификации допускается осуществлять переподбор оснастки для изготавливаемого трубопровода. В конце этапа получается изготовление предварительного изделия – шаблона (эталона). Процесс эталонирования трубопровода регламентируется нормативным документом ОСТ 92-1600–84 [2].

6. Этап обмера полученного шаблона выполняют на контрольно-измерительной машине FARO Fusion Arm 8/7, в состав которой входит рабочее место технолога с технологическим программным обеспечением TezetCAD. Измеренные фактические размеры ТСК заносятся в программно-аппартный комплекс с PDM-системой Windchill (или программа Lotsia PDM Plus), далее полученные данные сравниваются с электронной 3D-моделью трубопровода. Перед обмером состояние наружной и внутренней поверхностей трубопроводов должно соответствовать требованиям ГОСТ 17365–71 [3] и ОСТ 92-1601–84 [4]. Допустимые плавные отклонения контуров трубопровода от контуров электронной 3D-модели и предельные отклонения на длину трубопровода должны соответствовать требованиям ГОСТ 17365–71.

7. Этап аналитической проработки полученных значений размеров трубопровода, соизмерение данных значений с допусками и принятие окончательно-

го решения о возможности использования разработанной программы гибки трубопровода.

8. Этап коррекции программы гибки путём уточнения поправочных коэффициентов, учитывающих физико-химические свойства партии материала трубопровода, его пружинение, вязкость, а также изменяющих скорость работы оснастки. Данный этап выполняется в случае неудовлетворительных результатов предыдущего этапа. После корректировки программы гибки ТСК производится повторное выполнение вышеупомянутых этапов: подготовка трубопровода к гибке, гибке на трубогибе с ЧПУ, обмер полученного ТСК и анализ результатов.

9. После отработки технологии сборки-сварки [5–7], монтажа участков трубопроводов в составе сложного трубопровода по схеме ПГС с проверкой координат собранного сложного трубопровода на контрольно-измерительном комплексе с данными 3D-модели, утверждается директивная технология изготовления трубопроводов сложной конфигурации.

Описанное оборудование связано между собой единой информационной сетью, представленной на рис. 2.

**Алгоритм учета в пространстве и мест крепления трассы трубопровода.** Алгоритм компоновки трубопровода в CAD-системе Solid Works состоит из следующих этапов:

1. Создание упрощенных 3D-моделей деталей и узлов изделия, необходимых для однозначного определения зон прокладки трасс трубопровода.

2. Создание упрощенных габаритных 3D-моделей основных элементов (ёмкостей, ферм, переходников и т. д.) и их взаимная увязка (рис. 3).

3. Предварительное расположение и прорисовка штуцеров на емкости, к которым будут стыковаться трубопроводы.

4. Предварительная прорисовка на переходнике основных элементов мест крепления трубопроводов.

5. Взаимная увязка элементов между собой, привязка к их основным плоскостям стабилизации.

6. Предварительное размещение арматуры (клапанов, наконечников, тройников и т. д.) изделия осуществлялось с учетом удобства обслуживания и ремонта, а также минимальных прямолинейных участков и радиусовгиба (рис. 4–7).

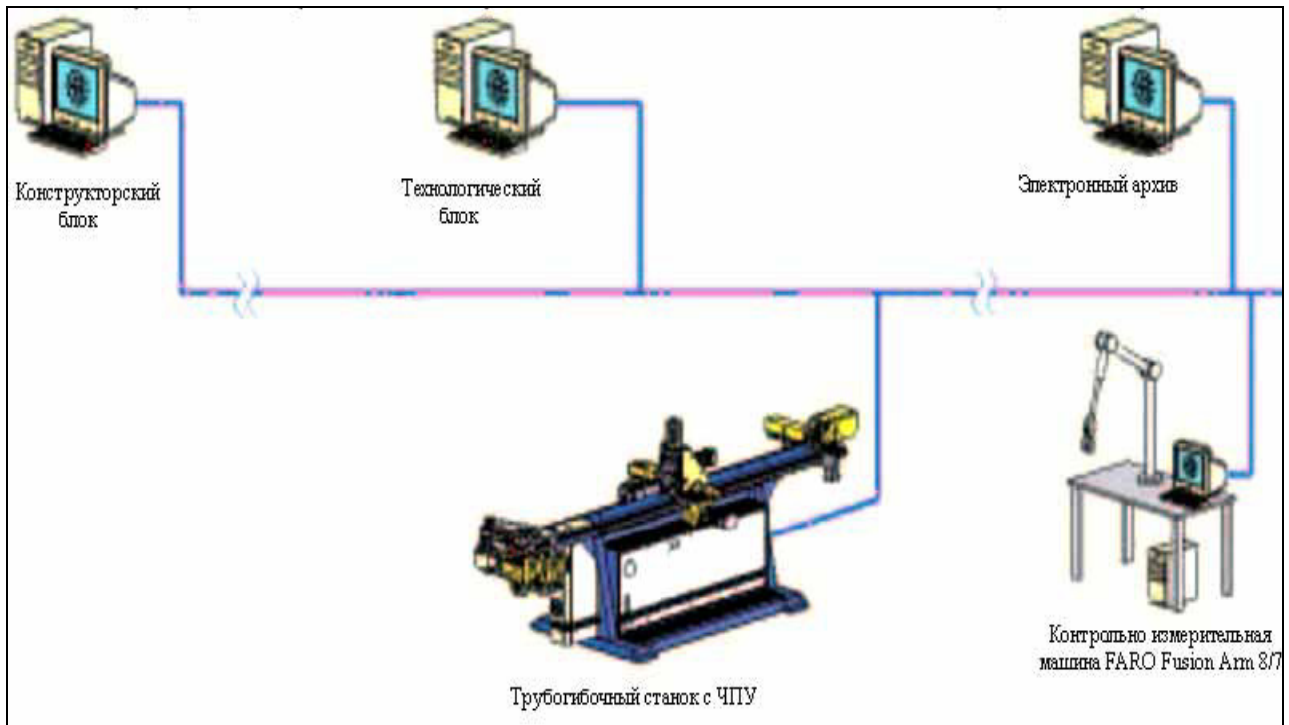


Рис. 2. Единая общезаводская информационная сеть АО «Красмаш»

Fig. 2. United general informational network of JSC "Krasmach"

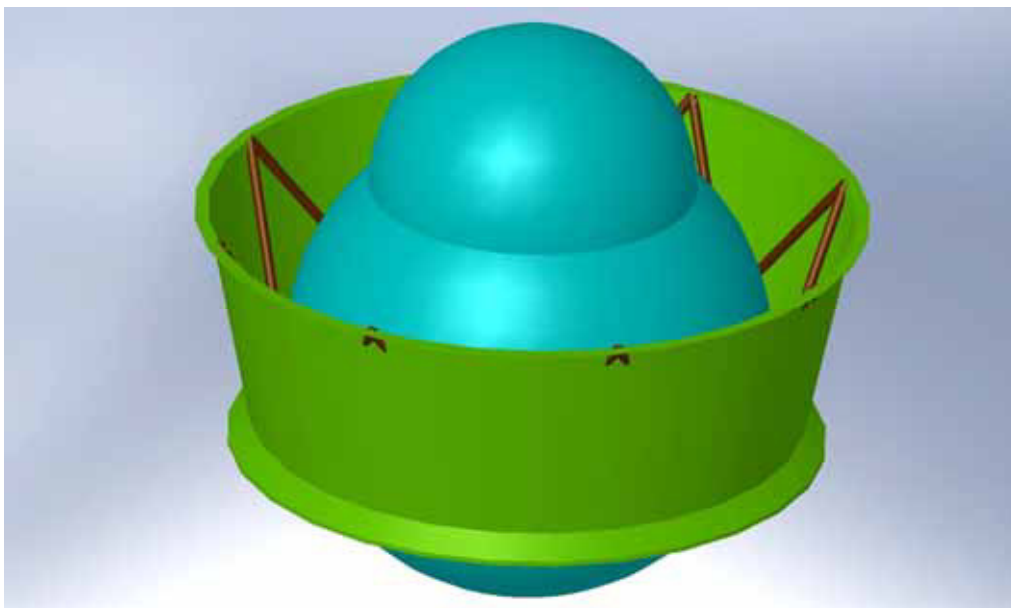


Рис. 3. Упрощенная модель сборки изделия

Fig. 3. Simplified product assembly model

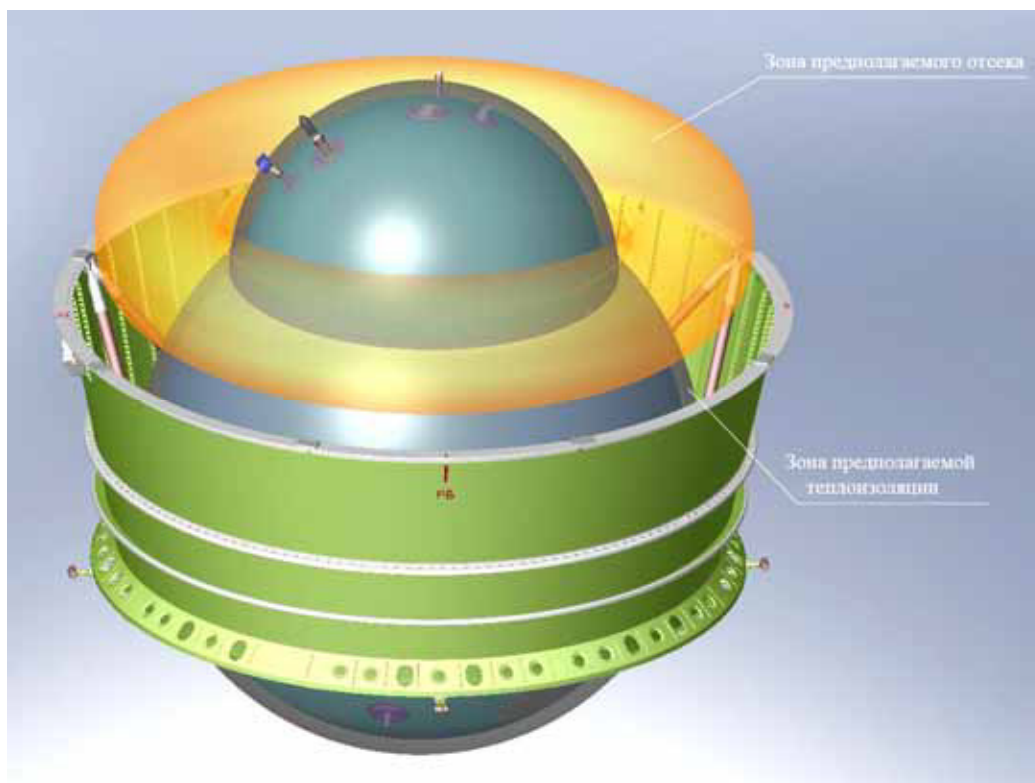


Рис. 4. Модель сборки изделия после увязки элементов крепления, расположения штуцеров трубопроводов и определения зон расположения приборов

Fig. 4. The model of the assembly of the product after linking the fastening elements, the location of the pipe fittings and the determination of the location of the devices

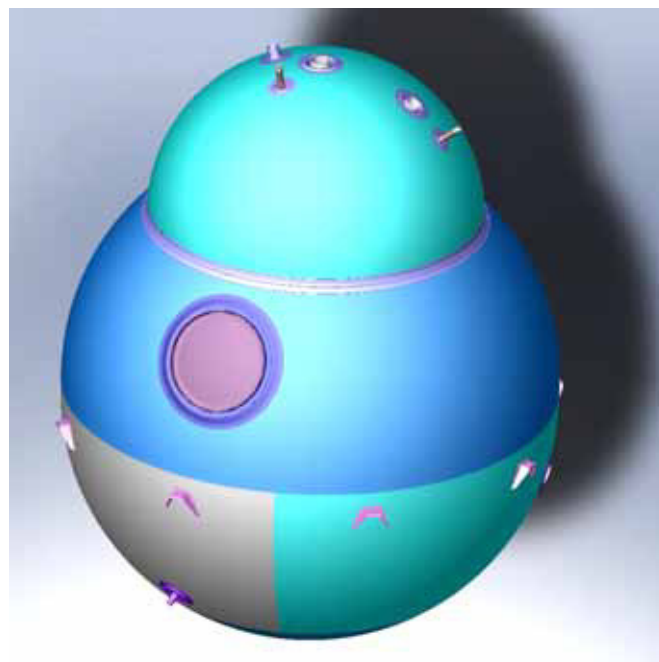


Рис. 5. Модель емкости после увязки элементов крепления и расположения штуцеров трубопроводов

Fig. 5. Capacity model after linking fasteners and location of pipe unions

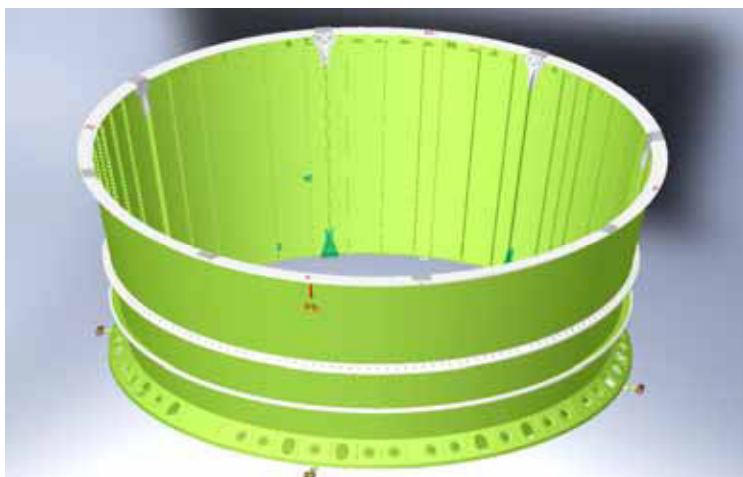


Рис. 6. Модель переходника после увязки элементов крепления и расположения штуцеров трубопроводов

Fig. 6. Adapter model after linking fasteners and location of pipe fittings

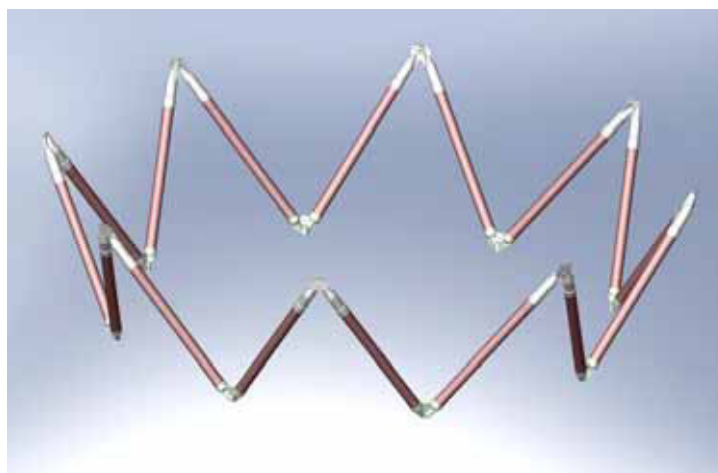


Рис. 7. Модель фермы после увязки элементов крепления и расположения штуцеров трубопроводов

Fig. 7. Model farm after linking fasteners and location of pipe fittings

#### Алгоритм построения модели трубопровода.

Создание модели трубопровода в CAD-системе SolidWorks состоит из следующих этапов:

1. Прокладка трассы трубопровода с учетом зон обхода зон отсеков, минимальных зазоров и возможности их дополнительного крепления, с определением начальных, конечных точек трассы трубопровода (рис. 8, 9).

2. Уточнение компоновки изделия по результатам анализа и оптимизации трассы трубопровода.

3. Создание библиотеки ДСЕ трубопровода и элементов его крепления: уголка для крепления трубопровода, шпильки для крепления трубопровода, прижима для крепления трубопровода, наконечника трубопровода, компенсатора трубопровода, компенсатора трубопровода.

4. Поэлементное разнесение сборки трубопровода (рис. 10).

5. Анализ, оптимизация трассы трубопровода и проверка на допустимые зазоры и пересечение с трассами близлежащих трубопроводов после размещения ДСЕ в трубопроводе и элементов его крепления.

6. Проработка этапов сборки изделия и технологической возможности изготовления трубопровода, определение мест разъема трубопровода и разбиение трубопровода на несколько с определением положения монтажных стыков с учетом возможности сборки, сварки, рентгеноконтроля и испытаний (рис. 11).

7. Уточнение компоновки изделия по результатам анализа и оптимизации трассы трубопровода (рис. 12).

8. Определение мест нанесения маркировки на трубопроводе (рис. 13, 14).

9. Получение окончательной модели трубопровода после уточнения компоновки изделия (рис. 15).

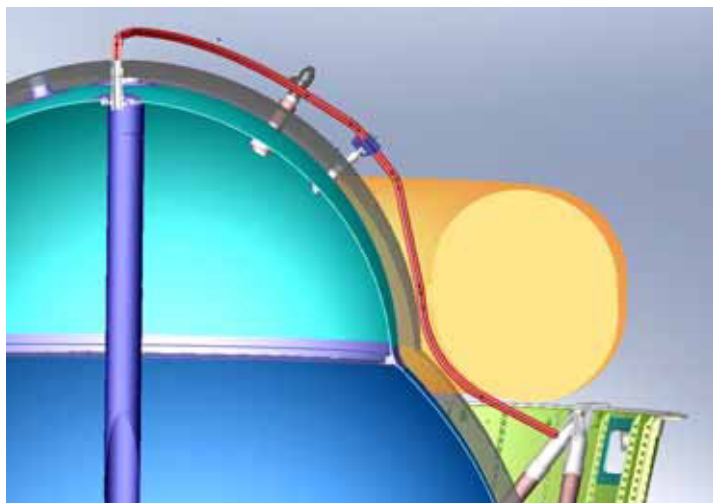


Рис. 8. Определение дополнительного места крепления

Fig. 8. Determination of additional attachment point

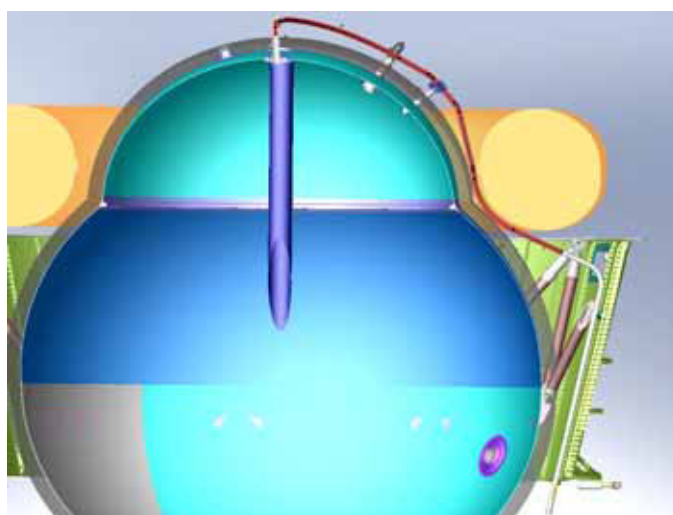


Рис. 9. Определение начальных и конечных точек трассы трубопровода

Fig. 9. Determination of the start and end points of the pipeline route

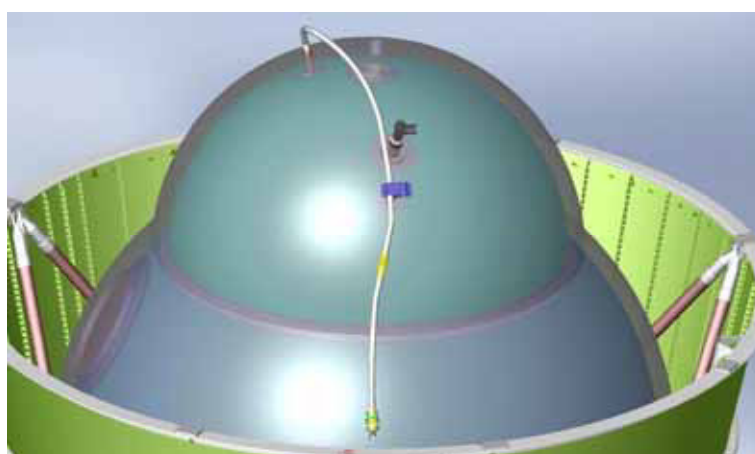


Рис. 10. Размещение ДСЕ в трубопроводе и элементов его крепления

Fig. 10. Layout of DSE in the pipeline and its fasteners



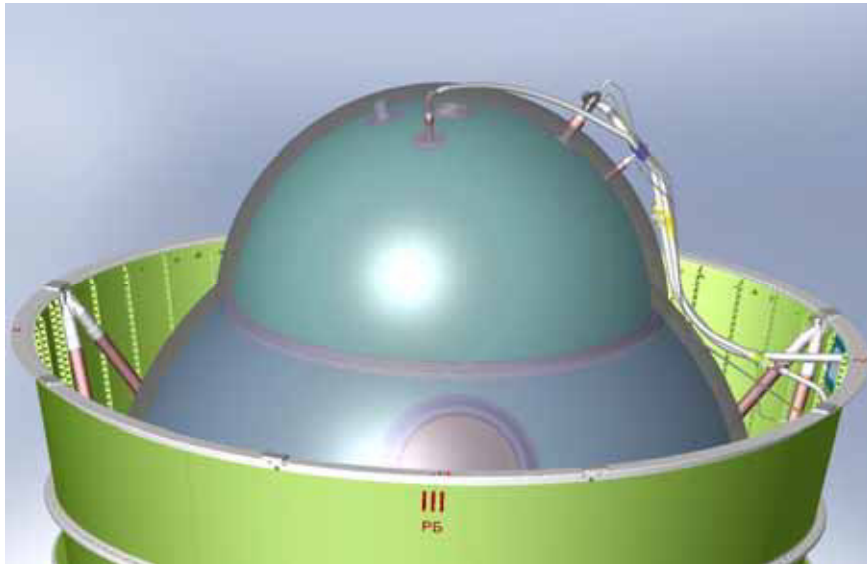


Рис. 11. Определение положения монтажных стыков и увязка с окружающими конструкциями

Fig. 11. Determining the position of the mounting joints and linking with the surrounding structures

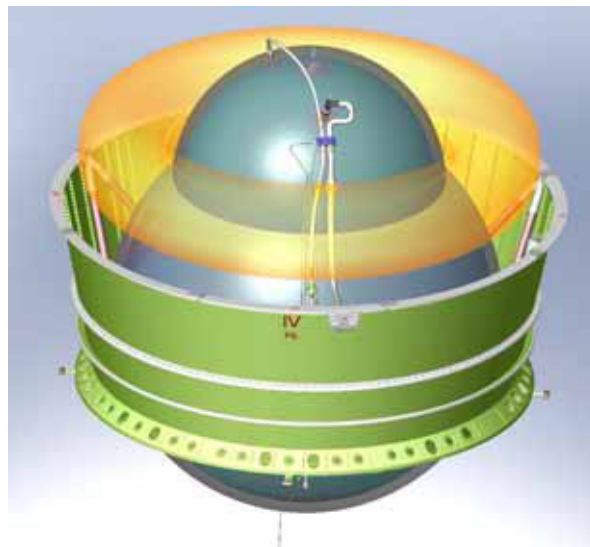


Рис. 12. Уточненная компоновка изделия

Fig. 12. Refined product layout



Рис. 13. Маркировка стыка трубопровода

Fig. 13. Pipeline joint marking

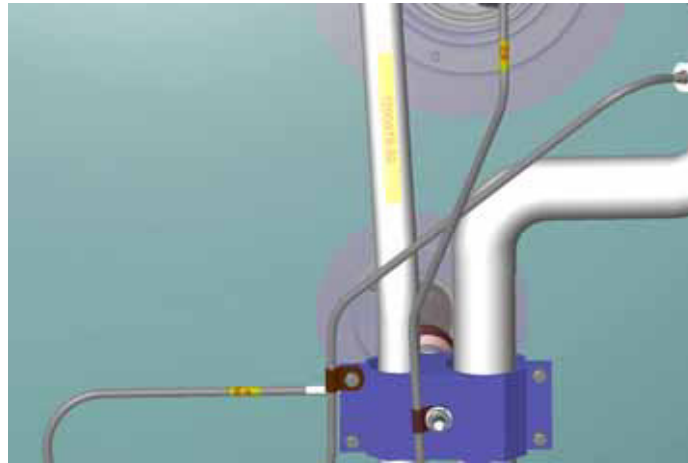


Рис. 14. Маркировка трубопровода

Fig. 14. Pipeline marking

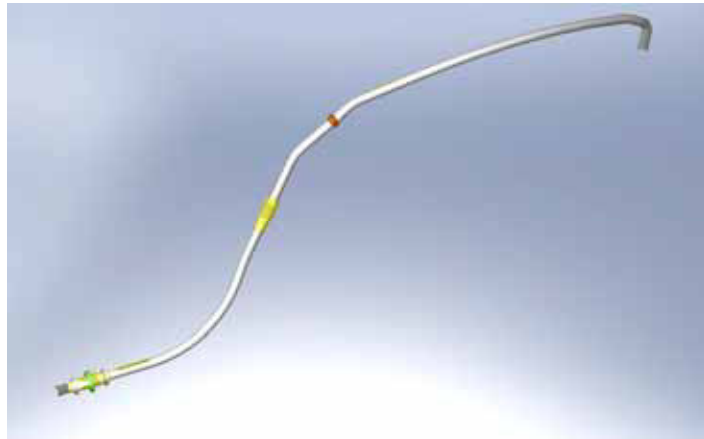


Рис. 15. 3D-модель трубопровода

Fig. 15. 3D model of the pipeline

**Общее описание программного модуля для станка с ЧПУ гибки трубопроводов.** Международный стандарт ISO 6983 [8], регламентирующий разработку программного модуля для станков с ЧПУ, представляет собой описание последовательности подготовительных и вспомогательных команд-функций.

Подготовительные команды (содержат символ G) транслируются стойкой ЧПУ в перемещения рабочего инструмента оборудования относительно заготовки детали. Это команда линейной интерполяции (G101), команды круговой интерполяции (G102 – по часовой стрелке, G103 – против часовой стрелки).

Вспомогательные команды управляют режимами работы системы управления станком. Слова вспомогательных команд состоят из символа M, за которым следуют две цифры, определяющие тип команд. Например, признак окончания управляющей программы – M30.

Управляющая программа представляет собой полное описание технологических и геометрических параметров детали. Обработка на станке с числовым программным управлением такой программы позво-

ляет получить соответствующую ей деталь. При составлении управляющей программы также нет необходимости записывать команды управления станочной автоматикой (зажим-разжим цанги, гибочной и зажимной матрицы; возврат шаблона в исходное состояние; перемещения дорна и т. д.), так как данные команды запрограммированы в системе ЧПУ трубогибочного станка. Все вспомогательные перемещения (возврат гибочного кронштейна – координата C; поворот цангового патрона при изменении направлениягиба – координата B), а также пересчет угла поворота трубной заготовки в перемещение продольной каретки (координата Y) выполняются за счет использования макропроцедур без дополнительных указаний в управляющей программе.

В трубогибочном станке SB-63x4A-3S-V реализованы следующие специализированные программные циклы (макропроцедуры):

- а) G100 – функция, определяющая:
  - режимгиба трубы A (A1 – намотка, A2 – обкатка, A3 – проталкивание);
  - радиус шаблона R;



- длину заготовки трубы L;
- скорость рабочей подачи F;
- б) G101 – функция, задающая перемещению заготовки по линейной координате Y;
- в) G102 – функция, задающая перемещения заготовки по часовой стрелке поворотных координат B и C;
- г) G103 – функция, задающая перемещения заготовки против часовой стрелки поворотных координат B и C.

Ниже приведен текст примера управляющей программы, предназначенной для гибки трубной заготовки методом намотки:

```
%O11111 (TEST GIBKA1) (начало программы)
N1 G100 A1 R50 L2000.9 F300 (A1 – намотка)
N2 G101 Y200 (перемещение по координате Y на 200 мм)
N3 G102 C30 (загиб трубы на угол 30 градусов по часовой стрелке)
N4 G101 Y100
N5 G103 C45 (загиб трубы на угол 45 градусов против часовой стрелки)
N6 G101 Y50
N7 G102 B120 (поворот трубы вокруг оси Y на 120 градусов по часовой стрелке)
N8 G101 Y22.8
N9 G103 C10.5
N10 G101 C300
N11 M30 (окончание программы)
%
```

%O11111 – оформление начала и номер управляющей программы  
(TEST GIBKA1) – название программы, заключается в круглые скобки  
N1...N11 – номера кадров  
F450 – скорость рабочих ходов гибки  
M30 – окончание управляющей программы  
% – окончание файла.

Создание исполнительного программного модуля (должен соответствовать международному стандарту ISO 6983) для обеспечения автоматизированной рабо-

ты трубогибочного станка состоит из следующих этапов (рис. 16):

1. Технолог-программист с помощью программного обеспечения Solid Works создает чертеж трубопровода.
2. Далее стандартными средствами Solid Works необходимо сохранить узловые точки в текстовый файл. Важно отметить, что при сохранении узловых точек необходимо выбирать вариант «точки касательности».
3. Постпроцессор трубогиба рассчитывает управляющую программу для станка.
4. Программный модуль постпроцессирования осуществляет преобразование входных данных в формат управляющей программы, понятный системе ЧПУ станка с сохранением на жесткий диск или переносной носитель.
5. Загрузка программы гибки на стойке ЧПУ через меню ввода.

**Заключение.** Из представленных рисунков видна сложная конфигурация значительного количества трубопроводов. Учитывая большое число трубопроводов (разных диаметров и траекторий), используемых при создании БМРБ, сложность и трудоёмкость технологического процесса изготовления их эталонов и самих изделий ведёт к увеличению сроков внедрения КД в производство, что, в свою очередь, увеличивает сроки изготовления БМРБ. Учитывая безусловность выполнения гособоронзаказа, сокращение временных издержек постоянной отработки технологии изготовления на трубогибах разных 3D-трубопроводов, из разных материалов, диаметров и партий поставки, исключит риски временных задержек изготовления выпускаемого изделия.

Выполнение вышеуказанных задач требует создания универсальной технологической методики запуска изготовления трубопровода 3D-конфигурации, которая должна включать в себя решение всех возможных причин внештатных ситуаций работы станка – трубогиба, позволять минимальными временными и материальными затратами выходить в режим штатной работы [9–15].

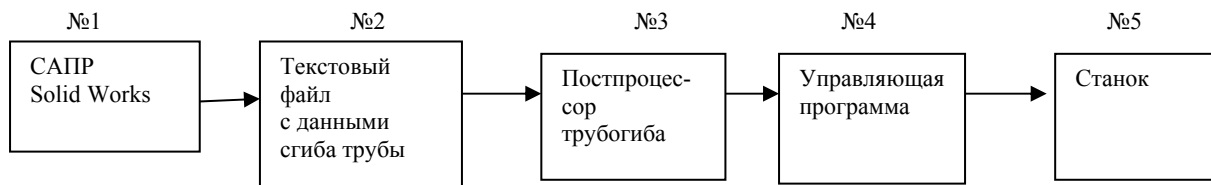


Рис. 16. Структурная схема создания управляющей программы

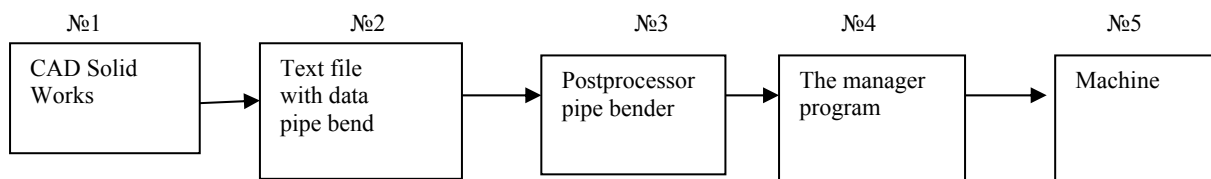


Fig. 16. Structural diagram of the control program creation

Решение упомянутой задачи возможно путём:

- создания универсального техпроцесса гибки ТСК, позволяющего не создавать новый техпроцесс для трубопроводов с другими диаметрами и длинами, учитывающего разные материалы и разные партии труб, пружинение, проскальзывание труб и прочие проблемные моменты работы станка;
- создания (разработки КД и изготовления) универсального технологического перехвата гибки ТСК и специальной гибочной головки с индукционной функцией, позволяющего исключить проскальзывание трубопровода на станке-трубогибе, исключить требование наличия прямолинейных участков для крепления технологической оснастки гибо, а также позволяющего из труб разной плотности, плавки материала и толщины стенки (влияющих на пружинение) изготавливать трубопроводы с требуемыми габаритными размерами, радиусами гибо с допустимыми утонениями стенок и допустимыми отклонениями размеров ответственных участков;
- практического внедрения в производство двух первых пунктов, накопления статистики работы, обнаружения узких мест (неучтенных факторов) с последующей корректировкой техпроцесса и доработкой оснастки гибо.

#### Библиографические ссылки

1. АО «Красмаш» : сайт [Электронный ресурс]. 28.08.2018. URL: <http://www.krasm.com/news/allnews.aspx?DocId=11197&ItemId=22> (дата обращения: 02.09.2018).
2. ОСТ 92-1600–84. Производство трубопроводов. Общие технические условия. Эталонирование трубопроводных систем, гибка труб и формообразование концов трубопроводов. М. : Стандартинформ, 1984. 47 с.
3. ГОСТ 17365–71. Трубопроводы для агрессивных сред. Общие технические требования. М. : Стандартинформ, 1971. 11 с.
4. ОСТ 92-1601–84. Производство трубопроводов. Общие технические условия. Сборка, окраска, маркировка, очистка, контроль и монтаж трубопроводов. М. : Стандартинформ, 1984. 33 с.
5. ОСТ 92-1602–84. Производство трубопроводов. Сварка. Общие технические требования. М. : Стандартинформ, 1984. 32 с.
6. ОСТ 92-1603–84. Производство трубопроводов. Пайка. Общие технические требования. М. : Стандартинформ, 1984. 29 с.
7. ОСТ 92-1604–84. Производство трубопроводов. Испытания. Общие технические требования. М. : Стандартинформ, 1984. 60 с.
8. ISO 6983–2009. Автоматизированные системы и интеграция. Числовое программное управление станком. Формат программы и определение адресных слов. М. : Стандартинформ, 2009. 26 с.
9. Как производится гибка металлических труб, технологические тонкости выполнения работ [Электронный ресурс] // Совет инженера. URL: <http://sovetingenera.com/santeh/trubodel/gibka-trub.html> (дата обращения: 02.09.2018).

10. «Ангара» в своем семействе [Электронный ресурс] // NAKED SCIENCE. 19.03.2017. URL: <https://naked-science.ru/article/nakedscience/angara-rozhdenie-rakety> (дата обращения: 02.09.2018).

11. Международный военно-технический форум «Армия – 2018» [Электронный ресурс] // Сайт Роскосмоса. 26.08.2018. URL: <https://www.roscosmos.ru/25423> (дата обращения: 02.09.2018).

12. О некоторых средствах и возможностях Lotsia PDM PLUS [Электронный ресурс] // САПР и графика. 1-2017. URL: <https://sapr.ru/article/25364> (дата обращения: 02.09.2018).

13. Создание возможностей для компьютерного моделирования физических процессов и инженерного анализа [Электронный ресурс] // CAD/CAM/CAE observer. 1(53)/2010. URL: [http://www.cadcamcae.lv/hot/CAE-WP\\_Part1\\_n53\\_n44.pdf](http://www.cadcamcae.lv/hot/CAE-WP_Part1_n53_n44.pdf) (дата обращения: 02.09.2018).

14. Контракты жизненного цикла для народнохозяйственной продукции и вооружения, военной и специальной техники: сходство и отличия [Электронный ресурс] // CAD/CAM/CAE observer. 8(92)/2014. URL: <http://www.cadcamcae.lv/N92/29-33.pdf> (дата обращения: 02.09.2018).

15. Титенков С. В., Запорожский А. С., Никишев А. А. 3D-моделирование при проектировании пространственных трубопроводных систем // Решетневские чтения : материалы XVII Междунар. науч. конф., посвящ. памяти генер. конструктора ракет.-космич. систем акад. М. Ф. Решетнева. В 2 ч. Ч. 1 / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013.

#### References

1. Sayt AO Kras mash [Site JSC Kras mash]. Available at: <http://www.krasm.com/news/allnews.aspx?DocId=11197&ItemId=22> (accessed: 09.02.2018).
2. OST 92-1600–84 Proizvodstvo truboprovodov. Obshie tekhticheskie uslovia. Etalonirovanie truboprovodnih system, gibka trub I formoobrazovanie kontsov truboprovodov [State Standard 92-1600-1984. Production of pipelines. Standardization of pipeline systems, pipe bending and shaping of pipeline ends]. Moscow, Standartinform Publ., 1984, 47 p.
3. GOST 17365–71. Truboprovodi dlya agresivnikh sred. Obshie tekhticheskie trebovaniya [GOST 17365–71. Pipelines for aggressive environments. General technical requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 1971, 11 p.
4. OST 92-1601–84 Proizvodstvo truboprovodov. Obshie tekhticheskie uslovia. Sbornka, okraska, markirovka, ochistka, kontrol i montazh truboprovodov [Pipeline manufacturing. General technical conditions. Assembly, painting, marking, cleaning, monitoring and installation of pipelines]. Moscow, Standartinform Publ., 1984, 33 p.
5. OST 92-1602–84 Proizvodstvo truboprovodov. Svarka. Obshie tekhticheskie trebovaniya [Pipeline manufacturing. Welding. General technical requirements.]. Moscow, Standartinform Publ., 1984, 32 p.

6. *OST 92-1603–84 Proizvodstvo truboprovodov. Payka. Obshie tekhnicheskie trebovaniya* [Pipeline manufacturing. Soldering. General technical requirements.]. Moscow, Standartinform Publ., 1984, 29 p.
7. *OST 92-1604–84 Proizvodstvo truboprovodov. Ispitaniya. Obshie tekhnicheskie trebovaniya* [Pipeline manufacturing. Tests. General technical requirements.]. Moscow, Standartinform Publ., 1984, 60 p.
8. *ISO 6983–2009. Avtomatizirovannye sistemy i integratsiya. Chislavoe programnoye upravlenie stankom. Format programmy i opredelenie adresnikh slov* [Automated systems and integration. Numerical control of the machine. The format of the program and the definition of address words]. Moscow, Standartinform Publ., 2009, 26 p.
9. *Kak proizvoditsya gibka metallicheskih trub, tekhnologicheskie tonkosti vypolneniya rabot. Sovet inzhenera* [How is metal pipe bending performed: technological details of the work]. Available at: [http://sovet-ingenera.com/santeh\\_trubodel/gibka-trub.html](http://sovet-ingenera.com/santeh_trubodel/gibka-trub.html) (accessed: 09.02.2018).
10. *Angara v svoem semeystve* [Angara in its family]. Available at: <https://naked-science.ru/article/naked-science/angara-rozhdenie-rakety> (accessed: 09.02.2018).
11. *Mezhdunarodnyy voenno-tekhnicheskiy forum Armiya – 2018* [International Military-Technical Forum Army – 2018]. Available at: <https://www.roscosmos.ru/25423> (accessed: 09.02.2018).
12. *O nekotorykh sredstvakh i vozmozhnostyakh Lotsia PDM PLUS* [About some tools and features of Lotsia PDM PLUS]. Available at: <https://sapr.ru/article/25364> (accessed: 09.02.2018).
13. *Sozdanie vozmozhnostey dlya komp'yuternogo modelirovaniya fizicheskikh protsessov i inzhenernogo analiza* [Creating opportunities for computer modeling of physical processes and engineering analysis]. Available at: [http://www.cadcamcae.lv/hot/CAE-WP\\_Part1\\_n53\\_n44.pdf](http://www.cadcamcae.lv/hot/CAE-WP_Part1_n53_n44.pdf) (accessed: 09.02.2018).
14. *Kontrakty zhiznennogo tsikla dlya narodnohozyaystvennoy produktsii i vooruzheniya, voennoy i spetsial'noy tekhniki: skhodstvo i otlichiya* [Life cycle contracts for national economy products and weapons, military and special equipment: similarities and differences]. Available at: <http://www.cadcamcae.lv/N92/29-33.pdf> (accessed: 09.02.2018).
15. Nikishev A. A., Titenkov S. V., Zaporozhsky A. S. [3D-simulation at designing space pipeline systems]. *Reshetnevskie chteniya. Materialy XVII Mezhdunar. nauch. konf.* [Reshetnev readings. Materials of the XVII Intern. scientific. conf.]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2013.

© Титенков С. В., Журавлев В. Ю., 2018

УДК 621.3

Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-716-727

**Для цитирования:** Трифанов И. В., Суханова О. А., Мелкозеров М. Г., Жирнова Е. А., Трифанов В. И. Рекуперация энергии положительно заряженных ионов // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 4. С. 716–727. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-716-727

**For citation:** Trifanov I. V., Sukhanova O. A., Melkozerov M. G., Zhirnova E. A., Trifanov V. I. [Energy recuperation of positively charged ions]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 4, P. 716–727 (In Russ.). Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-716-727

## РЕКУПЕРАЦИЯ ЭНЕРГИИ ПОЛОЖИТЕЛЬНО ЗАРЯЖЕННЫХ ИОНОВ

И. В. Трифанов, О. А. Суханова, М. Г. Мелкозеров, Е. А. Жирнова, В. И. Трифанов

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 рекуперация энергии пучков положительно заряженных ионов с одновременной нейтрализацией их заряда, например за срезом сопла электрического ракетного двигателя, в электрическую мощность.*

*Одним из методов решения указанной проблемы является разработка и применение рекуператоров энергии положительно заряженных ионов потока плазмы, которые могут устанавливаться вблизи среза сопла ЭРД. Процесс рекуперации энергии положительно заряженных ионов с одновременной нейтрализацией их заряда заключается в электростатическом торможении концентрированного пучка заряженных частиц и взаимодействии их с многоколлекторными электродами рекуператора энергии, которые в свою очередь являются заряжающими электродами суперконденсатора. При этом на электродах суперконденсатора накапливается электростатическое электричество, которое может быть использовано для электропитания систем космического аппарата. При взаимодействии положительно заряженных ионов с многоколлекторными электродами происходит также нейтрализация их заряда за счет воздействия на них тока электронов, поступающих со стороны двойного слоя заряжающего электрода суперконденсатора. Для повышения эффективности рекуперации энергии положительно заряженных ионов на объемный заряд заряженных частиц оказывают воздействие низкочастотным электрическим полем со стороны изолированного управляющего электрода, установленного в полости многоколлекторного электрода навстречу движущемуся потоку ионов.*

*Разработка рекуператоров энергии положительно заряженных ионов и повышение энергетической эффективности ЭРД требует проведения научных исследований на основе построения моделей, принципов построения и оценки методов изготовления их индивидуальных компонентов.*

**Ключевые слова:** положительно заряженные ионы, энергетическая эффективность, многоколлекторный электрод, двойной электрический слой, рекуператор энергии, управляющий электрод, твердый электролит.

## ENERGY RECUPERATION OF POSITIVELY CHARGED IONS

I. V. Trifanov, O. A. Sukhanova, M. G. Melkozerov, E. A. Zhirnova, V. I. Trifanov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation  
E-mail: sibgau-uks@mail.ru

*It is important to recuperate the energy of beams of positively charged ions with simultaneous neutralization of their charge, for example, behind the nozzle of an electric rocket engine, into electric power.*

*One of the methods to solve this problem is development and application of energy recuperators of positively charged plasma flow ions, which can be installed near the cutoff of the ERD nozzle. The process of energy recuperation of positively charged ions with simultaneous neutralization of their charge consists in electrostatic inhibition of the concentrated beam of charged particles and their interaction with the energy recuperator multicollector electrodes, which in turn are the charging electrodes of the supercapacitor. It accumulates electrostatic electricity on the electrodes of the supercapacitor, which can be used to power the systems of the spacecraft (SC). When positively charged ions interact with multi-collector electrodes, their charge is also neutralized by the action of the electron current coming from the double layer of the charging electrode of the supercapacitor. To improve the efficiency of energy recovery of positively charged ions, the volume charge of charged particles is exposed to a low-frequency electric field by an isolated control electrode installed in the cavity of a multi-collector electrode towards the moving ion flow.*

*Development of energy recuperators of positively charged ions and increase of energy efficiency of ERD requires a scientific research based on the construction of models, principles of construction and evaluation of methods of manufacturing of their individual components.*

*Keywords: positively charged ions, energy efficiency, multi-collector electrode, double electric layer, energy recuperator, control electrode, solid electrolyte.*

**Введение.** Для повышения энергетической эффективности электрических ракетных двигателей (ЭРД), а также нейтрализации электрического заряда ионизированных продуктов сгорания топлива за срезом сопла требуется разработка рекуператоров энергии ионов. Известно, что заряженные частицы за срезом сопла отрицательно влияют на работу ЭРД и энергетические системы космического аппарата (КА) за счет образования электростатического заряда [1; 2].

В настоящее время для нейтрализации заряда заряженных частиц продуктов сгорания топлива близко к срезу сопла устанавливают нейтрализаторы заряженных частиц, которые излучают пучки электронов, компенсирующие заряд ионов. Однако такие системы требуют дополнительной энергии для создания электронов, являются энергозатратными и повышают габаритно-массовые характеристики КА, уменьшая полезную нагрузку. В настоящее время остро стоит проблема разработки и создания многофункциональных ЭРД, работающих, например, в плазменно-детонационном или электродинамическом режимах в зависимости от полетной программы. Такой подход к построению многофункциональных ЭРД позволит увеличить удельную тягу в 1,2–1,5 раза, а также обеспечить высокий удельный импульс.

При разработке многофункциональных электрических ракетных двигателей необходимо решить вопросы повышения энергетической эффективности сжигания топлива с образованием плазмы путем разделения и использования [1] энергии заряженных компонентов: пучков электронов и ионов. Для этого требуется разработка рекуператоров энергии заряженных частиц, работающих совместно с суперконденсаторами, используемыми в качестве накопителей электростатической электрической мощности. Преобразование энергии заряженных частиц в электрическую мощность в рекуператоре энергии положительно заряженных ионов должно происходить за счет электростатического торможения пучков ионов при столкновении их с многоколлекторными электродами, а также при взаимодействии с электронами, поступающими из двойного слоя суперконденсатора и заряжающих электродов, изготовленных из нанокмпозиционных углеродных материалов, в рабочую зону рекуператора. Разработка рекуператоров энергии заряженных частиц может также позволить использовать энергию околопланетной плазмы для зарядки аккумуляторов КА. Использование энергии ионизированных продуктов сгорания топлива и энергии околопланетной плазмы для зарядки аккумуляторов КА даст возможность повысить энергетическую эффективность космических летательных аппаратов и работы ЭРД. В связи с изложенным, вопросы разработки рекуператора энергии положительно заряженных ионов являются актуальными.

**Теоретическая часть.** Задачей исследования является решение энергетической проблемы путем преобразования энергии сконцентрированных пучков положительно заряженных ионов в электрическую мощность с одновременной нейтрализацией из заряда за срезом магнитного сопла при создании электрореактивной силы ЭРД. Поставленная задача может быть решена при помощи рекуператора энергии положительно заряженных ионов [3], содержащего заряжающий многоколлекторный электрод, соединенный электрически с суперконденсатором, а также изолированный управляющий электрод, выходные, электрически запираемые каналы для выхода нейтральных частиц газа.

На рис. 1. показан механизм взаимодействия положительно заряженных ионов, например ионов аргона, с электронами, излучаемыми электродами-коллекторами, а также при взаимодействии с их поверхностью при рекуперации энергии.

Процесс нейтрализации катионов аргона происходит по следующей схеме:



Рекуперация энергии катионов в электрическую мощность осуществляется одновременно в объеме рекуператора и на многоколлекторных электродах. В объеме рекуператора процесс рекуперации происходит за счет электронной эмиссии из массива покрытия многоколлекторных электродов, выполненных из нанотрубок [3]. Эмиссия электронов в объемный заряд положительно заряженных ионов происходит за счет напряжения электрического поля [4] и термоэмиссии. Напряженность электрического поля при потенциально-ионной эмиссии может изменяться от 100 до 1000 эВ. Температура на поверхности многоколлекторного электрода может находиться в пределах 300–350 °С, что достаточно для развития термоэлектронной эмиссии. Многослойные электродные структуры, выполненные из графеновых нанотрубок, обладают большой подвижностью электронов и малой энергией их выхода 4,5 эВ при взаимодействии с положительно заряженными частицами в потоке и при высаживании их на электродах-коллекторах при неупругом столкновении, когда энергия столкновения меньше энергии  $E_0$  связи атома с поверхностью. Величина электронного торможения пропорциональна скорости иона или квадратному корню его энергии. Для торможения ионов на управляющий электрод 7 может подаваться напряжение  $U = 100\text{--}850$  В с частотой  $f = 10\text{--}500$  Гц в зависимости от энергии и вида положительно заряженных ионов. Воздействие ионов на торцевой заряжающий электрод ограничено энергией 70–1000 эВ, так как при такой энергии существенного выбивания атомов углерода из графита не наблюдается.

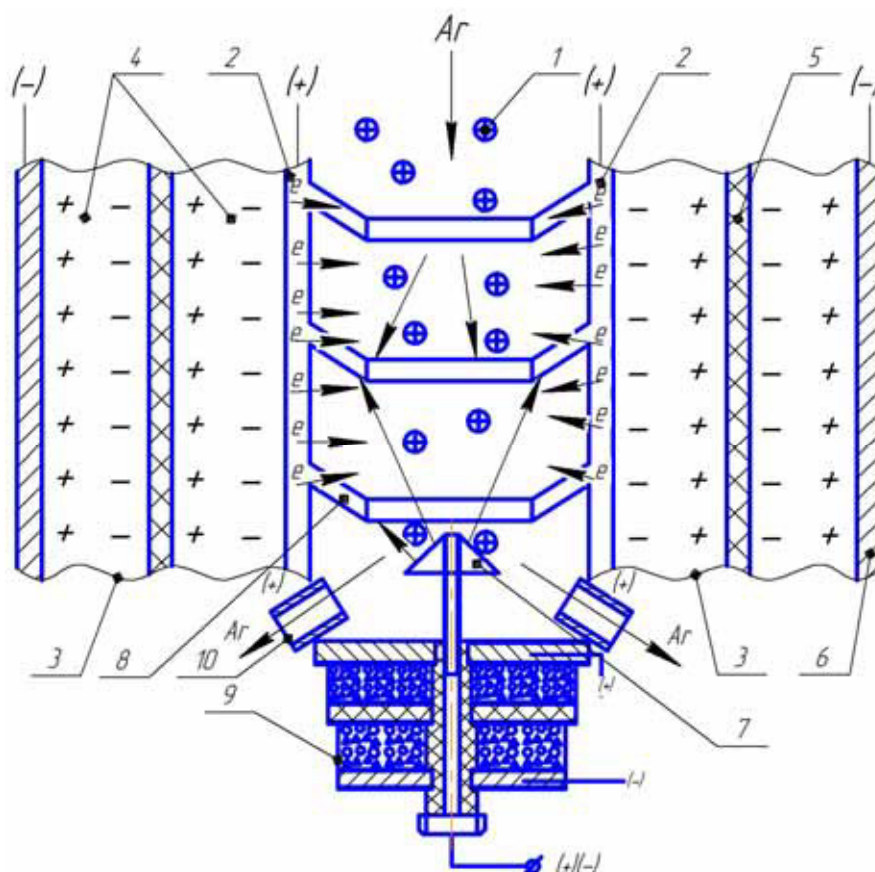


Рис. 1. Принципиальная схема рекуперации энергии ионов аргона и их нейтрализации:  
 1 – заряженные ионы аргона; 2 – трубчатый многоколлекторный электрод, выполненный из наномодифицированного углеродного материала; 3 – ионисторный конденсатор кольцевого типа; 4 – наномодифицированный электролит; 5 – кольцевой сепаратор, выполненный из полиамида; 6 – отрицательный электрод ионисторного конденсатора; 7 – управляющий электрод, выполненный из графита; 8 – электроды-коллекторы; 9 – торцевой электрод с ионисторным конденсатором; 10 – выходные каналы для газа

Fig. 1. Schematic diagram of argon ion energy recovery and neutralization:  
 1 – charged argon ions; 2 – tubular multi-collector electrode made of nano-modified carbon material; 3 – ionistor capacitor of ring type; 4 – nanomodified electrolyte; 5 – ring separator made of polyamide; 6 – negative electrode of ionic condenser; 7 – control electrode, made of graphite; 8 – electrodes-collectors; 9 – end electrode with ionistor capacitor; 10 – output channels for gas

Наиболее приемлемой энергией взаимодействия ионов с поверхностью электродов является  $E = 200$  эВ. Электронный поток со стороны электродов рекуператора образуется за счет эмиссионных характеристик нанотрубок и переноса электронов из двойного слоя ионисторных конденсаторов. Напряженность электрического поля в точке, из которой происходит эмиссия электронов, может быть разной по поверхности многоколлекторного электрода, но она должна быть выше работы выхода электрона не меньше чем в 2 раза. Поскольку максимальная плотность тока для УНТ ограничена  $106\text{--}109$  А/см<sup>2</sup>, то площадь заряжающих электродов ионисторного конденсатора может быть определена расчетом, а энергия пульсирующего заряда в полости рекуператора и энергия проводящего уровня нанотрубок согласованы на основе энергетического баланса работы рекуператора. Для управления процессом рекуперации может использоваться программируемый логический контроллер ПЛК-150. При рекуперации ионов аргона

образуется нейтральный газ аргон, который удаляется из полости рекуператора через выходные каналы для газа 10. Процесс преобразования энергии положительно заряженных ионов в электрическую мощность происходит при определенных условиях.

При взаимодействии положительно заряженных частиц с алмазной поверхностью в преобразователе, установленном на входе в рекуператор, и с электродами-коллекторами рекуператора их энергия должна быть в 2 раза больше энергии выхода электрона из вещества графеновых нанотрубок электродов-коллекторов и алмазоподобного покрытия преобразователя потока для того, чтобы происходила компенсация пространственного заряда в потоке [5–7]:

$$e \cdot U_i \geq 2 \cdot W_0, \quad (2)$$

где  $W_0$  – работа выхода;  $U_i$  – потенциал ионизации.

Важным параметром ионного пучка, характеризующим влияние объемного заряда в полости элект-

трода-коллектора на его свойства, является первеанс, который рассчитывается по формуле

$$P = \frac{I}{U^{3/2}}, \quad (3)$$

где  $I$  – ток пучка;  $U$  – ускоряющая разность потенциалов.

Качество пучка оценивается проекцией фазового объема  $V_\phi$  на плоскость:

$$V_\phi = 2R_0 \sqrt{\frac{2T_i}{mc^2}}, \quad (4)$$

где  $R_0$  – радиус пучка плазмы, служащей источником ионов с температурой  $T_i$ ;  $m$  – масса иона;  $c$  – скорость света.

При понижении продольной энергии пучка ионов при электростатическом торможении в рекуператоре энергии возрастает вклад перпендикулярной составляющей к продольной скорости движения заряженной частицы [8; 9]. В результате угол наклона траектории к первоначальному направлению движения частицы возрастает тем больше, чем выше степень торможения пучка. Степень торможения можно обеспечить до 0,95 без потери значительной доли пучка, т. е. можно использовать начальную энергию 100 эВ и затратить до 5 эВ.

Коэффициент полезного действия рекуператора энергии ионов в электростатическое электричество можно рассчитать по формуле

$$\eta_p = \frac{e\Phi_k}{W_0} \leq \frac{W_0 - W}{W_0}, \quad (5)$$

где  $W_0$  – начальная энергия ионов в пучке (работа выхода);  $W$  – разброс ионов в пучке по энергиям.

На многоколлекторных электродах образуется тормозящая разность потенциалов, тогда КПД можно оценить по формуле

$$\eta_p = 1 - \frac{W_x}{W_0} \sin^2 \alpha, \quad (6)$$

где  $\alpha$  – угол скоса коллектора;  $W_x$  – энергия ионов при взаимодействии с электродом.

Прикладной интерес для изготовления рекуператора энергии представляют эмиссионные характеристики нанотрубок. Известно, что с площади 1 мм<sup>2</sup> при напряжении  $U = 500$  В может быть получен ток эмиссии 0,5 МА. Эти данные находятся в хорошем соответствии с известным выражением Фаулера–Нордхейма:

$$I = c \cdot E^2 \exp\left(-k \frac{\Phi^{3/2}}{E^*}\right), \quad (7)$$

где  $c$  и  $k$  – постоянные;  $\Phi$  – работа выхода электрона;  $E^*$  – напряженность электрического поля в точке, где происходит эмиссия электронов [7].

Нанотрубки также могут себя проявлять как источники интенсивной термоэлектронной эмиссии при относительно низких температурах. Например, вклад термоэлектронной эмиссии становится заметным при температуре поверхности электродов 473 К и преоб-

ладает при  $T = 723$  К. Электронная эмиссия массива нанотрубок зависит также от среднего расстояния между ними  $t_0$ , максимум наблюдается при  $t_0 = 0,5$  мкм. Фактором, ограничивающим электронную эмиссию, является температурная неустойчивость углеродных нанотрубок (УНТ). В связи с изложенным, температура должна быть  $T \leq 850$  °С на многоколлекторных электродах, а с учетом работоспособности литиевого наномодифицированного электролита в ионисторном суперконденсаторе  $T \leq 150\text{--}200$  °С. Температурный режим в рекуператоре обеспечивается путем прокачки охлаждающей жидкости через специальные каналы, выполненные в диэлектрическом корпусе. При работе рекуператора на электродах-коллекторах необходимо создать требуемый электронный спектр с минимальными потерями их энергии при движении электронов от двойного электрического слоя заряжающего электрода ионисторного конденсатора к наружному слою, взаимодействующему с пульсирующим объемным зарядом положительно заряженных ионов в полости коллектора. Включение внешнего электрического поля при подаче на управляющий электрод (–) или (+) смещает электронный уровень нанотрубок и повышает энергию взаимодействия положительно заряженных ионов и электронов на электродах коллектора и в его объеме электрического заряда в полости многоколлекторного электрода.

Рабочие параметры рекуператоров энергии положительно заряженных ионов во многом зависят от свойств электрохимических суперконденсаторов ионисторного типа, которые могут использоваться в качестве преобразователей и накопителей электроэнергии. Свойства конденсаторов ионисторного типа [10–14], в которых электрическое поле сосредоточено не в поляризованном диэлектрике, как у традиционных конденсаторов, а в двойном электрическом слое на границе «электрод–электролит», определяются составом электролита и материалов электрода [15–18].

В энергонакопительной системе конденсаторов рекуператора энергии положительно заряженных ионов возможно использование жидких или твердых электролитов. Конденсаторы с двойным электрическим слоем на основе твердого электролита  $\text{RbAg}_4\text{I}_5$  разрабатывают и применяют в настоящее время.

Конкурентоспособность ионисторных суперконденсаторов с твердым электролитом  $\text{RbAg}_4\text{I}_5$ , несмотря на низкое рабочее напряжение и высокую цену, определяется совокупностью следующих параметров:

- широким интервалом рабочих температур: от  $-60$  до  $+125$  °С;
- высокой стойкостью к воздействиям механических факторов, в том числе к ударным нагрузкам с ускорением до 50 000 g;
- высокой стойкостью к воздействиям ионизирующих излучений, т. е. ионисторы сохраняют заряд во время и после воздействия этих факторов;
- низкими токами саморазрядки ( $\sim 10^{-9}$  А).

Также может применяться твердый электролит на основе лития, диапазон рабочих температур которого составляет от  $-70$  до  $150$  °С.

## Свойства электролитов суперконденсатора

Наименование параметров	Состав электролита	
	RbAg <sub>4</sub> I <sub>5</sub> (на основе рубидия)	LiClO <sub>4</sub> (на основе лития)
Интервал рабочих температур	–60–125 °C	–70–150 °C
Стойкость к ударным нагрузкам	50000 g	45000g
Ток самозарядный	~10 <sup>-9</sup> A	~10 <sup>-9</sup> A
Ионная проводимость	0,01 Ом/см	0,001 – 0,0001 Ом/см
Высокая стойкость к ионизированному излучению	Да	Да
Диапазон напряжений	1,1–5,6 В	1,1–4,6 В
Максимальный ток	220 Ма/см <sup>2</sup>	200 Ма/см <sup>2</sup>

Основные свойства перспективных электролитов суперконденсатора показаны в таблице.

Твердые электролиты – это твердые фазы (кристаллические или стеклообразные), в которых электрический ток проводят ионы. Ионная проводимость твердых электролитов обусловлена значительной упорядоченностью одной из подрешеток кристалла, что может быть вызвано фазовым переходом, дефектами кристаллической решетки или введением в материал специфических примесей [18–20]. Для твердых электролитов существует критическая температура, при которой происходит скачкообразное изменение ионной проводимости в несколько раз или даже на несколько порядков. Перспективными являются твердые электролиты в так называемом суперионном состоянии (СИС), т. е. в состоянии, в котором ионная проводимость превышает 0,01 Ом/см, и особенно суперионные проводники, для которых СИС реализуется при комнатной температуре.

Это дает возможность твердые электролиты использовать для создания новых индивидуальных компонентов рекуператора энергии, ионов и электронов, а также источников тока и конденсаторов с высокой удельной энергией. Суперионный проводник RbAg<sub>4</sub>I<sub>5</sub> имеет удельную электропроводность на много порядков выше, чем изученные до его открытия соединения. Суперионный проводник RbAg<sub>4</sub>I<sub>5</sub> относительно более устойчив к действиям света и влаги, что позволяет успешно его применять в производстве твердотельных ионисторов для создания рекуператоров энергии заряженных частиц, позволяющих преобразовать их энергию в электростатическое электричество.

Для изготовления электродов ионисторных конденсаторов (ИК), используемых в качестве накопителей энергии, могут использоваться три вида материалов: на основе углерода, оксида металлов и проводящих полимерных соединений.

Углерод и его различные полиморфные модификации наиболее широко используются в качестве материалов для изготовления электродов ионисторных конденсаторов, так как углеродный материал обладает высокой электропроводностью, развитой удельной поверхностью (до 3000 м<sup>2</sup>/г), хорошей коррозионной стойкостью, высокой температурной стабильностью, технологичностью и совместимостью в композитных материалах, относительно низкой стоимостью.

Углеродный материал может применяться в различных модификациях, включая порошки активированного угля, углеволоконную ткань, аэрогели, нанотрубки, графен [16–20].

Удельная поверхность углеродного материала оказывает большое влияние на электроемкость, структуру материала, распределение пор по размерам, природу поверхностных функциональных групп и электропроводность, а также другие параметры, которые определяют производительность ионисторного конденсатора. В настоящее время исследования направлены на разработку технологий получения углеродных материалов с требуемой структурой пор, распределением их по размерам, обеспечивающим создание электродов с высокой электроемкостью и низким сопротивлением, и обеспечивающих герметичность полости конденсатора. Варьируя углеродным сырьем, условиями активации (температурой, составом атмосферы и временем), можно обеспечить требуемую пористость и распределение по размерам при изготовлении электродов, например из древесных углей [21; 22].

К высокопористым углеродным материалам относятся углеродные аэрогели, полученные пиролизом органических аэрогелей. Их получают поликонденсацией резорцина и формальдегида в золь-гель-процессе, позволяющем контролировать плотность, размер пор и форму частиц. Матрица твердого аэрогеля состоит из соединенных между собой частиц коллоидного углерода или полимерных цепей [23].

После пиролиза материал на основе аэрогелей имеет более высокую электропроводность, чем у активированных углеродов. Углеродные аэрогели могут быть выполнены в форме монолитов, композитов, тонких пленок, порошков или микросфер, что позволяет при вариативности процесса изготавливать электроды из порошков или других компонентов аэрогелей, используя связующие, а также делать монолитный электрод.

Углеродные волокна могут быть получены из терморезистивных органических материалов (целлюлозы, фенольной смолы, полиакрилонитрила и пековых материалов).

Для создания электродов ионисторного конденсатора необходимо применять материалы с высокой удельной емкостью. На рис. 2 представлены некоторые перспективные материалы.



Эффективность работы рекуператора энергии положительно заряженных ионов во многом определяется построением его структурной схемы.

На рис. 3. показана структурная схема рекуператора энергии катионов. Она включает в себя заряжающий многоколлекторный электрод 1, наномодифицированный твердый электролит 2, сепаратор 3, выполненный из диэлектрического материала, электростатический электрод. Заряжающий многоколлекторный электрод 1 и электростатический электрод 4 выполнены многослойными, гибридными, из наномодифи-

цированных материалов (типа слой модифицированных  $MnO_2$  углеродных нанотрубок + электропроводящий полимер + углеродные наномодифицированные нанотрубки и нанопористый углеродный материал), что обеспечивает высокие емкость и электропроводность электродов и хорошие эмиссионные свойства индивидуальных компонентов рекуператора энергии. Электролит изготовлен из наномодифицированного материала на основе рубидия ( $RbAg_4 i_5$ ), позволяющего работать при температуре от  $-60$  до  $+125$  °C.

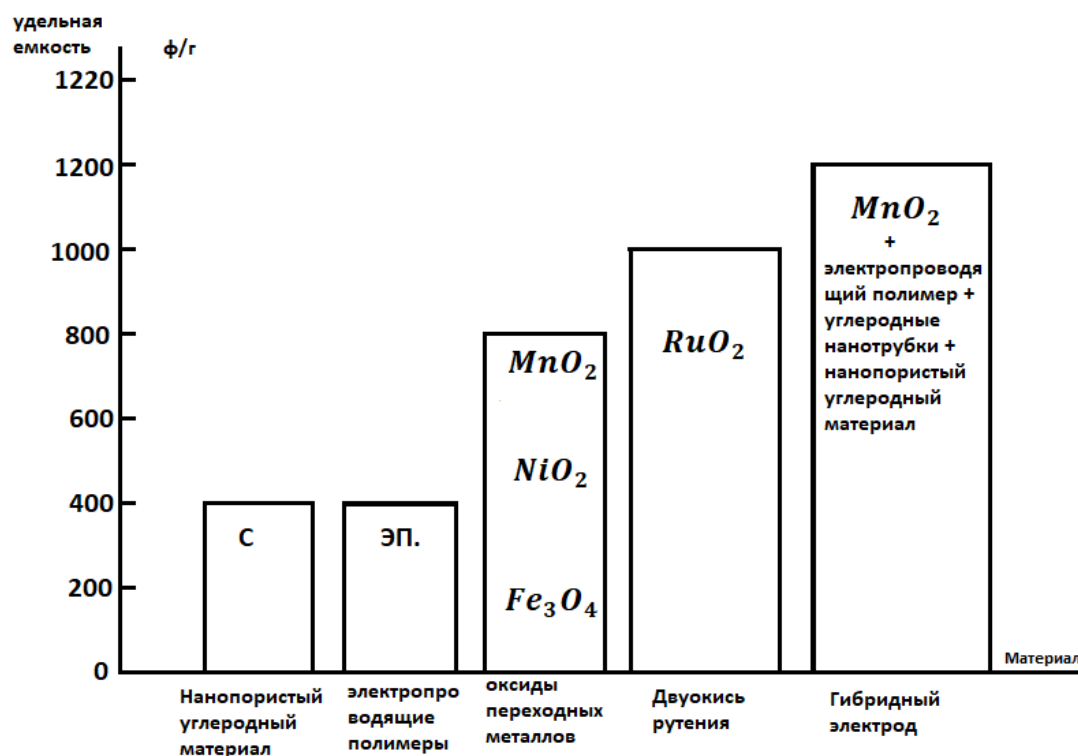


Рис. 2. Зависимость удельной емкости электрода суперконденсатора от применяемого материала

Fig. 2. Dependence of the specific capacity of the supercapacitor electrode on the material used

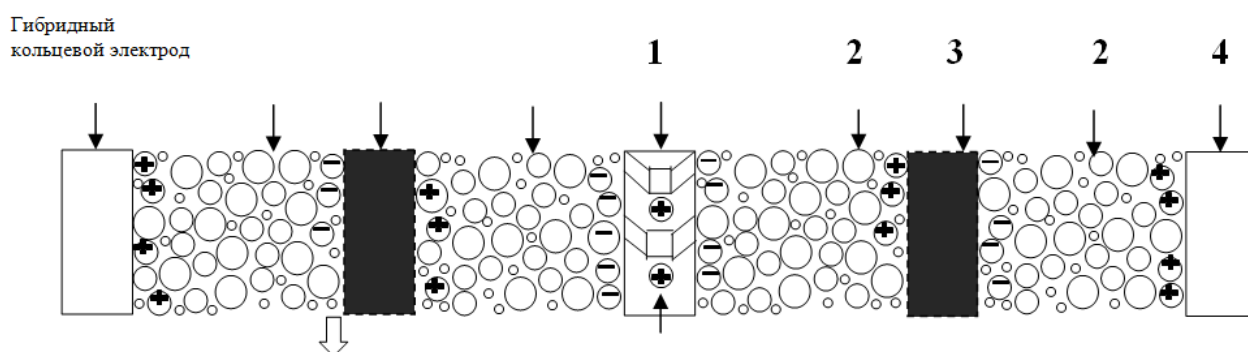


Рис. 3. Структурная схема рекуператора энергии положительно заряженных ионов

Fig. 3. Structural diagram heat exchanger energy positive ions

Процесс зарядки/разрядки в ионисторных конденсаторах происходит в слое ионов, сформированном на поверхностях положительного и отрицательного многослойно гибридных электродах, к примеру, на основе активированного угля / электропроводящего полимера / углеродных нанотрубок. Под действием приложенного напряжения анионы и катионы движутся к соответствующему электроду и накапливаются на его поверхности, образуя, таким образом, с зарядом электрода двойной электрический слой [11]. Вследствие этого и появилось название «конденсатор с двойным электрическим слоем» [12]. При приложении постоянного внешнего напряжения двойной электрический слой работает как изолирующий и не позволяет протекать сквозному току. Обычный диапазон напряжения работы ионисторов – от 2,3 до 5 В [13; 14]. Толщина двойного электрического слоя мала и сопоставима с размером молекулы, т. е. около 5–10 нм [15–17].

Электролит проникает между частицами активированного угля, и электрод таким образом «пропитан» электролитом.

Общую емкость ионисторного конденсатора можно представить как

$$C = \frac{S}{d}, \quad (8)$$

где  $d$  – толщина двойного электрического слоя, 5–10 нм;  $S$  – общая площадь.

При зарядке ионами аргона заряжающего электрода рекуператора зарядный ток  $i$  можно описать по формуле

$$i = \frac{U_a}{R} \cdot \exp\left(-\frac{t}{CR}\right), \quad (9)$$

где  $U_a$  – напряжение на заряжающем электроде;  $C$  – емкость конденсатора;  $R$  – сопротивление в конденсаторе;  $t$  – время зарядки конденсатора.

Емкость ионисторного конденсатора может быть оценена следующим образом:

$$C = \frac{I \cdot t}{U_1 - U_2}, \quad (10)$$

где:  $C$  – электростатическая емкость, Ф;  $I$  – тестовый ток, А;  $U_1 - U_2$  – тестовый диапазон напряжений, В;  $t$  – время, с.

Емкость зависит от тока разряда, чтобы уменьшить погрешность измерений, необходимо использовать стандартный ток разряда 1 мА/Ф.

Внутреннее сопротивление ионисторного конденсатора по сравнению с электролитическим велико, так как эквивалентная схема ионистора состоит из соединений большого количества малых конденсаторов, имеющих различные значения внутреннего сопротивления, поэтому ток зарядки может достигать до 10 мА.

Характеристика заряда ионистора при условии некоторых допущений может быть представлена выражением

$$U = U_0 \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{CR}\right) \right). \quad (11)$$

Время разряда для постоянного тока и постоянно-го сопротивления нагрузки при разряде приведены в выражениях (12) и (13) соответственно:

$$t = \frac{C(U_0 - U_1)}{I}, \quad (12)$$

$$t = -CR \ln\left(\frac{U_1}{U_0}\right), \quad (13)$$

где  $t$  – время;  $C$  – емкость;  $U_0$  – внутреннее напряжение;  $U_1$  – напряжение после  $t(c)$ ;  $I$  – ток нагрузки;  $R$  – сопротивление нагрузки.

Характеристика разряда ионистора по времени может быть представлена следующим образом:

$$t = \frac{C(U_1 - U_2)}{I}. \quad (14)$$

Характеристика саморазряда ионистора может быть представлена следующим образом:

$$U = U_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{CR_i}\right), \quad (15)$$

где  $R_i$  – сопротивление изоляции (сумма сопротивления частиц гибридного электрода).

Предполагаемый срок эксплуатации может быть рассчитан по формуле

$$t_s = \frac{CU}{i} = \frac{C(U_0 - iR - U_1)}{I + i_2}, \quad (16)$$

где  $C$  – емкость ионистора, Ф;  $i$  – ток в течение эксплуатации;  $i_2$  – ток утечки, А;  $R$  – внутреннее сопротивление ионистора, Ом на 1 кГц;  $U_1$  – напряжение, на которое разрядился ионистор, В;  $U_0$  – приложенное напряжение, В.

На рис. 4 показана схема контроля параметров и управления процессом работы рекуператора положительно заряженных ионов, совмещенная с процессом зарядки аккумулятора.

Рекуператор (рис. 4) работает следующим образом [3]: положительно заряженные частицы продуктов сгорания топлива под действием отрицательно электрического потенциала 1–1,5 кВ, подаваемого на кольцевой изолированный электрод 3, установленный на входе диффузора 1, направляются в конический канал 2 экспандера, где разгоняются дополнительно при помощи ускоряющего потенциала 1 кВ, поданного на кольцевой изолированный электрод 5 для формирования униполярного пучка положительно заряженных ионов. При движении пучка по коническому каналу 2 он уплотняется, некоторые ионы с большой энергией при этом могут взаимодействовать с электронами, выходящими с поверхности алмазоподобной пленки 9, сформированной на кремниевой решетке 10, нанесенной толщиной 0,2–0,4 мкм на внутреннюю поверхность канала. При движении пучка ионов по каналу на него может осуществляться воздействие со стороны изолированного ускоряющего-тормозящего электрода 7 для выравнивания и управления энергией потока.

Диффузор 1, конический канал 2, установленные на них кольцевые электроды 3, 5, 7 на изоляторах 4, 6, 8 в совокупности образуют преобразователь потока

заряженных частиц, который обеспечивает подачу в рекуператор пучка положительно заряженных ионов с соответствующей их массой, составом и энергией.

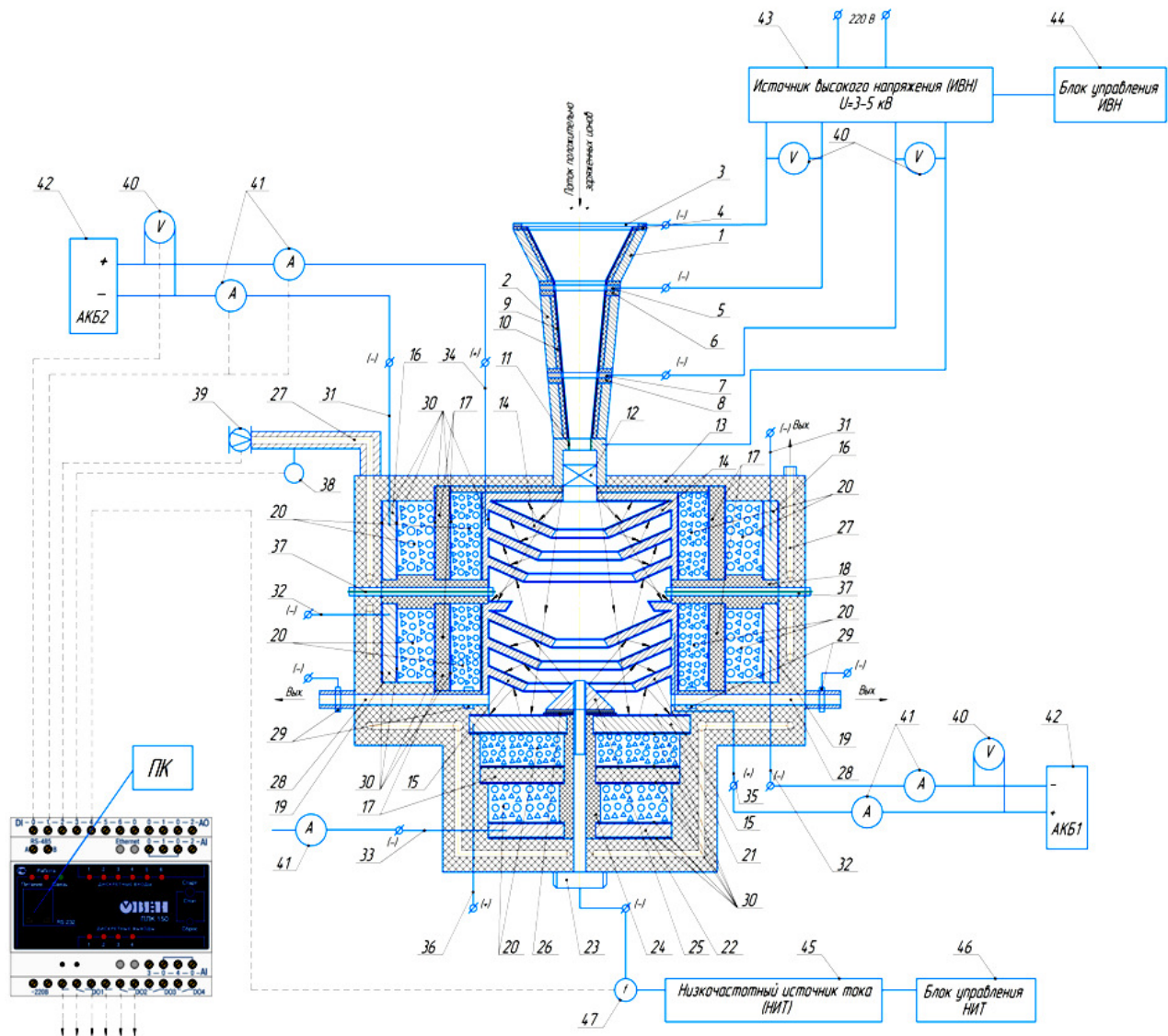


Рис. 4. Схема контроля параметров и управления процессами работы рекуператора положительно заряженных ионов продуктов сгорания топлива:

1 – диффузор; 2 – конический канал; 3, 5, 7 – кольцевые изолированные электроды; 4, 6, 8 – изоляторы; 9 – алмазоподобная пленка; 10 – кремниевая решетка; 11 – входной канал отражателя; 12 – устройство круговой развертки; 13 – диэлектрический корпус рекуператора; 14, 15, 21 – положительно заряженные многоколлекторные электроды; 16, 19, 22 – отрицательно заряженные многоколлекторные электроды; 17 – кольцевой сепаратор; 18 – кольцевой изолятор конденсаторов; 20 – твердый наномодифицированный электролит; 23 – управляющий электрод; 24 – изолятор; 25 – конический наконечник; 26 – изолятор; 27 – канал для прокачки охлаждающей жидкости; 28 – канал для выхода газа; 29 – отрицательно заряженные кольцевые электроды; 30 – углеродные нанотрубки; 31–33 – отрицательно заряженные электроды; 34–36 – положительно заряженные электроды; 37 – датчик контроля объемного заряда; 38 – патрубок; 39 – насос для подачи охлаждающей жидкости; 40 – вольтметр; 41 – амперметр; 42 – аккумуляторная батарея; 43 – источник высокого напряжения (ИВН); 44 – блок управления ИВН; 45 – низкочастотный источник тока (НИТ); 46 – блок управления НИТ; 47 – частотомер

Fig. 4. Control scheme of parameters and processes control of the recuperator of positively charged ions of fuel combustion products:

1 – diffuser; 2 – conical channel; 3, 5, 7 – annular insulated electrodes; 4, 6, 8 – insulators; 9 – diamond-like film; 10 – silicon grid; 11 – reflector input channel; 12 – circular scanner; 13 – dielectric case of the heat exchanger; 14, 15, 21 – positively charged multi-collector electrodes; 16, 19, 22 – negatively charged multi-collector electrodes; 18 – ring insulator of capacitors; 20 – solid nanomodified electrolyte; 23 – control electrode; 24 – insulator; 25 – conical tip; 26 – insulator; 27 – coolant flow channel; 28 – gas outlet channel; 29 – negatively charged ring electrodes; 30 – carbon nanotubes; 31–33 – negatively charged electrodes; 34–36 – positively charged electrodes; 37 – sensor monitoring space charge; 38 – pipe; 39 – pump for coolant; 40 – voltmeter; 41 – ammeter; 42 – battery; 43 – high voltage source (IVN); 44 – IVN control unit; 45 – low frequency current source (NIT); 46 – BAT control unit; 47 – frequency meter

Затем униполярный пучок положительно заряженных ионов через входной канал отражателя 11, выполненный из графита, поступает в рекуператор, установленный в диэлектрический корпус 13, проходит через устройство круговой развертки 12, при этом поток рассеивается, энергия их может быть от 60 до 1000 эВ, которая подбирается для каждого вида ионов или совокупности ионов. Положительно заряженные ионы взаимодействуют с первым многоколлекторным заряжающим электродом 14 первого бокового ионисторного конденсатора, установленного на кольцевом изоляторе 18, образованного двумя кольцевыми полостями, разделенными кольцевым сепаратором 17, заполненными твердым наномодифицированным электролитом 20. Взаимодействие рассеянных положительно заряженных ионов, обладающих меньшей энергией, с заряжающим многоколлекторным электродом 14 происходит в результате неупругого столкновения, в основном за счет электростатического и электронного механизма торможения, который связан с электронами коллекторов 14, покрытых многослойным покрытием из углеродных нанотрубок 30, модифицированных железом. Ионы со средней энергией проходят в полость второго рекуператора энергии и взаимодействуют со вторым многоколлекторным заряжающим электродом 15 тоже на основе электростатического и электронного механизма торможения. Поверхности второго многоколлекторного электрода также покрыты многослойным покрытием из углеродных наномодифицированных трубок 30, а сам многоколлекторный электрод связан со вторым боковым конденсатором ионисторного типа, образованным кольцевым электростатическим электродом 19 с полостями, разделенными кольцевым сепаратором 17, заполненными твердым наномодифицированным электролитом на литиевой основе. Величина электронного торможения пропорциональна скорости иона или квадратному корню его энергии. Энергия иона в рекуператоре также может тратиться за счет его столкновения с атомами газа, образующегося за счет регенерации ионизированного вещества и его взаимодействия с электродами-коллекторами [3].

Для выхода молекул газа из полости рекуператора в его корпусе выполнены каналы 28 с установленными на них изолированными отрицательно заряженными кольцевыми электродами 29, на которые подается потенциал 1–1,5 кВ для торможения положительно заряженных ионов. Положительно заряженные ионы с высокой энергией поступают на заряжающий электрод-коллектор 21 торцевого ионисторного конденсатора, обладающего более высокой емкостью, чем боковые конденсаторы, и меньшим внутренним сопротивлением, образованного электростатическим электродом 22 и полостями, разделенными кольцевым сепаратором 17 и заполненными твердым наномодифицированным электролитом 20. По центру торцевого конденсатора установлен управляющий изолированный электрод 23 на изоляторе 24 с коническим наконечником 25, выполненным из графита и установленном на изоляторе 26. На управляющий электрод 23 может подаваться потенциал от 100 до 850 В

с частотой 10–500 Гц в зависимости от энергии и вида положительно заряженных ионов. Воздействие положительно заряженных ионов на торцевой электрод-коллектор 21 может быть более сильным, поэтому по толщине он превосходит многоколлекторные электроды 14 и 15 в 4 и более раза.

Известно, что бомбардировка ионами носит импульсный нетермический характер, и в связи с тем, что  $E_{\text{пор}} = 23$  эВ при  $T = 200$  °С, торцевой электрод-коллектор 21 ионисторного конденсатора более интенсивно охлаждается, чем два боковых ионисторных конденсатора с многоколлекторными электродами 14 и 15 путем прокачки охлаждающей жидкости через каналы 27, выполненные в диэлектрическом корпусе. Воздействие ионов на торцевой заряжающий электрод ограничено энергией положительно заряженных частиц 70–1000 эВ, так как, как уже говорилось, при такой энергии существенного выбивания атомов электрода из графита не наблюдается. Все многоколлекторные электроды рекуператора устанавливались таким образом, чтобы угол падения положительно заряженных ионов на них был более 60°, для увеличения отражения от них ионов, которые в случае застревания их в поверхности электродов 14, 15 и 21 могут существенно изменить их электронный спектр. Для обеспечения электронного спектра электродов рекуператора их многослойные покрытия изготавливались из нанотрубок большого диаметра (1–1,5 нм и более), трубки использовались наномодифицированные, со средним расстоянием между ними 0,5 мкм, связями, обеспечивающими сопротивляемость УНТ бомбардировке заряженными частицами за счет параметров ориентации связей, снижающих их деформацию при взаимодействии с ионами.

Бомбардировка графитового наконечника 25 и выбивание из него электронов и ионов углерода может способствовать зашиванию дефектов УНТ при выбивании из них атомов, кроме того, графит способен выдерживать высокие температуры при эксплуатации (до 3000 °С). Часть положительно заряженных ионов при взаимодействии с электродами рекуператора заряжает их положительно, а сами ионы вещества при этом подвергались регенерации с образованием атомов вещества. Отраженная часть положительно заряженных частиц задерживается в рекуператоре за счет работы устройства круговой развертки 12.

Электронный поток со стороны электродов рекуператора образовывается за счет эмиссионных характеристик нанотрубок и переноса электронов из двойного слоя заряжающего электрода ионисторного конденсатора. Напряженность электрического поля в точке, из которой происходит эмиссия электронов, может быть разная по поверхности многоколлекторного электрода, но она должна быть выше работы выхода электрона. При воздействии переменного электрического поля со стороны управляющего электрода 23 происходит активация энергии взаимодействия положительно заряженных ионов с электронами у поверхности электродов рекуператора за счет пульсации положительно заряженного объемного заряда в полости рекуператора с частотой  $f = 10\text{--}500$  Гц и на-

пряжением 200–500 В. Это приводит к зарядке ионисторных конденсаторов при минимальном напряжении 0,16 В с возможностью транспортировки электронов в зоны, где происходит их взаимодействие с положительно заряженными ионами. При накоплении электростатического электричества на ионисторных конденсаторах до определенной емкости и напряжения на электродах не более 3–5 В заряд с них может сниматься с использованием отрицательно заряженных электродов 31, 32, 33 и положительно заряженных электродов 34, 35, 36, и электрическая энергия направляется на зарядку аккумуляторов 42 и питания электрической системы ЭРД. Поскольку максимальная плотность тока для УНТ ограничена 106–109 А/см<sup>2</sup>, то площадь заряжающих электродов ионисторных конденсаторов может быть определена расчетом, а энергия пульсирующего заряда в полости коллектора и энергия проводящего уровня нанотрубок согласованы на основе энергетического баланса работы рекуператора. Следует отметить, что рекуператоры для каждого вида положительно заряженных ионов могут иметь свои рабочие параметры и многообразные характеристики [2].

Отраженные заряженные частицы от графитового наконечника 25, управляющего электрода 23 и торцевого электрода коллектора 21 попадают на электроды многоколлекторной системы 14 и 15, где разряжаются и частично оседают на их поверхности. За счет пульсирующего переменного электрического поля со стороны управляющего изолированного электрода их энергия активируется, и они тоже разряжаются, а частицы, находящиеся в объеме, получают дополнительную энергию, позволяющую им активно участвовать в процессах рекуперации энергии и регенерации заряженных частиц. Многоколлекторные системы с широким энергетическим спектром торможения 14 и 15 рекуператора, являющиеся заряжающими электродами последовательно установленных кольцевых боковых конденсаторов ионисторного типа, а также цилиндрического заряжающего электрода-коллектора 21 торцевого кольцевого ионисторного конденсатора, обеспечивают широкую зону торможения за счет заполнения рабочих полостей суперконденсаторов наномодифицированным электролитом, например, на литиевой основе 20, различного химического состава с требуемой удельной емкостью, высоким выходным напряжением, токовой нагрузкой, электрохимическим потенциалом на положительно заряженных электродах 14, 15, 21, а также отрицательно заряженных электродах 16, 19, 22, обеспечивающих высокую плотность энергии при температурном режиме  $T \leq 200$  °С. Для управления процессом рекуперации энергии – потенциалами на электродах рекуператора 14, 15, 21, объемным зарядом в полости рекуператора, режимом зарядки и разрядки, напряжением на электродах, температурным режимом на ионисторных конденсаторах, может использоваться контроллер ПЛК-150, соединенный с цифровыми приборами для измерения тока, напряжения, контроля объемного заряда 37, а также коммутатором. Управление режимом рекуперации и работой ионисторных конденса-

торов может осуществляться комплексно при помощи контроллера путем регулирования напряжения, измеряемого вольтметром 40, на ускоряющих 3 и 5, ускоряюще-тормозящем 7 и управляющем электродах 23, на который подается напряжение от НИТ 45, управляемое блоком управления 46 и контролируемое частотомером 47, а также регулирования величины тока, напряжения при зарядке и разрядке конденсаторов ионисторного типа на потребителя электроэнергии, в том числе за счет поддержания остаточного потенциала на электродах и на электродах-коллекторах. Все параметры работы рекуператора и ионисторного конденсатора могут быть сбалансированы за счет управления процессом рекуперации контроллером ПЛК-150, а также при помощи блока управления 44 источника высокого напряжения (ИВН) 45 [24]. Ионисторные конденсаторы в системе рекуперации могут быть использованы как преобразующий элемент, накопитель электроэнергии и источник напряжения. Их зарядка и разрядка в импульсном режиме способствует интенсификации рекуперации энергии положительно заряженных ионов.

В процессе экспериментальных исследований рекуперации энергии положительно заряженных частиц [3] использовались пучки медленных положительно заряженных ионов аргона, извлекаемых из потока работающего генератора ионов в специальной вакуумной камере высоким ускоряемым потенциалом 5 кВ на кольцевом электроде 3 и ускоряемых  $U = 3$  кВ при помощи дополнительного ускоряющего электрода 5 с последующим торможением до 800 эВ при помощи ускоряюще-тормозящего электрода 7 и торможением перед торцевым заряжающим электродом-коллектором менее 200 эВ управляющим изолированным электродом-отражателем 23. При этом на электродах первого бокового конденсатора было получено напряжение  $U = 2,2\text{--}2,4$  В, на втором боковом конденсаторе –  $U = 2,6\text{--}2,8$  В, на торцевом конденсаторе –  $U = 3,5\text{--}3,8$  В течение времени 15–20 минут. Контроллер ПЛК-150 (рис. 4) использовался при проведении эксперимента [3], вольтметры 40 и амперметры 41 применялись для контроля электрических параметров, а регулятор расхода охлаждающей жидкости 38 – для стабилизации температурного режима при подаче хладагента при помощи насоса 39.

Положительный эффект обусловлен тем, что при работе рекуператора положительно заряженных ионов одновременно осуществляется рекуперация их электрической энергии с регенерацией положительно заряженных частиц, что обеспечивает повышение КПД, снижение габаритно-массовых характеристик рекуператора и может способствовать эффективной работе ЭРД, улучшению его энергообеспечения, а также надежной работе космического аппарата.

Для управления процессами зарядки и разрядки конденсаторов ионисторного типа рекомендуется использовать контроллер ПЛК-150 совместно с цифровыми приборами: цифровым вольтметром SM501, цифровым амперметром SM020. Контроллер является устройством управления в электронике и вычислительной технике. Промышленный контроллер представляет собой управляющее устройство, применяе-

мое в промышленности и других отраслях для автоматизации технологических процессов. Программируемый логический контроллер (ПЛК) относится к промышленному оптимизированному управляющему устройству для выполнения логических операций. В качестве основного режима работы ПЛК выступает его длительное автономное использование, зачастую в неблагоприятных условиях окружающей среды, без серьезного обслуживания и практически без вмешательства человека.

**Заключение.** В результате выполненных исследований предложена принципиальная схема рекуперации энергии пучков положительно заряженных ионов с одновременной нейтрализацией их электрического заряда. Обоснованы электрические параметры, механизм рекуперации и нейтрализации пространственного заряда пучка положительно заряженных ионов. Показана структурная схема рекуператора энергии положительно заряженных ионов, представляющая собой систему многоколлекторных и управляющего электродов, выполненных из наноконпозиционных углеродных материалов, интегрированных с конденсатором ионисторного типа. Разработаны конструкторско-технологические решения при изготовлении индивидуальных компонентов и для контроля параметров рекуператора энергии положительно заряженных ионов.

Развитие перспективных методов преобразования энергии пучков плазмы положительно заряженных ионов в электрическую мощность будет способствовать повышению энергетической эффективности ЭРД, а также созданию новых энергетических источников электроэнергии, работающих на потоке плазмы.

#### 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. 2016. Т. 17, № 3. С. 729–737.
3. Пат. 2617689 Российская Федерация, МПК В 01 D 69/00 (2006.01). Рекуператор энергии положительно заряженных ионов / Трифанов И. В. Кузьмин Б. Н., Трифанов В. И., Оборина Л. И. № 2016115104 ; заявл. 19.04.2016 ; опубл. 26.04.2017, Бюл. № 12. 8 с.
4. Воронина Е. Н. Воздействие быстрых атомов на наноструктуры и полимерные композиты : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.08 : защищ. 28.03.2012. М., 2012. 143 с.
5. Курнаев В. А., Протасов Ю. С., Цветков И. В. Введение в пучковую электронику : учеб. пособие / под ред. В. А. Курнаева. М. : МИФИ, 2008. 452 с.
6. Елецкий А. В. Механические свойства углеродных наноструктур и материалов на их основе : материал технической информации // Успехи физических наук. 2007. Т. 177, № 3. С. 233–275.
7. Бочаров Г. С. Эмиссионные свойства катодов на основе углеродных нанотрубок : дис. ... канд. техн. наук : 01.04.14. М., 2007. 96 с.
8. Пат. 1741595 Российская Федерация, МПК Н 05 Н 7/12 (1995.01). Рекуператор ионного тока / Мартынов М. И., Чекалин Г. Г. № 4845805/21 ; заявл. 31.05.1990 ; опубл. 27.08.1995. 10 с.
9. Димитров С. К., Обухов В. А. Системы торможения и рекуперации энергии плазменных потоков, (Ионные инжекторы и плазменные ускорители) / под ред. А. И. Морозова и Н. Н. Семашко. М. : Энергоатомиздат, 1989. С. 193–219.
10. Рекуперация энергии квазиуниполярных пучков электронов и ионов в электроэнергию ЭРД / Д. Р. Рыжов [и др.] // Решетневские чтения : материалы Междунар. науч. конф. : в 2 ч. Красноярск, 2015. С. 171–172.
11. Conway B. E. Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals Technological Applications. New York : Kuwer-Plenum Publ. Co., 1999. 10 p.
12. Панкрашкин А. Ионисторы Panasonic: физика, принцип работы, параметры [Электронный ресурс] // Компоненты и технологии. 2006. № 9. URL: [http://www.kit-e.ru/articles/condenser/2006\\_9\\_12](http://www.kit-e.ru/articles/condenser/2006_9_12) (дата обращения: 23.05.2018).
13. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): разработка и производство / В. П. Кузнецов [и др.] // Компоненты и технологии. 2005. № 6. 12 с.
14. 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.
15. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): новые разработки / В. П. Кузнецов [и др.] // Электрическое питание. 2006. № 2. 8 с.
16. Conway B. E. Pseudocapacitance; its Nature and Relation to Double Layer Capacitance of Electrochemical Capacitors / University of Ottawa, Canada. 15 p.
17. Ионисторы – электрохимические твердотельные элементы / В. П. Кузнецов [и др.] // Электронная промышленность. 1975. № 8. С. 42–44.
18. Graphene-based supercapacitor with an ultrahigh energy density / C. Liu [et al.] // Nano Letters. 2010. Vol. 10. P. 53–4868.
19. Graphene-based ultracapacitor / M. D. Stoller [et al.] // Nano letters. 2008. Vol. 8, № 10. P. 3498–3502.
20. Kotz R., Carlen M. Principles and applications of electrochemical capacitors // Electrochimica Acta. 2000. Vol. 45, № 15–16. P. 2483–2498.
21. Pandolfo A. G., Hollenkamp A. F. Carbon properties and their role in supercapacitors // Journal of power sources. 2006. Vol. 157, № 1. P. 11–17.
22. Hybrid nanostructured materials for high-performance electrochemical capacitors / G. Yu [et al.] // Nano Energy. 2013. Vol. 2. P. 213–234.
23. Писарева Т. А. Физические основы накопления энергии и электродные материалы электрохимических конденсаторов // Вестник Удмуртского университета. Физика и химия. 2014. Вып. 3. С. 30–41.
24. Филимонова Н. П. Технология автоматизированного контроля электрических параметров ионисторов : Атомный проект // Информационный журнал специалистов в области атомного машиностроения. 2016. № 23. С. 8–9.

## 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., Trifanov V. I., Oborina L. I. *Rekuperator energii polozhitel'no zaryazhennykh ionov* [The heat exchanger energy positive ions]. Patent RF, no 2617689, 2017.
4. Voronina E. N. *Vozdeystvie bystrykh atomov na nanostruktury i polimernye kompozity*. Cand. Diss. [Effects of fast atoms on nanostructures and polymer composites. Cand. Diss.]. Moscow, 2012.
5. KurnaeV V. A., Protasov Yu. S., Tsvetkov I. V. *Vvedenie v puchkovuyu elektroniku* [Introduction to beam electronics]. Moscow, MEPhI Publ., 2008, 452 p.
6. Eletskiy A. V. [Mechanical properties of carbon nanostructures and materials based on them]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 2007, Vol. 177, No. 3, P. 233–275 (In Russ.).
7. Bocharov G. S. *Emissionnye svoystva katodov na osnove uglerodnykh nanotrubok*. Cand. Diss. [Emission properties of cathodes based on carbon nanotubes. Cand. Diss.]. Moscow, 2007.
8. Martynov M. I., Chekalin G. G. *Rekuperator ionnogo toka* [Ion current recuperator]. Patent RF, no. 1741595, 1995.
9. Dimitrov S. K., Obukhov V. A. *Sistemy tormozheniya i rekuperatsii energii plazmennyykh potokov (Ionnye inzhektory i plazmennyye uskoriteli)* [Braking systems and recovery of plasma flows of energy (Ionic injectors and plasma accelerators)]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989, P. 193–219.
10. Trifanov I. V., Ryzhov D. R., Kaz'min B. N., Oborina L. I. [Energy recovery kvaziunipolyarnyyh beams of electrons and ions in the ERE energy]. *Reshetnevskie chteniya*. Krasnoyarsk, 2015, P. 98–99 (In Russ.).
11. Conway B. E. *Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals Technological Applications*. Kuwer-Plenum Publ. Co., New York, 1999.
12. 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/>.
13. Kuznetsov V., Pan'kin O. [Capacitors with a double electric layer (supercapacitor): the development and production]. *Komponenty i tekhnologii*. 2005, No. 6, 12 p. (In Russ.).
14. Galushko A. I., Grom Yu. I., Lazarev A. N., Salikhov R. S. [Study of ionistor properties and efficiency of their application in spacecraft power supply systems]. *Voprosy elektromekhaniki*. 2013, Vol. 133, P. 15–18 (In Russ.).
15. Kuznetsov V. P. [Capacitors with a double electric layer (supercapacitor): the development and production]. *Elektricheskoe pitanie*. 2006, No. 2, 8 p. (In Russ.).
16. B. E. Conway (University of Ottawa, Canada). Pseudocapacitance; its Nature and Relation to Double Layer Capacitance of Electrochemical Capacitors.
17. Kuznetsov V. P. [Ionistors-electrochemical solid-state elements]. *Elektronnaya promyshlennost*. 1975, No. 8, P. 42–44 (In Russ.).
18. Liu C., Yu Z., Neff D., Zhamu A., Jang B. Z. Graphene-based supercapacitor with an ultrahigh energy density. *Nano Letters*. 2010, Vol. 10, P. 53–4868.
19. Stoller M. D., Park S., Zhu Y., An J., Ruoff R. S. Graphene-based ultracapacitor. *Nano letters*. 2008, Vol. 8, No. 10, P. 3498–3502.
20. Kotz R., Carlen M. Principles and applications of electrochemical capacitors. *Electrochimica Acta*. 2000, Vol. 45, No. 15–16, P. 2483–2498.
21. Pandolfo A. G., Hollenkamp A. F. Carbon properties and their role in supercapacitors. *Journal of power sources*. 2006, Vol. 157, No. 1, P. 11–17.
22. Yu G., Xie X., Pan L., Bao Zh., Cui Y. Hybrid nanostructured materials for high-performance electrochemical capacitors. *Nano Energy*. 2013, Vol. 2, P. 213–234.
23. Pisareva T. A. [Physical bases of energy storage and electrode materials of electrochemical capacitors]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta (Fizika i Khimiya)*. 2014, Vol. 3, P. 30–41.
24. Filimonova N. P. [Technology of automated control of electrical parameters of ionistors]. *Atomnyy proekt*. 2016, No. 23, P. 8–9.

© Трифанов И. В., Суханова О. А., Мелкозеров М. Г., Жирнова Е. А., Трифанов В. И., 2018



## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Бельская Екатерина Николаевна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ketrin\_nii@mail.ru.

**Бренинг Дарья Владимировна** – студент группы БПЭ 16-01, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: brening98@gmail.com.

**Вдовых Полина Евгеньевна** – студент, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: polina.vdovykh@gmail.com.

**Верхотурова Мария Владимировна** – студент, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: adventurertime66@yandex.ru.

**Воронин Антон Сергеевич** – кандидат технических наук, научный сотрудник отдела молекулярной электроники, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН». E-mail: a.voronin1988@mail.ru.

**Воронцова Евгения Олеговна** – инженер-конструктор, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: jenvoroncova@gmail.com.

**Ереско Сергей Павлович** – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Академии наук Высшей школы РФ, заслуженный изобретатель РФ; кафедра основ конструирования машин, Институт машиноведения и мехатроники, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ereskosp@mail.sibsau.ru, eresko07@mail.ru.

**Ереско Татьяна Трофимовна** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой основ конструирования машин, Институт машиноведения и мехатроники, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ereskottt@mail.ru.

**Жирнова Екатерина Александровна** – кандидат философских наук, доцент, доцент кафедры управления качеством и сертификации, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: karakara85@yandex.ru.

**Журавлев Виктор Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры двигателей летательных аппаратов, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: vz@mail.sibsau.ru.

**Зализняк Виктор Евгеньевич** – Ph.D., доцент, базовая кафедра математического моделирования и процессов управления, Институт математики и фундаментальной информатики, Сибирский федеральный университет. E-mail: vزالizniak@mail.ru.

**Золотов Олег Александрович** – кандидат физико-математических наук, доцент, базовая кафедра математического моделирования и процессов управления, Институт математики и фундаментальной информатики, Сибирский федеральный университет. E-mail: ozolot\_@mail.ru.

**Золотова Ольга Павловна** – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра технической физики, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: zolotova@sibsau.ru.

**Ивакин Ян Альбертович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инноватики и интегрированных систем качества, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. E-mail: ivakin@oogis.ru.

**Иванченко Федор Сергеевич** – аспирант, Сибирский федеральный университет; младший научный сотрудник отдела молекулярной электроники, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН». E-mail: orion-leo@mail.ru.

**Карасева Маргарита Владимировна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры системного анализа и исследования операций, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева; доцент кафедры экономики и информационных технологий менеджмента, Сибирский федеральный университет. E-mail: karaseva-margarita@rambler.ru.

**Ковалёв Владимир Степанович** – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт биофизики СО РАН. E-mail: kovalev49@mail.ru.

**Ковалев Дмитрий Игоревич** – инженер научно-исследовательского управления, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: grimm7jow@gmail.com.

**Ковалев Игорь Владимирович** – доктор технических наук, профессор; профессор кафедры системного анализа и исследования операций, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева; профессор кафедры информатики, Сибирский федеральный университет. E-mail: kovalev.fsu@mail.ru.

**Колесник Валерий Васильевич** – заместитель начальника цеха тепловой автоматики и измерений по эксплуатации, филиал ПАО «ОГК-2» – Красноярская ГРЭС-2. E-mail: balans78@inbox.ru.

**Крючков Павел Александрович** – инженер-конструктор, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kriuchkovpa@iss-reshetnev.ru.



**Кукушкин Евгений Владимирович** – ассистент, кафедра основ конструирования машин, Институт машиноведения и мехатроники, Сибирский государственный университет науки и технологий имени М. Ф. Решетнева. E-mail: ironjeck@mail.ru.

**Лосев Василий Владимирович** – кандидат технических наук, доцент, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: basilos@mail.ru.

**Лукьяненко Михаил Васильевич** – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой систем автоматического управления, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: Sibgau-sau@yandex.ru.

**Мануковский Николай Сергеевич** – кандидат биологических наук, доцент кафедры замкнутых экологических систем, Институт информатики и телекоммуникаций, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева; старший научный сотрудник, Институт биофизики СО РАН. E-mail: mana49@mail.ru.

**Медведев Александр Васильевич** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры системного анализа и исследования операций, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. Тел. 8(3912)90-50-11.

**Мелкозеров Максим Геннадьевич** – кандидат технических наук, доцент, директор Института машиноведения и мехатроники, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: melkozerov\_mg@sibsau.ru.

**Меновщиков Владимир Александрович** – доктор технических наук, профессор, кафедра основ конструирования машин, Институт машиноведения и мехатроники, Сибирский государственный университет науки и технологий имени М. Ф. Решетнева. E-mail: menovchikovva@mail.sibsau.ru.

**Мироненко Евгений Дмитриевич** – инженер-конструктор, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: mironenko91@iss-reshetnev.ru.

**Михеев Анатолий Егорович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой летательных аппаратов, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: michla@mail.ru.

**Михов Евгений Дмитриевич** – заведующий методическим кабинетом учебного военного центра Военно-инженерного института, Сибирский федеральный университет. E-mail: edmihovi@mail.ru.

**Морозов Егор Андреевич** – лаборант, Институт биофизики СО РАН; аспирант, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: transserfer89@gmail.com.

**Мурыгин Александр Владимирович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-управляющих систем, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: avm514@mail.ru.

**Назаров Владимир Павлович** – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой двигателей летательных аппаратов, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: nazarov@sibsau.ru.

**Назарова Лариса Петровна** – доцент кафедры технической механики, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: nazarova@sibsau.ru.

**Немцев Иван Васильевич** – научный сотрудник отдела молекулярной электроники, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН». E-mail: ivan\_nemtsev@mail.ru.

**Осипов Павел Андреевич** – магистрант, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: uoo-ikit@mail.ru.

**Осипова Яна Сергеевна** – магистрант, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: yana\_is\_storm@mail.ru.

**Пашковская Ольга Владимировна** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационных экономических систем, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: pashkovskaya@mail.sibsau.ru.

**Пятаев Алексей Сергеевич** – аспирант очной формы обучения кафедры информатики и вычислительной техники, Институт информатики и телекоммуникаций, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: pyataev.alex@gmail.com.

**Савостьянова Ирина Леонидовна** – кандидат педагогических наук, доцент кафедры информационных экономических систем, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: gurpa@inbox.ru.

**Савчин Дмитрий Александрович** – студент, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: savchin.dim@yandex.ru.

**Сенашов Сергей Иванович** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных экономических систем, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: sen@sibsau.ru.

**Симунин Михаил Максимович** – кандидат технических наук, научный сотрудник, КНЦ СО РАН. E-mail: michanel@mail.ru, тел. +79131973926.

**Смирнов Александр Олегович** – доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой высшей математики и механики, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. E-mail: alsmir@guar.ru.

**Суханова Ольга Андреевна** – магистрант кафедры управления качеством и сертификации, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: olkasukhanova@mail.ru.

**Тасейко Ольга Викторовна** – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: taseiko@gmail.com.

**Титенков Сергей Валерьевич** – ведущий инженер-конструктор, АО «Красноярский машиностроительный завод». E-mail: Titenkov-sv@mail.ru.

**Тихомиров Александр Аполлинарьевич** – доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой замкнутых экологических систем, Институт информатики и телекоммуникаций, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва; заведующий лабораторией управляемого биосинтеза фототрофов, Институт биофизики СО РАН. E-mail: alex-tikhomirov@yandex.ru.

**Трифанов Владимир Иванович** – магистрант кафедры управления качеством и сертификации, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. 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. Решетнева. E-mail: sibgau-uks@mail.ru.

**Трифонов Сергей Викторович** – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт биофизики СО РАН; старший преподаватель, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: trifonov\_sergei@inbox.ru.

**Фадеев Юрий Владимирович** – младший научный сотрудник отдела молекулярной электроники, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН». E-mail: daf.hf@list.ru.

**Фролова Елена Александровна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. E-mail: frolovaelena@mail.ru.

**Хартов Станислав Викторович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела молекулярной электроники, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН». E-mail: stas\_fl@list.ru.

**Хоркуш Анатолий Владимирович** – магистрант, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: cloha@mail.ru.

**Черная Мария Михайловна** – кандидат технических наук, научный сотрудник, НИИ космических технологий, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. E-mail: cmm91@inbox.ru.

**Швецова Дарья Сергеевна** – студент, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: darya.shvetsova@yandex.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Bel'skaya Ekaterina Nikolaevna** – Cand. Sc., Docent, Department of Health and safety, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: ketrin\_nii@mail.ru.

**Brening Darya Vladimirovna** – student, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: brening98@gmail.com.

**Chernaya Mariya Mikhailovna** – Cand. Sc., research officer, Research Institute of space technologies, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. E-mail: cmm91@inbox.ru.

**Eresko Sergei Pavlovich** – Dr. Sc., professor, Corresponding member of Academy of Higher Education of the Russian Federation, honored inventor of the Russian Federation; Department of Fundamentals of machine design, Institute of Mechanical Engineering and Mechatronics, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: ereskosp@mail.sibsau.ru, eresko07@mail.ru.

**Eresko Tatiana Trofimovna** – Dr. Sc., Docent, Department of Fundamentals of machine design, Institute of Mechanical Engineering and Mechatronics, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Professor. E-mail: ereskott@mail.ru.

**Fadeev Yurii Vladimirovich** – junior researcher, Department of Molecular electronics, FIC KSC SB RAS. E-mail: daf.hf@list.ru.

**Frolova Elena Alexandrovna** – Cand. Sc., Docent, Department of Innovatics and Integrated Quality Systems, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. E-mail: frolovaelena@mail.ru.

**Ivanchenko Fedor Sergeevich** – postgraduate student, Siberian Federal University; junior researcher, Department of Molecular electronics, FIC KSC SB RAS. E-mail: orion-leo@mail.ru.

**Ivakin Yan Albertovich** – Dr. Sc., professor, professor of Department of Innovatics and Integrated Quality Systems, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. E-mail: ivakin@oogis.ru.

**Karaseva Margarita Vladimirovna** – Cand. Sc., Docent; Docent of Department of Systems Analysis and Operations Research, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; Docent of Department of Economics and Information Technology of Management, Siberian Federal University. E-mail: karaseva-margarita@rambler.ru.

**Khartov Stanislav Viktorovich** – Cand. Sc., senior researcher, Department of Molecular electronics, FIC KSC SB RAS. E-mail: stas\_fl@list.ru.

**Khorkush Anatolii Vladimirovich** – Master's degree student, Institute of Space and information technologies, Siberian Federal University. E-mail: cloha@mail.ru.

**Kolesnik Valery Vasilyevich** – deputy head, Department of Thermal Automation and Measurement for Operation, Krasnoyarskaya GRES-2, Branch of PJSC – OGK-2. E-mail: balans78@inbox.ru.

**Kovalev Dmitry Igorevich** – engineer of Research and Development Department, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: grimm7jow@gmail.com.

**Kovalev Igor Vladimirovich** – Dr. Sc., professor, Department of System analysis and Operations Research, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; professor of Department of Computer Sciences, Siberian Federal University. E-mail: kovalev.fsu@mail.ru.

**Kovalev Vladimir Stepanovich** – Cand. Sc., senior researcher, Institute of Biophysics SB RAS. E-mail: kovalev49@mail.ru.

**Kryuchkov Pavel Aleksandrovich** – product design engineer, JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: kriuchkovpa@iss-reshetnev.ru.

**Kukushkin Evgenii Vladimirovich** – assistant, Department of Fundamentals of machine design, Institute of Mechanical Engineering and Mechatronics, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: ironjeck@mail.ru.

**Losev Vasiliy Vladimirovich** – Cand. Sc., Docent, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: asilos@mail.ru.

**Lukyanenko Mikhail Vasilyevich** – Cand. Sc., professor, head of Department of Automatic control systems, Reshetnev Siberian State University of Science and Technologies. E-mail: sibgau-sau@yandex.ru.

**Manukovsky Nikolay Sergeevich** – Cand. Sc., Docent of Department of Closed Ecological Systems, Institute of Informatics and Telecommunications, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; senior researcher of Institute of Biophysics SB RAS. E-mail: mana49@mail.ru.

**Medvedev Alexandr Vasil'evich** – Dr. Sc., professor, Department of System analysis and research of operations, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology.

**Melkozerov Maksim Gennad'evich** – Cand. Sc., Docent, Director of Institute of machine science and mechatronics, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: melkozerov\_mg@sibsau.ru.

**Menovshchikov Vladimir Alexandrovich** – Dr. Sc., professor, Department of Fundamentals of machine design, Institute of Mechanical Engineering and Mechatronics, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: menovshchikovva@mail.sibsau.ru.

**Miheev Anatoly Egorovich** – Dr. Sc., professor, head of Department, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: michla@mail.ru.

**Mikhov Evgenii Dmitrievich** – head of the methodics department, Military training center, Military engineering institute, Siberian Federal University. E-mail: edmihovi@mail.ru.

**Mironenko Evgeny Dmitrievich** – product design engineer, JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: mironenko91@iss-reshetnev.ru.

**Morozov Yegor Andreevich** – laboratory technician, Institute of Biophysics SB RAS; postgraduate student, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: transserfer89@gmail.com.

**Murygin Alexander Vladimirovich** – Dr. Sc., professor, head of Department of Information and Management Systems, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: avm514@mail.ru.

**Nazarov Vladimir Pavlovich** – Cand. Sc., professor, head of Department of Aircraft Engines, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: nazarov@sibsau.ru.

**Nazarova Larisa Petrovna** – Docent of Department of Technical Mechanics, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: nazarova@sibsau.ru.

**Nemtsev Ivan Vasilevich** – researcher, Department of Molecular electronic, FIC KSC SB RAS. E-mail: ivan\_nemtsev@mail.ru.

**Osipov Pavel Andreevich** – Master’s degree student, Institute of Space and information technologies, Siberian Federal University. E-mail: uoo-ikit@mail.ru.

**Osipova Jana Sergeevna** – Master’s degree student, Institute of Space and information technologies, Siberian Federal University. E-mail: yana\_is\_storm@mail.ru.

**Pashkovskaya Olga Vladimirovna** – Cand. Sc., Docent, Department of Information Economic Systems, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: ruppa@inbox.ru.

**Pyataev Alexey Sergeevich** – postgraduate student, Department of Informatics and computer engineering, Reshetnev Siberian State University of Science and Technologies.

**Savchin Dmitriy Aleksandrovich** – student, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: savchin.dim@yandex.ru.

**Savostyanova Irina Leonidovna** – Cand. Sc., Docent, Department of Information Economic Systems, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: ruppa@inbox.ru.

**Senashov Sergey Ivanovich** – Dr. Sc., professor, head of Department of Information Economic Systems, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: sen@sibsau.ru.

**Shvetsova Darya Sergeevna** – student, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: darya.shvetsova@yandex.ru.

**Simunin Mikhail Maksimovich** – Cand. Sc., researcher; KSC SB RAS. E-mail: michanel@mail.ru.

**Smirnov Alexander Olegovich** – Dr. Sc., Docent, head of Department of Advanced Mathematics and Mechanics, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. E-mail: alsmir@guap.ru.

**Sukhanova Olga Andreevna** – Master’s degree student, Department of Quality management and certification, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: olkasukhanova@mail.ru.

**Taseiko Olga Viktorovna** – Cand. Sc., Docent, head of Department of Health and safety, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: taseiko@gmail.com.

**Tikhomirov Alexander Apollinariyevich** – Dr. Sc., professor, head of Department of Closed Environmental Systems, Institute of Informatics and Telecommunications, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; head of Laboratory of Controlled Biosynthesis of Phototrophs, Institute of Biophysics SB RAS. E-mail: alex-tikhomirov@yandex.ru.

**Titenkov Georgi Valerievich** – leading design engineer, Krasnoyarsk Machine-Building Plant. E-mail: Titenkov-sv@mail.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.

**Trifanov Vladimir Ivanovich** – Master’s degree student, Department of Quality management and certification department, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: sibgau-uks@mail.ru.

**Trifonov Sergei Viktorovich** – Cand. Sc., senior researcher, Institute of Biophysics SB RAS; senior teacher, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: trifonov\_sergei@inbox.ru.

**Vdovykh Polina Sergeevna** – student, Institute of Space and information technologies, Siberian Federal University. E-mail: polina.vdovykh@gmail.com.

**Verkhoturova Mariya Vladimirovna** – student, Institute of Space and information technologies, Siberian Federal University. E-mail: adventuretime66@yandex.ru.

**Voronin Anton Sergeevich** – Cand. Sc., researcher, Department of Molecular electronic, FIC KSC SB RAS. E-mail: a.voronin1988@mail.ru.

**Vorontsova Evgeniya Olegovna** – product design engineer, JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: jenvoroncova@gmail.com.

**Zalizniak Viktor Evgen’evich** – Cand. Sc., Docent, Department of Mathematic modeling and management activities, Institute of Mathematics and Computer Science, Siberian Federal University. E-mail: vزالizniak@mail.ru.

**Zhirnova Ekaterina Aleksandrovna** – Cand. Sc., Docent, Docent of Department of Quality management and certification, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: karakara85@yandex.ru.

**Zhuravlev Victor Yurevich** – Cand. Sc., Docent, professor of Department of Aircraft Engines, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: vz@sibsau.ru.

**Zolotov Oleg Aleksandrovich** – Cand. Sc., Docent, Department of Mathematic modeling and management activities, Institute of Mathematics and Computer Science, Siberian Federal University. E-mail: ozolot\_@mail.ru.

**Zolotova Olga Pavlovna** – Cand. Sc., Docent, Department of Technical Physics, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: zolotova@sibsau.ru.



