

ISSN 2587-6066



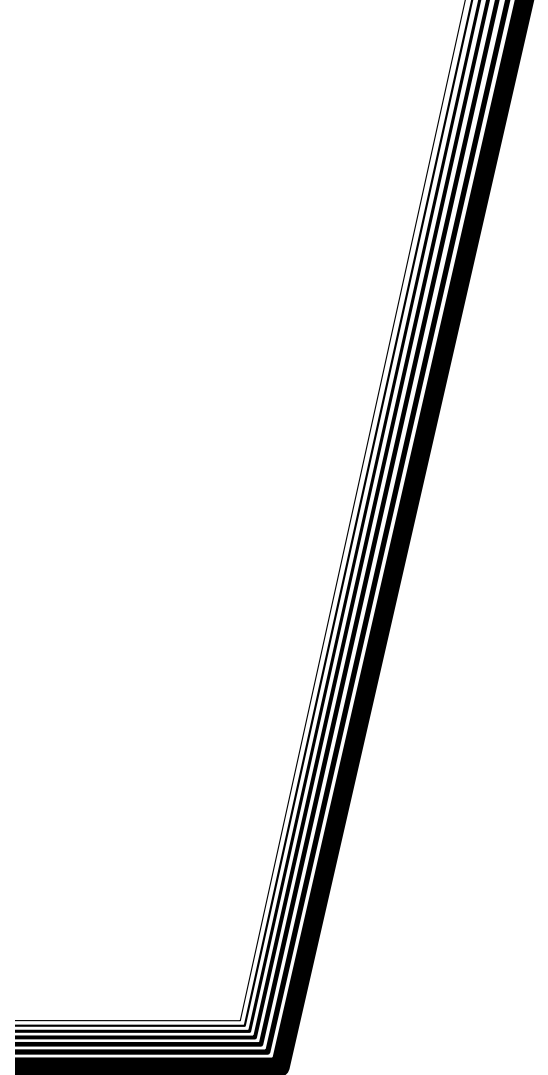
СИБИРСКИЙ ЖУРНАЛ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

SIBERIAN JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

Том
Vol. **20**, № 4

КРАСНОЯРСК 2019

**СИБИРСКИЙ
ЖУРНАЛ
НАУКИ
И ТЕХНОЛОГИЙ**



Том 20, № 4

Красноярск 2019

СИБИРСКИЙ ЖУРНАЛ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

Том 20, № 4

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

Логинов Юрий Юрьевич, 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»)

Левко В. А., доктор технических наук, доцент (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)

Краточвилова И., доктор, доцент (Прага, Чехия)

Краус И., профессор (Прага, Чехия)

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

Лю Т., профессор (Пекин, Китай)

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

Мионов 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. 20, No 4

Chief Editor:

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

Deputy Chief Editors

Loginov Y. Y., 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)

Levko V. A., 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)

Chebotaev 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 научным специальностям:

05.07.02 Проектирование конструкции и производство летательных аппаратов (технические);

05.07.05 Тепловые электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов (технические);

05.07.07 Контроль и испытание летательных аппаратов и их систем (технические);

05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические);

05.13.11 Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей (технические).

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). Журнал выходит 4 раза в год.

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

При перепечатке или цитировании материалов из журнала «Сибирский журнал науки и технологий» ссылка обязательна.

Учредитель и издатель

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

АДРЕС РЕДАКЦИИ, УЧРЕДИТЕЛЯ И ИЗДАТЕЛЯ:

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, проспект имени газеты «Красноярский рабочий», 31, П-416. Тел./ факс (391)291-90-19

E-mail: vestnik@sibsau.ru

Редактор Н. Н. ГОЛОСКОКОВА

Ответственный редактор английского текста
М. В. САВЕЛЬЕВА

Оригинал-макет и верстка М. А. СВЕТЛАКОВОЙ

Подписано в печать 25.12.2019. Формат 70×108/16.

Бумага офсетная. Печать плоская. Усл. печ. л. 11,2.

Уч.-изд. л. 14,0. Тираж 1000 экз. Заказ 2903. С 19/20.

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: 31.01.2020. Свободная цена

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:

05.07.02 Engineering, Design and Manufacturing of Aircraft (Engineering);

05.07.05 Thermal Electric Jet Engines and Power Facilities of Aircraft (Engineering);

05.07.07 Control and Testing of Aircraft and its Systems (Engineering);

05.13.01 System Analysis, Management and Information Processing (branch-wise) (Engineering);

05.13.11 Mathematical Support and Software for Computers, Computer Systems and Computer Networks (Engineering).

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) 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

Address: Reshetnev Siberian State University of Science and Technology.

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

Tel./fax (391)291-90-19; e-mail: vestnik@sibsau.ru

Editor N. N. GOLOSOKOVA

Executive editor (English Language) M. V. SAVELYEVA
Layout original M. A. SVETLAKOVA

Signed (for printing): 25.12.2019. Format 70×108/16.

Offset Paper. Print flat. 11.2. Published sheets 14.0.

1000 copies. Order 2903. С 19/20.

Printing and Publication Department

Reshetnev University.

Printed in the Department of copying and duplicating
equipment Reshetnev University.

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

Date of publication: 31.01.2020. Free price

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Грицкевич Е. В., Звягинцева П. А., Макарова Д. Г., Егоренко М. П., Золотарев В. В. Имитационная компьютерная модель для виртуальных исследований измерительных оптико-электронных систем	416
Матвеев Д. А. Метод эквивалентных условий прочности в расчетах композитных конструкций регулярной структуры с применением многосеточных конечных элементов	423
Павленко А. А. Сравнение способов инициализации начальных точек на генетическом алгоритме оптимизации	436
Пашковский О. В., Бренинг Д. В. Использование атрибутивных признаков при спецификации регрессионной модели стоимости квартир	443

РАЗДЕЛ 2. АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Акзигитов А. Р., Писарев Н. С., Стаценко Н. И., Неверов Ю. А., Акзигитов Р. А. Информационно-измерительная система пирометрического типа для малоразмерного беспилотного летательного аппарата	452
Алисеенко Ю. В., Нестеришин М. В., Воронцова Е. О., Федосов В. В., Пантелеев В. И. Дополнительные отбраковочные испытания в испытательном техническом центре для наземного силового оборудования	458
Коловский И. К., Шмаков Д. Н. Исследование движения космических аппаратов на низкой около круговой орбите при создании межспутниковой линии связи	465

РАЗДЕЛ 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

Воронин А. С., Фадеев Ю. В., Симунин М. М., Подшивалов И. В., Хартов С. В. Исследование радиоэкранирующих свойств тонких прозрачных пленок одностенных углеродных нанотрубок	478
Саханский С. П., Юленков С. Е. Алгоритм контактного метода измерения текущей площади кристаллов, выращиваемых способом Чохральского	485
Шестаков И. Я., Васильева Е. А. Использование диафрагменного электролизёра для очистки сточных вод от шестивалентного хрома	497

CONTENTS

PART 1. INFORMATICS, COMPUTER TECHNOLOGY AND MANAGEMENT

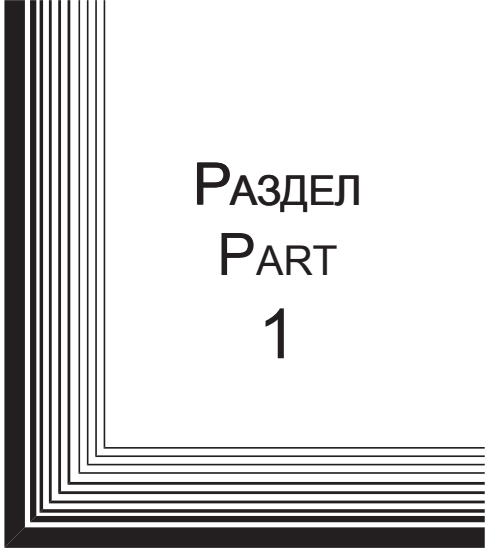
Gritskevich Y. V., Zviagintcheva P. A., Makarova D. G., Egorenko M. P., Zolotarev V. V. Simulation computer model for virtual research of optoelectronic measuring systems	416
Matveev A. D. The method of equivalent strength conditions in calculating composite structures with a regular structure using multigrid finite elements	423
Pavlenko A. A. Comparison of methods for initializing starting points on the optimization genetic algorithm	436
Pashkovskaya O. V., Brening D. V. Attribute features application in specification of regression model of apartments cost	443

PART 2. AVIATION AND SPACECRAFT ENGINEERING


Akzigitov A. R., Pisarev N. S., Statsenko N. I., Neverov U. A., Akzigitov R. A. Information-measuring system of pyrometric type for small-sized unmanned aircraft	452
Aliseenko Y. V., Nesterishin M. V., Vorontsova E. O., Fedosov V. V., Pateleev V. I. Additional screening tests at the testing technical center for ground power equipment	458
Kolovsky I. K., Shmakov D. N. Spacecraft motion in a low circular orbit in establishing intersatellite link	465

PART 3. TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIAL SCIENCE

Voronin A. S., Fadeev Yu. V., Simunin M. M., Podshivalov I. V., Khartov S. V. Research of electromagnetic shielding properties of single-walled carbon nanotubes thin transparent films	478
Sahansky S. P., Yulenkov S. E. Contact algorithm measurement method for current crystals area grown by Czokhralski method	485
Shestakov I. Y., Vasilyeva Y. A. Water cleaning from metal ions by electrochemical treatment by using the diaphragm using of a diagram electrolyzer for cleaning sewage from hexavalent chromium	497



РАЗДЕЛ
PART
1



ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPUTER TECHNOLOGY
AND MANAGEMENT



UDC 681.7:004

Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-416-422

For citation: Gritskevich Y. V., Zviagintcheva P. A., Makarova D. G., Egorenko M. P., Zolotarev V. V. Simulation computer model for virtual research of optoelectronic measuring systems. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2019, Vol. 20, No. 4, P. 416–422. Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-416-422

Для цитирования: Грицкевич Е. В., Звягинцева П. А., Макарова Д. Г., Егоренко М. П., Золотарев В. В. Имитационная компьютерная модель для виртуальных исследований измерительных оптико-электронных систем // Сибирский журнал науки и технологий. 2019. Т. 20, № 4. С. 416–422. Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-416-422

SIMULATION COMPUTER MODEL FOR VIRTUAL RESEARCH OF OPTOELECTRONIC MEASURING SYSTEMS

Y. V. Gritskevich¹, P. A. Zvyagintseva¹, D. G. Makarova¹, M. P. Egorenko¹, V. V. Zolotarev²

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies

10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarskiy rabochiy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

* E-mail: polinasgugit@mail.ru

The paper considers a simulation computer model of an optoelectronic system for measuring the point objects coordinates. The model allows optimal coordination of the system links parameters in order to minimize the measurement error. The method of multiple statistical tests which allows accumulating the results of single computational experiments for each specific measurement event with a unique random distribution of links parameters and characteristics, and then carrying out statistical processing of the accumulated results is the main method of computer simulation. As a result of multiple analyses, multi-parameter functional dependencies that provide optimal coordination of parameters controlled by the designer or operator according to the criterion of the resulting measurement error minimizing are realized. The article presents the results of evaluating modeling parameters that reduce the measurement error. It is relevant to apply this method when using the same measuring system in different operating conditions, for different measured objects and when performing various functional tasks since it allows adapting the system for a specific application. The model presented in the article can be concretized for the purpose of evaluating and multi-parameter optimization of particular object parameters, as well as for developing a virtual measuring stand on the basis of the model and its modifications.

Keywords: coordinate measurement, point object, computer simulation, measurement error, optimal parameter matching.

ИМИТАЦИОННАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИРТУАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Е. В. Грицкевич¹, П. А. Звягинцева¹, Д. Г. Макарова¹, М. П. Егоренко¹, В. В. Золотарев²

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий

Российская Федерация, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: polinasgugit@mail.ru

Рассматривается имитационная компьютерная модель оптико-электронной системы измерения координат точечных объектов, позволяющая проводить оптимальное согласование параметров звеньев системы с целью минимизации погрешности измерений. Основным методом имитационного компьютерного моделирования является метод многократных статистических испытаний, позволяющий накапливать результаты однократных вычислительных экспериментов для каждого конкретного акта измерения при уникальном случайном распределении параметров и характеристик звеньев, а затем проводить статистическую обработку накопленных результатов. В результате многократного анализа реализуются многопараметрические функциональные зависимости, обеспечивающие оптимальное согласование контролируемых проектировщиком или оператором параметров по критерию минимизации результирующей погрешности измерений. В статье приведены результаты оценки параметров моделирования, уменьшающих погрешность измерений. Актуаль-

ным является применение данного метода при использовании одной и той же измерительной системы в разных условиях эксплуатации, для различных измеряемых объектов и при выполнении различных функциональных задач, поскольку позволяет адаптировать систему для конкретного применения. Приведенная в статье модель может быть конкретизирована с целью оценки и многопараметрической оптимизации параметров конкретного объекта, а также для разработки на основе модели и ее модификаций виртуального измерительного стенда.

Ключевые слова: измерение координат, точечный объект, имитационное компьютерное моделирование, погрешность измерения, оптимальное согласование параметров.

Introduction. The problem of remote determination of the spatial position of various stationary and dynamic objects is effectively solved using optoelectronic measuring systems. Currently, a photo detector array (PDA) [1] is the main detecting element, in the plane of which the image of the measured object is built. PDA-based coordinators are used in astronomical and geodetic measurements, in guidance and aiming devices [2; 3], as well as in personal identification systems using biometric parameters [4]. In the latter case we mean registering the coordinates of some cardinal points, the ratio of the distances between which is one of the components of the identification vector.

It is advisable to take the image of a point object as the basic measured element. It is the measurement error of this element coordinates that determines the functional quality of the device. Obviously, in the case of an ideal optical system the image of a point will be a point. Then the measurement error is determined by the geometric dimensions of an individual sensitive array element (pixel) [5]. Error reduction is possible due to the fact that a real lens creates an image of a point in the form of a scattering spot.

When such a spot is formed, the image energy is no longer concentrated on one sensitive element of the array, but is distributed over the surfaces of several detectors, which creates a charge relief in the region of accumulation of PDA signal charges. Having obtained the exact numerical values of the signals for adjacent elements onto which the scattering spot is projected and having processed these values using an interpolation algorithm that takes into account the imbalance in the distribution of signals among elementary detectors, we can calculate the coordinates of the spot center in the PDA vertical and horizontal relative to a given coordinate center in the PDA plane.

If the scattering spot is round, which is typical for its location in the eyesight central (paraxial) zone, then there is no need to carry out interpolation processing for all array elements that fall into the optical signal energy zone. It is enough to determine the extreme pixel with the maximum signal and construct the interpolating functions only by the vertical and horizontal sets of detectors symmetric with respect to the extreme element (column and row, respectively).

If a PDA is an ideal one, that is, there are no noises and dark currents in it, then the calculating errors in the horizontal or vertical coordinates will decrease with increasing the number of sample elements to a certain value that ensures representativeness of the result. Further increase in the number of processed pixels will no longer

affect the error. The error itself in this case will be determined by the computational error of the computer.

A real PDA is characterized by the presence of both dark currents and noise. This leads to deformation of the ideal charge relief and to increasing the error of coordinate measurement [6]. Moreover, increasing the number of processed pixels can increase the measurement error, since the processing will include elements in which signal charges are already absent, and noise components continue to participate in the calculation process. Other factors, such as the instability of the initial optical signal, atmospheric turbulence, vibrations, etc., also affect the resulting error. We can say that the measurement error is determined by signal fluctuations distributed over the optoelectronic path and having different physical origin [7].

Problem statement. At present, decrease in the measurement error is achieved mainly due to the improvement of the qualitative indicators of the devices hardware and the improvement of the algorithms for PDA output signals [8] processing. Computer simulation is used, as a rule, for the preliminary development of various design decisions at the stage of scientific research [9].

The presence of a computer model that allows optimal matching of coordinator links according to the criterion of minimizing the measurement error is an urgent problem, the solution of which will ensure the adaptation of a designed or operated measuring device to actual conditions of its use in order to increase the accuracy of measurements.

As it has already been noted above, fluctuation (noise) processes distributed along the optoelectronic path are the main factors for increasing measurement errors. The presence of random components in a useful signal requires the implementation of a basic modeling algorithm in the format of multiple statistical tests. In this case, the device links parameters and characteristics are initially set in the form of nominal values having the essence of the mathematical expectation for each component involved in the computing process. Also a probabilistic law that describes the behavior of a random variable and the parameters of a random process necessary for modeling, for example, mean standard deviation (MSD) are determined for these components.

In a single computer experiment a random point (its coordinates) is generated in the PDA plane. Then a corresponding spatial function with a vertex whose coordinates correspond to the generated point coordinates is constructed in the scattering spot in accordance with the energy distribution law. The distribution of array signal charges which are then converted taking into account the probabilistic nature of physical processes into a random

discrete function of the signals accumulated by the PDA pixels is calculated using the convolution operation between the array raster and the energy distribution function. Using this discrete function the approximate value of the scattering spot center is calculated by interpolation. The difference between the positions of the true random point and the calculated spot center is stored as a single random error.

Conducting a series of repeated statistical tests for each new random position of the generated point and the unique distribution of random array parameters allows finally obtaining the MSD for the entire set of statistical experiments. Each new series of statistical experiments involves a purposeful deterministic change in one of the coordinator controlled parameters in a real range of acceptable values. Thus, the function of the dependence of the error in measuring the coordinates δ_i on the variable parameter p_i , that is, $\delta_i = f(p_i)$, is realized. The minimum value of this objective function will be the optimal parameter value providing the smallest measurement error, other conditions being equal.

Obviously, carrying out such an analysis in a multi-parameter space will allow getting an optimally consistent set of controllable parameters that meets the criterion of minimizing the measurement error. It should be noted that the solution of this problem does not imply the development of new instruments or methods for measuring coordinates, nor does it touch upon the improvement of algorithms for determining the position of the vertex of the energy distribution function in the scattering spot. The main purpose of the research is to develop computer-oriented tools and methods for optimal coordination of the parameters and characteristics of the optoelectronic path links of the measuring device controlled by the designer or operator, which would ensure minimization of the measurement error in the presence of an already set (designed or physically implemented) coordinator. That is, we are mean creating a virtual test stand for the optimal choice of parameters and operating modes of a real device planned for practical use, taking into account the real conditions of its operation in accordance with a given functional purpose.

As it has already been noted above, the scattering spot formed in the paraxial region is round. The invariance of such a spot relative to the selected coordinate system allows setting the function of the illumination distribution in the spot $E(x, y)$ for only one coordinate. Let such a coordinate be x . The function itself is assumed to be Gaussian:

$$E(x) = \frac{\Phi_0}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \cdot e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2 \cdot \pi \cdot r^2}}, \quad (1)$$

where Φ_0 is the incident radiation power; x_0 is the real random coordinate of the point generated in the PDA plane; r is the scattering spot radius at the level of 0.606 from the maximum illumination level.

In the case of a single generation of fluctuations, only PDA noises are taken into account, which are specified in fractions of the useful signal for the multiplicative noise component, and, similarly, in fractions of the dark signal for the additive noise component.

The convolution of the array raster and the illumination distribution function in the point image leads to the conversion of the continuous input optical signal $E(x)$ into a stepwise discrete function $S(i)$, where S is the electrical signal and i is the number of the array raster element in a row. Each element of the vector $S(i)$ contains a signal determined for a specific random implementation of the point, determined by the integrated illumination of the raster i -th element, and a noise random component generated inside the i -th element in accordance with a given MSD. The simplest interpolation algorithm for calculating the energy center, which is a modification of the method of determining the mass center of a system of material points known from the course of theoretical mechanics, was used to determine the coordinate of the center x_c of the scattering spot:

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^m S(i) \cdot x_c(i)}{\sum_{i=1}^m S(i)}, \quad (2)$$

where $S(i)$ is the signal in the i -th element of the row; $x_c(i)$ is the coordinate of the i -th element center; m is the number of sample elements involved in the processing.

The calculation of the final error is carried out on the basis of all random implementations for a particular series of multiple statistical tests.

Discussion of simulation results. It is obvious that if the size of the scattering spot is smaller than the pixel size, then the measurement error of the spot center coordinate will be determined by the size of the pixel. Increase in the scattering spot diameter will reduce the error due to the inclusion of adjacent pixels in the processing. Too much "expansion" of the spot will reduce the energy level of the optical signal due to the distribution of energy over a larger area. Therefore, there must be some optimal spot radius which will provide the minimum measurement error. This hypothesis was tested in [10; 11]. A virtual experiment in which the scattering spot radius varied with a certain step from the value of the pixel size to a size of several hundred pixels was conducted for given raster parameters and values of noise components. Multiple statistical tests were carried out, and the current error was calculated for each new value of the radius. Fig. 1 shows the resulting optimization graph, from which it can be seen that there really is a radius of the scattering spot which minimizes the measurement error.

The optimal number of sample elements was also determined, which minimizes the error [12]. The number of pixels involved in the interpolation process discretely increased from 1 (the pixel with the maximum signal) to n (the total number of pixels in the row). Pixel increment was performed symmetrically on both sides of the extreme pixel. Each step was accompanied by the calculation of the error by the method of multiple statistical tests. With a small number of sample elements the error was large. Then as the number of pixels involved in the processing increases the error decreases. But with a certain value of the processed pixels, it again began to increase. This is due to the fact that at the periphery of the spot the useful signal became smaller than noise signals which began to make a significant contribution to the final error. The more "noise" pixels that did not contain signal com-

ponents were added to the processing the larger was this contribution. Fig. 2 is a stepwise graph illustrating the results of the described computational experiment.

The horizontal of this graph shows the number of sample pixels normalized relative to the total number of pixels in the row, and the vertical shows the measurement error.

The graphs shown in fig. 1, 2 are illustrative (demonstrative), and the parameters of the arrays in computational experiments are selected in such a way as to increase the visibility of the presented results. In this regard there is no need to give the parameters of the optoelectronic paths of the measuring systems for which these graphs were obtained.

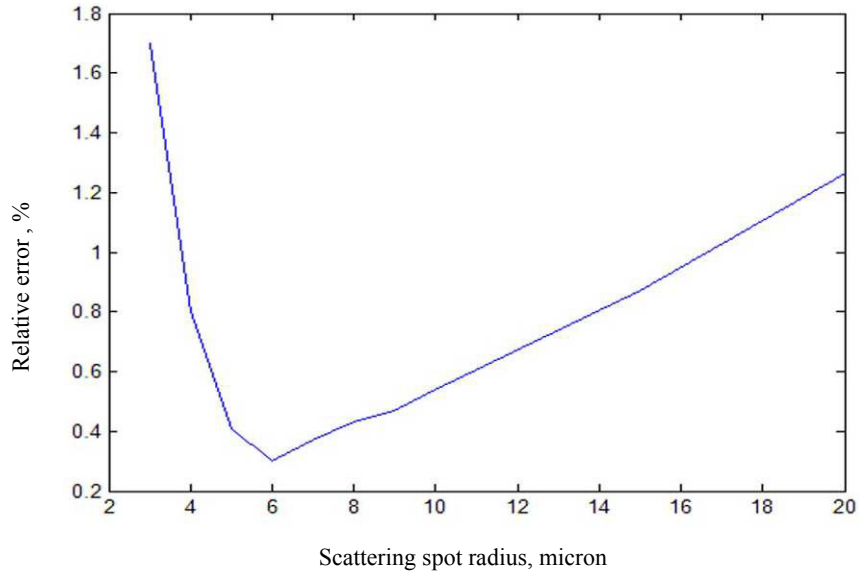


Fig. 1. Dependence of the optimal coordinate measurement error on the scattering spot radius

Рис. 1. Зависимость оптимальной погрешности измерения координаты от радиуса пятна рассеяния

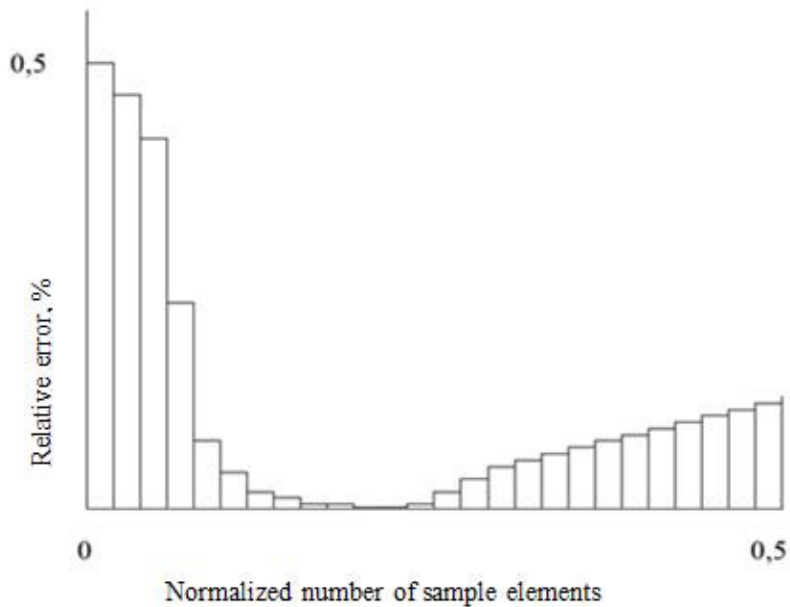


Fig. 2. Dependence of the relative error of coordinate measurement on the number of sample elements

Рис. 2. Зависимость относительной погрешности измерения координаты от количества элементов выборки

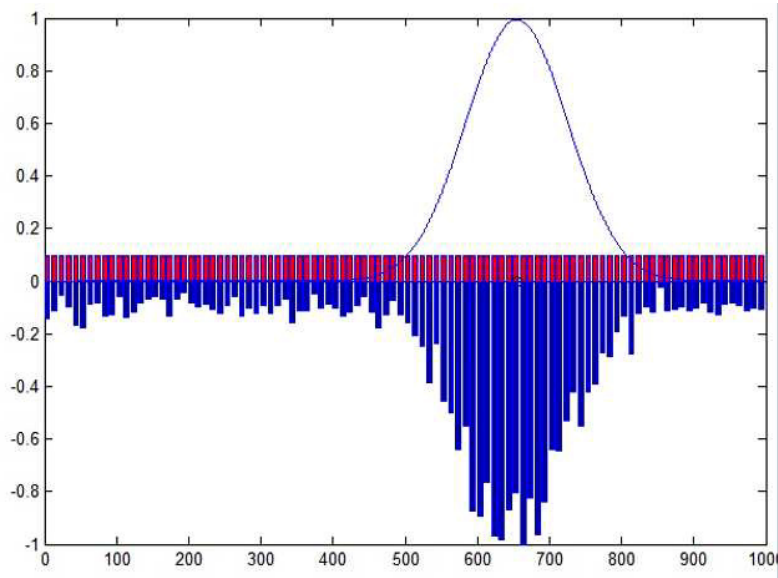


Fig. 3. Distribution of charge packets over the pixels of the matrix row at a small radius of the scattering spot

Рис. 3. Распределение зарядовых пакетов по пикселям строки матрицы при малом радиусе пятна рассеяния

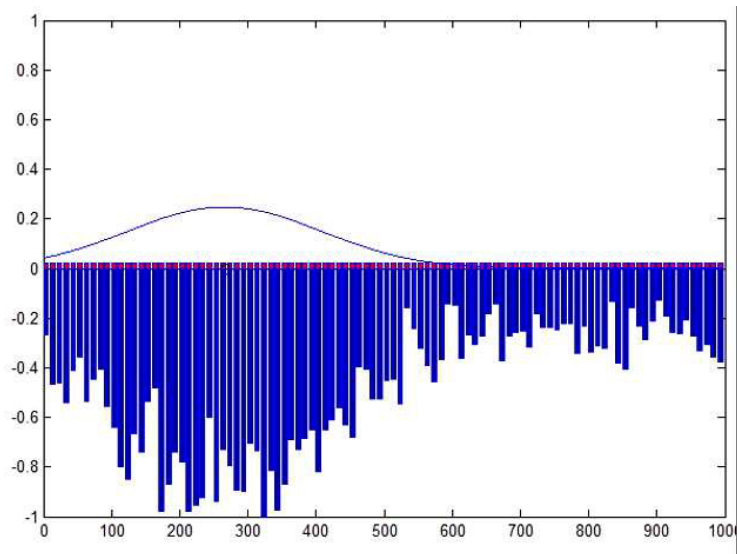


Fig. 4. Distribution of charge packets over the pixels of the matrix row at a large radius of the scattering spot

Рис. 4. Распределение зарядовых пакетов по пикселям строки матрицы при большом радиусе пятна рассеяния

The appearance of the screen interfaces on which the results of single statistical tests are presented is of interest. They are shown in fig. 3, 4.

Gaussian function of illumination distribution in the scattering spot is displayed at the top of both figures. The lower part corresponds to the discrete distribution of charges (signal and noise) accumulated under the influence of optical radiation. It is obvious that in fig. 3 the charge relief has a sharper character due to the smaller size of the scattering spot. The increase in the spot radius

in fig. 4 leads to “blurring” of the charge relief. In both cases the amount of spot energy remains constant, but the radius increase in Fig. 4 reduces the proportion of energy per 1 pixel. Therefore, the charge relief shown in Fig. 4 undergoes noticeable deformations, which of course leads to a significant increase in the measurement error of the scattering spot center.

For example, when analyzing a dynamic object [13] a sequential series of measurements of its current position coordinates at equal time intervals determined by the sig-

nal accumulation period is made in order to determine both the trajectory of its movement and the parameters characterizing the movement of the object (speed, acceleration). It is obvious that decrease in the accumulation time would lead to more accurate measurements, but then the signal charge would not have time to accumulate to the value necessary for accurate fixation of the calculated coordinate. At the same time the increase in the accumulation time will lead to blurring of the image [14; 15]. There appears the problem of determining such an optimal accumulation time that would ensure the smallest measurement error of the current coordinate. A similar problem could also be solved using the proposed model.

Conclusion. The described model is of a generalized character and demonstrates only some of the possibilities provided by it in terms of the optimal coordination of individual parameters and operating modes of optoelectronic measuring systems. The development of the model takes place, firstly, along the path of concretization as applied to real designed or operated devices, and secondly, towards the development of multi-parameter optimization of coordinators by combining the parameters and characteristics of various parts of the system into one modeling process.

All this creates the prerequisites for creating a virtual stand which provides the development and configuration of measuring systems that most effectively fulfill the tasks planned for them.

References

1. Malinin V. V. *Modelirovanie i optimizatsiya optiko-elektronnykh priborov s fotopriemnymi matritsami* [Modeling and optimization of optoelectronic devices with photodetector arrays]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005, 256 p.
2. Zheltko Ch. N., Pastukhov M. A., Gura D. A., Shevchenko G. G. [Evaluation of the error in measuring horizontal angles during the geodetic support of high-rise construction]. *Regional'nye aspekty razvitiya nauki i obrazovaniya v oblasti arkhitektury, stroitel'stva, zemleustroystva i kadastr v nachale III tysyacheletiya. Nauchnye chteniya pamyati professora V. B. Fedosenko* [Regional aspects of the development of science and education in the field of architecture, construction, land management and cadastre at the beginning of the III Millennium. Scientific readings in memory of Professor V. B. Fedosenko]. Komsomol'sk-na-Amure, Komsomol'skiy-na-Amure gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet Publ., 2015, P. 389–394 (In Russ.).
3. Belokonev V. M., Itigin A. M.-Sh., Shlishevskiy V. B. [Theoretical errors in determining the polar coordinates of luminous objects using a two-channel optoelectronic system with matrix photodetectors]. *Opticheskiy zhurnal*. 2003, No. 7, P. 91–92 (In Russ.).
4. Jain A. K., Flynn P., Ross A. A. Handbook of biometrics. *Springer*. 2008, 565 p.
5. Bukreev V. I., Dmitrieva M. N., Ivankin I. R., Eventave Yu. M. [Estimation of the position and velocity of the image center of the light spot by the charge distribution in the matrix CCD-structure]. *Tekhnika sredstv svyazi. Ser. Tekhnika televideniya*. 1990, No. 2, P. 71–77 (In Russ.).
6. Gusarov V. F. [Influence of characteristics of matrix photodetectors on the accuracy of optoelectronic system with optical equal-signal zone]. *Sb. trudov Vserossiyskogo kongressa molodykh uchenykh* [All-Russian Congress of young scientists]. 2016, Vol. 1, P. 124–128 (In Russ.).
7. Belokonev V. M., Itigin A. M.-Sh., Prudnikov N. V., Shlishevskiy V. B. [The concept of building an optoelectronic system for automatic determination of target coordinates by a light flash]. *Izv. vuzov. Priborostroenie*. 2003, No. 3, P. 64–66 (In Russ.).
8. Kuchkov D. V., Konyakhin I. A., Usik A. A. [Iterative algorithm for determining the coordinates of point emitters images]. *Opticheskiy zhurnal*. 2009, Vol. 76, No. 1, P. 43–45 (In Russ.).
9. Fisenko M. G., Ezhova K. V., Molev F. V. [Simulation of the image registered by multi-element optical receivers]. *Izv. vuzov. Priborostroenie*. 2012, Vol. 55, No. 4, P. 73–74 (In Russ.).
10. Gritskevich E. V. [Minimization of the measurement error of opto-electronic coordinate sensor]. *Datchiki i sistemy*. 2012, No. 4, P. 18–20 (In Russ.).
11. Gritskevich E. V., Zvyagintseva P. A. *ISCOL* [ISCOL]. Patent RF, No. 2011610964, 2011.
12. Gritskevich E., Zvyagintseva P., Sidorov L. Virtual Testing of Electro-optical Systems for Measuring Angles by Using Computer Simulation Model. *Proceedings of the 18th International Conference of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2017*. Erlagol, Altai Republic 29 June – 3 July, 2017. P. 353–356. doi:10.1109/EDM.2017.7981772.
13. Bezuglov D. A., Yukhnov V. I., Reshetnikova I. V., Belichenko M. A. [Methods for determining the motion parameters of a point source of optical radiation]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014, No. 2 (In Russ.). Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=12712> (accessed 11.02.2019).
14. Pashkov V. S. [The effect of blurring images on the accuracy of estimates of its coordinates]. *Mekhanika, upravlenie i informatika*. 2009, No. 1, P. 225–230 (In Russ.).
15. Bogoslovskiy A. V., Zhigulina I. V., Bogoslovskiy E. A. et al. [Algorithm of compensation of linear shift of the image of the moving object]. *DSPA: Voprosy primeneniya tsifrovoy obrabotki signalov*. 2016, Vol. 6, No. 4, P. 768–772.

Библиографические ссылки

1. Малинин В. В. Моделирование и оптимизация оптико-электронных приборов с фотоприемными матрицами. Новосибирск : Наука, 2005. 256 с.
2. Оценка погрешности измерения горизонтальных углов при геодезическом сопровождении высотного строительства / Ч. Н. Желтко, М. А. Пастухов, Д. А. Гура, Г. Г. Шевченко // Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия. Научные чтения памяти профессора В. Б. Федосенко : сб. материалов междунар. науч.-практ. конф. Комсомольск-на-Амуре : Комсомольский-на-Амуре гос. тех. ун-т, 2015. С. 389–394.

3. Белоконев В. М., Итигин А. М.-Ш., Шлишевский В. Б. Теоретические ошибки определения полярных координат светящихся объектов с помощью двухканальной оптико-электронной системы с матричными фотоприемниками // Оптический журнал. 2003. № 7. С. 91–92.
4. Jain A. K., Flynn P., Ross A. A. Handbook of biometrics // Springer, 2008. 565 p.
5. Оценка положения и скорости перемещения центра изображения светового пятна по распределению заряда в матричной ПЗС-структуре / В. И. Букреев, М. Н. Дмитриева, И. Р. Иванкин, Ю. М. Эвентаве // Техника средств связи. Сер. «Техника телевидения». 1990. № 2. С. 71–77.
6. Гусаров В. Ф. Влияние характеристик матричных фотоприемников на точность оптико-электронной системы с оптической равносигнальной зоной // Сб. тр. V Всеросс. конгресса молодых ученых. 2016. Т. 1. С. 124–128.
7. Концепция построения оптико-электронной системы автоматического определения координат цели по световой вспышке / В. М. Белоконев, А. М.-Ш. Итигин, Н. В. Прудников, В. Б. Шлишевский // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. № 3. С. 64–66.
8. Кучков Д. В., Коняхин И. А., Усик А. А. Итерационный алгоритм определения координат изображений точечных излучателей // Оптический журнал. 2009. Т. 76, №1. С. 43–45.
9. Фисенко М. Г., Ежова К. В., Молев Ф. В. Моделирование зарегистрированного многоэлементными оптическими приемниками изображения // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 4. С. 73–74.
10. Грицкевич Е. В. Минимизация погрешности измерений оптико-электронного координатного датчика // Датчики и системы. 2012. № 4. С. 18–20.
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011610964 Российская Федерация. ISCOL / Е. В. Грицкевич, П. А. Звягинцева ; дата рег. 26.01.2011.
12. Gritskevich E. V., Zvyagintseva P. A. Sidorov L. N. Virtual Testing of Electro-optical Systems for Measuring Angles by Using Computer Simulation Model // 18th International Conference of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2017: Conference Proceedings, Erlagol, Altai Republic 29 June – 3 July, 2017. P. 353–356.
13. Методы определения параметров движения точечного источника оптического излучения [Электронный ресурс] / Д. А. Безуглов, В. И. Юхнов, И. В. Решетникова, М. А. Беличенко // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 2. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=12712> (дата обращения: 11.02.2019).
14. Пашков В. С. Влияние «смаза» изображения на точность оценки его координат // Механика, управление и информатика. 2009. № 1. С. 225–230.
15. Алгоритм компенсации линейного смаза изображения движущегося объекта / А. В. Богословский, И. В. Жигулина, Е. А. Богословский и др. // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2016. Т. 6, № 4. С. 768–772.

© Gritskevich Y. V., Zvyagintseva P. A.,
Makarova D. G., Egorenko M. P.,
Zolotarev V. V., 2019

Gritskevich Yevgeny Vladimirovich – Cand. Sc., Associate Professor; Siberian State University of Geosystems and Technologies. E-mail: kaf.ib@ssga.ru.

Zviagintcheva Polina Aleksandrovna – Senior Lecturer Department of Information Security; Siberian State University of Geosystems and Technologies. E-mail: polinasugigit@mail.ru.

Makarova Diana Georgievna – Senior Lecturer Department of Information Security; Siberian State University of Geosystems and Technologies. E-mail: kaf.ib@ssga.ru.

Egorenko Marina Petrovna – Senior Lecturer Department of Photonics and Device Engineering; Siberian State University of Geosystems and Technologies. E-mail: e_m_p@mail.ru.

Zolotarev Vyacheslav Vladimirovich – Cand. Sc., Associate Professor, Head of Department of Information Technologies Security; Reshetnev Siberian State University of Science and Technologies. E-mail: amida.2@yandex.ru.

Грицкевич Евгений Владимирович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационной безопасности; Сибирский государственный университет геосистем и технологий. E-mail: kaf.ib@ssga.ru.

Звягинцева Полина Александровна – старший преподаватель кафедры информационной безопасности; Сибирский государственный университет геосистем и технологий. E-mail: polinasugigit@mail.ru.

Макарова Диана Георгиевна – старший преподаватель кафедры информационной безопасности; Сибирский государственный университет геосистем и технологий. E-mail: kaf.ib@ssga.ru.

Егоренко Марина Петровна – старший преподаватель кафедры информационной безопасности; Сибирский государственный университет геосистем и технологий. E-mail: e_m_p@mail.ru.

Золотарев Вячеслав Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой безопасности информационных технологий; Сибирский государственный университет науки и технологий имени М. Ф. Решетнева. E-mail: amida.2@yandex.ru.

Для цитирования: Матвеев А. Д. Метод эквивалентных условий прочности в расчетах композитных конструкций регулярной структуры с применением многосеточных конечных элементов // Сибирский журнал науки и технологий. 2019. Т. 20, № 4. С. 423–435. Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-423-435

For citation: Matveev A. D. The method of equivalent strength conditions in calculating composite structures with a regular structure using multigrid finite elements. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2019, Vol. 20, No. 4, P. 423–435. Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-423-435

МЕТОД ЭКВИВАЛЕНТНЫХ УСЛОВИЙ ПРОЧНОСТИ В РАСЧЕТАХ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ РЕГУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОСЕТОЧНЫХ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А. Д. Матвеев

Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 630036, г. Красноярск, Академгородок, стр. 50/44
E-mail: mtv241@mail.ru

Пластины, балки и оболочки с неоднородной и микронеоднородной регулярной структурой широко применяются в авиационной и ракетно-космической технике. На этапе эскизного проектирования первоначально важно знать, удовлетворяет ли коэффициент запаса конструкции заданным условиям прочности. Для определения коэффициента запаса необходимо решить по методу конечных элементов (МКЭ) задачу упругости для проектируемой конструкции с учетом ее неоднородной структуры, что требует больших ресурсов ЭВМ. В данной работе предложен метод эквивалентных условий прочности (МЭУП) для расчета на прочность упругих конструкций с неоднородной регулярной структурой. Предлагаемый метод сводится к расчету на прочность изотропных однородных тел с применением эквивалентных условий прочности. В основе МЭУП лежит следующее утверждение. Для всякого композитного тела V_0 существует такое изотропное однородное тело V^b и такое число p (коэффициент эквивалентности), что если коэффициент запаса n_b^0 тела V^b удовлетворяет эквивалентным условиям прочности $pn_1 \leq n_b^0 \leq pn_2$, то коэффициент запаса n_0 тела V_0 удовлетворяет заданным условиям прочности $n_1 \leq n_0 \leq n_2$, и наоборот, n_1, n_2 – заданы, коэффициенты n_b^0, n_0 отвечают точным решениям задач упругости, построенных для тел V^b и V_0 . Расчет на прочность по МКЭ изотропных однородных тел наиболее простой в реализации и требует меньше памяти ЭВМ, чем аналогичный расчет тел с учетом их неоднородной структуры. Изложена процедура определения коэффициента эквивалентности p с помощью МКЭ. При построении решений по МКЭ для изотропных однородных тел применяются многосеточные конечные элементы, порождающие модели малой размерности и решения с малой погрешностью. Скорректированные эквивалентные условия прочности имеют вид $pn_1(1 + \varepsilon_1) \leq n_b \leq pn_2(1 - \varepsilon_2)$, где n_b – коэффициент запаса тела V^b и величины $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ отвечают приближенному решению. Реализация МКЭ для многосеточных дискретных моделей требует в $10^3 \div 10^6$ раз меньше объема памяти ЭВМ, чем для базовых. Приведен расчет на прочность балки с микронеоднородной регулярной структурой с помощью МЭУП.

Ключевые слова: упругость, композиты, эквивалентные условия прочности, многосеточные конечные элементы, пластины, балки, оболочки.

THE METHOD OF EQUIVALENT STRENGTH CONDITIONS IN CALCULATING COMPOSITE STRUCTURES WITH A REGULAR STRUCTURE USING MULTIGRID FINITE ELEMENTS

A. D. Matveev

Institute of Computational Modeling
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
E-mail: mtv241@mail.ru

Plates, beams and shells with non-uniform and micro-inhomogeneities regular structure are widely used in aviation and rocket and space technology. At the preliminary design stage, it is initially important to know whether the design safety factor meets the specified strength conditions. To determine the margin factor, it is necessary to solve the elastic-

ity problem for the designed structure by the finite element method (FEM), taking into account its inhomogeneous structure, which requires large computer resources. In this paper, we propose a method of equivalent strength conditions (MESOC) for calculating the static strength of elastic structures with a inhomogeneous regular structure. The proposed method is reduced to the calculation of the strength of isotropic homogeneous bodies using equivalent strength conditions. The MESOC is based on the following statement. For any composite body V_0 , there exists such an isotropic homogeneous body V^b and such a number p (equivalence coefficient) that if the body V^b stock coefficient satisfies n_b^0 the equivalent strength conditions $pn_1 \leq n_b^0 \leq pn_2$, then the body V_0 stock coefficient satisfies n_0 the given strength conditions $n_1 \leq n_0 \leq n_2$, and Vice versa, n_1, n_2 – given, the coefficients n_b^0, n_0 , meet the exact solutions of elasticity problems constructed for bodies V_0, V^b . The method under consideration is reduced to FEM strength calculation of isotropic homogeneous bodies, which is the easiest to implement and requires less computer memory than a similar calculation of composite bodies taking into account their inhomogeneous structure. The procedure for determining the equivalence coefficients for a number of composite plates, beams and shells of rotation is described. High-precision multigrid finite elements generating discrete models of small dimension and solutions with small error are used in the construction of elastic solutions according to FEM for isotropic homogeneous bodies. The adjusted equivalent strength conditions are of the form $pn_1(1 + \varepsilon_1) \leq n_b \leq pn_2(1 - \varepsilon_2)$, where n_b is the body V^b reserve coefficient and the values $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ correspond to the approximate solution constructed for the body V^b . Implementation of FEM for multigrid discrete models requires several $10^3 \div 10^6$ times less computer memory than for basic models. The calculation of the strength of a beam with a micro-homogeneous regular structure with the help of MESOC is given.

Keywords: elasticity, composites, equivalent strength conditions, multigrid finite elements, plates, beams, shells.

Введение. Расчет на прочность конструкции – один из важнейших на этапе эскизного проектирования [1], которое является технико-экономическим обоснованием проекта конструкции. Как правило, расчет на прочность конструкций проводится по запасам прочности [1–3]. Согласно этому расчету, для коэффициента запаса n_0 проектируемой конструкции V_0 заданные условия прочности имеют вид

$$n_1 \leq n_0 \leq n_2, \quad (1)$$

где n_1, n_2 – заданы, $n_1 > 1$.

На этапе эскизного проектирования конструктору в первую очередь важно знать, удовлетворяет или не удовлетворяет коэффициент запаса n_0 проектируемой конструкции V_0 заданным условиям прочности (1). Если коэффициент n_0 удовлетворяет заданным условиям прочности, то считают, что конструкция V_0 не разрушается при заданных условиях эксплуатации. Следует отметить, что в этом случае нет необходимости детально исследовать напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкции V_0 . Расчет на прочность конструкции V_0 сводится к нахождению ее коэффициента запаса n_0 и проверке условий прочности (1) для коэффициента n_0 . Коэффициент запаса n_0 определяют по формуле $n_0 = \sigma_T / \sigma_0$ [1–3], где σ_T – предельное напряжение конструкции V_0 (предел текучести [3]), σ_0 – максимальное эквивалентное напряжение конструкции V_0 . Отметим, что коэффициент запаса n_0 отвечает точному решению задачи упругости, сформулированной для конструкции V_0 . Если максимальные эквивалентные напряжения конструкций определяются приближенно, то в этом случае используются скорректированные условия проч-

ности [4]. При анализе НДС композитных конструкций широко используют метод конечных элементов (МКЭ) [5–8]. Базовые дискретные модели конструкций с неоднородной и микронеоднородной структурой, которые состоят из конечных элементов (КЭ) 1-го порядка и учитывают их структуры в рамках микроподхода [9], имеют очень высокую размерность, что порождает трудности при реализации МКЭ на ЭВМ. Для таких моделей эффективно используется метод многосеточных конечных элементов (ММКЭ) [10–12], в котором используются многосеточные конечные элементы (МнКЭ) [13; 14]. Следует отметить, МКЭ есть частный случай ММКЭ, и если при решении краевых задач по МКЭ используются МнКЭ, то в этом случае, по сути, реализуется ММКЭ.

Для практики важно знать погрешность приближенного решения, которое используется в расчетах. Оценить погрешность приближенных решений можно тогда, когда они мало отличаются друг от друга и при этом образуют последовательность решений, которая быстро сходится к точному решению. При построении таких последовательностей применяется процедура измельчения исходного разбиения области тела на КЭ. Процедуры измельчения, используемые для разбиений, которые построены для неоднородной и микронеоднородной (волоконистой) структуры, сложные и труднореализуемы. Так как волокна имеют малую толщину, то измельчение таких разбиений приводит к резкому увеличению размерностей дискретных моделей. Реализация МКЭ для таких моделей требует больших ресурсов ЭВМ. Кроме того, на закон измельчения накладываются определенные ограничения, связанные с тем, что на каждом шаге измельчения разбиений необходимо учитывать микронеоднородную структуру по микроподходу. Как известно, процедура измельчения, применяемая для дискретных моделей однородных изотропных тел, наиболее простая в реализации и требует меньше памяти ЭВМ,

чем для тел с неоднородной и микронеоднородной структурой (с учетом их структуры).

В данной работе предложен метод эквивалентных условий прочности (МЭУП) для статического расчета на прочность линейно упругой конструкции V_0 с неоднородной (микронеоднородной) регулярной структурой, состоящей из пластичных материалов. Для простоты изложения считаем, что тело V_0 имеет волоконистую структуру. Показано, что расчет на прочность композитного тела V_0 сводится к расчету на прочность (с помощью МКЭ) изотропного однородного тела V^b . Тела V_0 , V^b имеют одинаковые форму, размеры, закрепление и нагружение. Модули упругости тела V^b и волокна совпадают. В расчетах применяются скорректированные эквивалентные условия прочности вида

$$pn_1(1 + \varepsilon_1) \leq n_b \leq pn_2(1 - \varepsilon_2), \quad (2)$$

где $\varepsilon_1 = 1/(1 - \delta_p) - 1$, $\varepsilon_2 = 1 - 1/(1 + \delta_p)$; p – коэффициент эквивалентности; n_b – коэффициент запаса тела V^b , $n_b = \sigma_T / \sigma^b$; σ_T – предел текучести волокна; σ^b – максимальное эквивалентное напряжение тела V^b (определяемое с помощью МКЭ); δ_p – погрешность для напряжения σ^b , $0 \leq \delta_p < 1$.

Показано, что если коэффициент запаса n_b изотропного однородного тела V^b удовлетворяет скорректированным эквивалентным условиям прочности (2), то коэффициент запаса n_0 композитного тела V_0 (отвечающий точному решению задачи упругости) удовлетворяет заданным условиям прочности (1). Таким образом, реализация предлагаемого метода сводится к построению скорректированных эквивалентных условий прочности (2) и нахождению коэффициента запаса n_b тела V^b , т. е. к определению коэффициента эквивалентности p и к нахождению с помощью МКЭ максимального эквивалентного напряжения σ^b для тела V^b (с погрешностью δ_p). Коэффициент эквивалентности p находим по формуле $p = \sigma_0 / \sigma^b$, где σ_0 – максимальное эквивалентное напряжение тела V_0 . Напряжения σ_0 для композитного тела V_0 и σ^b для изотропного однородного тела V^b определяем по МКЭ (с применением МНКЭ). Для построения оценки погрешности приближенных решений используются последовательности решений, полученные с помощью МКЭ, которые быстро сходятся к точным.

Достоинства МЭУП состоят в следующем. В расчетах используем изотропные однородные конструкции, которые имеют такие же формы и размеры, закрепления и нагружения, как композитные конструкции. При анализе НДС изотропных однородных конструкций по МКЭ применяются МНКЭ, которые

позволяют строить последовательности решений быстросходящиеся к точным, что позволяет определить погрешность для полученных приближенных решений. МНКЭ для изотропных однородных конструкций порождают дискретные модели малой размерности и приближенные решения с малой погрешностью. Реализация МКЭ для многосеточных дискретных моделей требует в $10^3 \div 10^6$ раз меньше объема памяти ЭВМ, чем для базовых. При реализации МЭУП не используются процедуры измельчения дискретных моделей композитных конструкций. Приведен пример расчета на прочность балки с микронеоднородной регулярной волоконистой структурой с помощью МЭУП.

Основные положения для конструкций. В работе рассматриваются трехмерные конструкции (тела), для которых выполняются следующие условия.

Положение 1. Рассматриваются в декартовых системах координат трехмерные линейно упругие изотропные однородные и композитные тела (конструкции), которые состоят из пластичных материалов, имеют гладкие границы, статические нагружения и одинаковые условия эксплуатации. Функции нагружений тел являются гладкими функциями. Тела имеют границы закрепления, которые не вырождаются в точки. Композитные тела состоят из разномодульных изотропных однородных тел, связи между которыми идеальны, т. е. на общих границах разномодульных однородных тел функции перемещений и напряжений являются непрерывными. Перемещения, деформации и напряжения разномодульных тел отвечают соотношениям Коши и закону Гука трехмерной линейной задачи теории упругости [15]. Эквивалентные напряжения для упругих тел определяются по 4-й теории прочности [1].

Эквивалентные условия прочности и эквивалентные по прочности конструкции, выраженные через коэффициенты запаса. Пусть две упругие конструкции V_1 и V_2 имеют одинаковые форму, геометрические размеры, закрепления и статические нагружения, но отличаются модулями упругости. Пусть для коэффициентов запаса n_1 , n_2 соответственно конструкций V_1 , V_2 заданы условия прочности

$$n_a^1 \leq n_1 \leq n_b^1, \quad (3)$$

$$n_a^2 \leq n_2 \leq n_b^2, \quad (4)$$

где $n_a^1, n_a^2 > 1$; $n_a^1, n_a^2, n_b^1, n_b^2$ – заданы, коэффициент n_1 (n_2) отвечает точному решению задачи упругости, сформулированной для конструкции V_1 (V_2).

Для конструкций V_1 , V_2 введем следующие два определения.

Определение 1. Если из выполнения условий (4) для коэффициента n_2 следует выполнение условий (3) для коэффициента n_1 и наоборот, если из выполнения условий (3) для коэффициента n_1 следует выполнение условий (4) для коэффициента n_2 , тогда условия прочности (3), (4) будем называть эквива-

лентными условиями прочности соответственно для конструкций V_1, V_2 .

Определение 2. Пусть конструкции V_1, V_2 , для которых соответственно условия (3), (4) являются эквивалентными условиями прочности, не разрушаются при одинаковых условиях эксплуатации. Тогда конструкции V_1, V_2 будем называть эквивалентными по прочности.

На практике эквивалентность по прочности конструкций V_1, V_2 означает, что вместо работающей конструкции V_1 можно использовать конструкцию V_2 , и наоборот. Отметим, что из двух эквивалентных по прочности конструкций целесообразно использовать в работе такую конструкцию, которая более технологична в изготовлении, отвечает заданным техническим требованиям и требует меньше финансовых затрат на изготовление и эксплуатацию.

Теорема о существовании эквивалентных условий прочности. Рассмотрим теорему, в которой доказывается существование эквивалентных условий прочности для упругих композитных конструкций (тел).

Теорема 1. Пусть на трехмерное линейно упругое композитное тело V_0 (расположенное в декартовой системе координат $Oxyz$) действуют заданные статические поверхностные силы \mathbf{q} , т. е. силы, действующие на незакрепленной части границы S_q тела V_0 , и объемные силы \mathbf{p} , где $\mathbf{q} = \{q_x, q_y, q_z\}^T$, $\mathbf{p} = \{p_x, p_y, p_z\}^T$; $q_x, q_y, q_z, p_x, p_y, p_z$ – гладкие функции координат x, y, z . На границе S_u тело V_0 жестко закреплено, т. е. на S_u : $u = v = w = 0$, $S_0 = S_u + S_q$, S_0 – гладкая граница тела V_0 . Тело V_0 состоит из компонент V_i , т. е. из пластичных разномодульных изотропных однородных тел V_i , где $i = 1, \dots, N$, N – общее число тел V_i тела V_0 . Пусть максимальное эквивалентное напряжение композитного тела V_0 возникает в теле $V_\alpha, 1 \leq \alpha \leq N$. Пусть для коэффициента запаса n_0 композитного тела V_0 (который отвечает точному решению задачи упругости для тела V_0) заданы условия прочности

$$n_1 \leq n_0 \leq n_2, \quad (5)$$

где n_1, n_2 – заданы, $n_1 > 1$.

Тогда существуют такое трехмерное упругое изотропное однородное тело V^b и такие числа n_1^p, n_2^p , что если коэффициент запаса n_b^0 тела V^b , отвечающий точному решению задачи упругости для тела V^b , удовлетворяет эквивалентным условиям прочности вида

$$n_1^p \leq n_b^0 \leq n_2^p, \quad (6)$$

то коэффициент запаса n_0 композитного тела V_0 удовлетворяет условиям прочности (5), и наоборот.

Если коэффициента запаса n_0 композитного тела V_0 удовлетворяет условиям (5), то коэффициент запаса n_b^0 изотропного однородного тела V^b удовлетворяет условиям (6), причем, между коэффициентами запаса n_0, n_b^0 существует взаимно однозначная связь.

Доказательство. Пусть однородное изотропное тело V^b и композитное тело V_0 имеют одинаковые форму, размеры, крепления и нагружения, но отличаются модулями упругости. Пусть модули упругости тела V^b равны модулям упругости тела V_α композитного тела $V_0, 1 \leq \alpha \leq N$. Коэффициенты запаса n_0, n_b^0 находим по формулам (1–3)

$$n_0 = \sigma_T / \sigma_0, \quad (7)$$

$$n_b^0 = \sigma_T / \sigma_b^0, \quad (8)$$

где σ_T – предел текучести тела V_α [3]; σ_0, σ_b^0 – максимальные эквивалентные напряжения, возникающие соответственно в телах V_0, V^b и отвечающие точным решениям задач упругости.

Пусть коэффициент n_0 удовлетворяет условиям прочности (5). Тогда подставляя (7) в (5) получим неравенства

$$n_1 \leq \frac{\sigma_T}{\sigma_0} \leq n_2. \quad (9)$$

Существует такое число p (коэффициент эквивалентности), что

$$p = \sigma_0 / \sigma_b^0. \quad (10)$$

Учитывая (10) в (9), имеем

$$pn_1 \leq \frac{\sigma_T}{\sigma_b^0} \leq pn_2. \quad (11)$$

Используя (8) в (11), получаем

$$pn_1 \leq n_b^0 \leq pn_2. \quad (12)$$

Существуют такие числа n_1^p, n_2^p , что

$$n_1^p = pn_1, n_2^p = pn_2. \quad (13)$$

Подставляя (13) в (12), получаем, что для коэффициента n_b^0 выполняются условия (6). Итак, существуют такие числа n_1^p, n_2^p , что коэффициент запаса n_b^0 изотропного однородного тела V^b удовлетворяет условиям (6). Обратно, пусть коэффициент запаса n_b^0 тела V^b удовлетворяет условиям прочности (6). Подставляя (8) в (6) и учитывая (10), (13), получим

$$pn_1 \leq \frac{p\sigma_T}{\sigma_0} \leq pn_2.$$

Откуда с учетом (7) следует выполнение для коэффициента запаса n_0 композитного тела V_0 условий прочности (5). Итак, показано, что всякому коэффициенту $n_b \in (n_1^p, n_2^p)$ соответствует единственный ко-

эффицент $n_0 \in (n_1, n_2)$, найденный по формуле (7), и наоборот, всякому коэффициенту $n_0 \in (n_1, n_2)$ соответствует единственный коэффициент $n_b^0 \in (n_1^p, n_2^p)$, отвечающий формуле (8). Рассмотрим предельные случаи. Пусть $n_b^0 = n_1^p$. Используя соотношения (8), (13), (10) в последнем равенстве, получаем $p\sigma_T / \sigma_0 = pn_1$. Откуда с учетом (7) следует $n_0 = n_1$. Аналогично можно показать, что если $n_b^0 = n_2^p$, то $n_0 = n_2$. Пусть $n_0 = n_1$. Используя (7), (10) в последнем равенстве, получаем $\sigma_T / \sigma_b^0 = pn_1$. Откуда с учетом (8), (13) вытекает $n_b^0 = n_1^p$. Аналогично можно показать, что если $n_0 = n_2$, то $n_b^0 = n_2^p$. Таким образом, между коэффициентами запаса n_0 и n_b^0 существует взаимно однозначная связь. Теорема 1 доказана.

Эквивалентные условия прочности (6) можно представить через коэффициент эквивалентности p в виде $pn_1 \leq n_b^0 \leq pn_2$, построение которых сводится к нахождению коэффициента p .

Отметим, что условия (5), (6) являются эквивалентными условиями прочности соответственно для тел (конструкций) V_0, V^b (см. определение 1). Считают, что если n_0 удовлетворяет заданным условиям прочности (5), то конструкция V_0 не разрушается при эксплуатации. Пусть конструкция V^b не разрушается при эксплуатации. Тогда конструкции V_0, V^b являются эквивалентными по прочности (см. определение 2).

Итак, доказано существование эквивалентных условий прочности для композитных тел (конструкций), имеющих любую структуру, форму, любые размеры, статические нагружения и закрепления, которые отвечают выше сформулированному положению 1 и условиям теоремы 1. Следует отметить, что для всякой композитной конструкции V_0 всегда можно построить изотропную однородную конструкцию V^b , т. е. всегда для конструкции V^b можно задать по определенным правилам форму, размеры, нагружение, закрепление и модули упругости. Однако, в общем случае, эквивалентные условия прочности для изотропной однородной конструкции V^b можно построить лишь только для заданных усилий \mathbf{q}, \mathbf{p} , что непрактично. Это связано с тем, что напряжения σ_0, σ_b^0 и p отвечают заданному нагружению \mathbf{q}, \mathbf{p} конструкций V^b, V_0 (см. формулы (10), (13)).

Замечание 1. Пусть найдено значение p и максимальное эквивалентное напряжение σ_b^0 конструкции V^b . Тогда для конструкции V_0 по формуле (10) определяем максимальное эквивалентное напряжение σ_0 , т. е. $\sigma_0 = p\sigma_b^0$, и затем по формуле (7) вычисляем ко-

эффицент запаса прочности n_0 , т. е. $n_0 = \sigma_T / (p\sigma_b^0)$, что важно знать при проектировании конструкции V_0 .

Скорректированные условия прочности, учитывающие погрешность напряжений. В общем случае (например, для тел сложной формы) построить аналитические решения трехмерной задачи теории упругости очень трудно. Однако с помощью МКЭ [5–8] и ММКЭ [10–12] можно построить приближенные решения задач теории упругости с заданной погрешностью для напряжений. Следует отметить, что при проектировании ряда конструкций (например, конструкций минимального веса) нарушение заданных условий прочности (5), т. е. эквивалентных условий прочности (6), недопустимо. Эквивалентные условия прочности (6) не учитывают погрешность приближенных решений, что порождает трудности при их выполнении.

Пусть для коэффициента запаса упругой конструкции V^b заданы условия прочности вида

$$n_1^p \leq n_b^0 \leq n_2^p, \quad (14)$$

где n_1^p, n_2^p – заданы; n_b^0 – коэффициент запаса прочности конструкции V^b , отвечающий точному решению трехмерной задачи упругости, сформулированной для данной конструкции.

В теореме 2 сформулированы скорректированные условия прочности, учитывающие погрешность приближенных решений. Для удобства и непрерывности изложения в теореме 2 используются обозначения, введенные в теореме 1.

Теорема 2. Пусть для упругой конструкции V^b заданы условия прочности (14) и определено максимальное эквивалентное напряжение σ_b , отвечающее приближенному решению задачи упругости. Пусть

$$|\delta| \leq \delta_p < C_p = \frac{\Delta n}{n_1^p + n_2^p}, \quad (15)$$

где $\Delta n = |n_2^p - n_1^p|$, n_1^p, n_2^p – заданы; δ – относительная погрешность для напряжения σ_b , т. е.

$$\delta = \frac{\sigma_b - \sigma_b^0}{\sigma_b^0}, \quad (16)$$

где σ_b^0 – максимальное эквивалентное напряжение конструкции V^b , отвечающее точному решению задачи упругости, напряжения σ_b^0, σ_b определяются по 4-й теории прочности, δ_p – оценка для погрешности δ .

Пусть коэффициент запаса n_b конструкции, отвечающий приближенному решению, удовлетворяет скорректированным условиям прочности вида

$$\frac{n_1^p}{1 - \delta_p} \leq n_b \leq \frac{n_2^p}{1 + \delta_p}. \quad (17)$$

где $n_b = \sigma_T / \sigma_b$, σ_T – предел текучести.

Тогда коэффициент запаса n_b^0 конструкции, отвечающий точному решению, удовлетворяет заданным условиям прочности (14), где $n_b^0 = \sigma_T / \sigma_b^0$.

Доказательство. Из (16) следует $\sigma_b = (1 + \delta) \sigma_b^0$. Отсюда получаем

$$n_b^0 = (1 + \delta)n_b. \quad (18)$$

Отметим, что в (15) $C_p < 1$. Пусть δ_0 такое, что $\delta_0 = |\delta|$. Тогда в силу (15) имеем соотношения

$$0 \leq \delta_0 = |\delta| \leq \delta_p < 1. \quad (19)$$

Принимая в (18) последовательно $\delta = -\delta_0$, $\delta = \delta_0$, введем коэффициенты

$$n_1^r = (1 - \delta_0)n_b, n_2^r = (1 + \delta_0)n_b, \quad (20)$$

Тогда в силу (18), (20) получаем

$$n_b^0 = n_1^r \text{ или } n_b^0 = n_2^r. \quad (21)$$

Введем коэффициенты n_1^d, n_2^d по формулам

$$n_1^d = (1 - \delta_p)n_b, n_2^d = (1 + \delta_p)n_b. \quad (22)$$

В силу того, что $0 \leq \delta_g < 1, n_b > 0$, из (22) следует

$$n_2^d \geq n_1^d. \quad (23)$$

Пусть для коэффициента n_b выполняются условия прочности (17), т. е. пусть

$$n_1^p \leq (1 - \delta_p)n_b, (1 + \delta_p)n_b \leq n_2^p.$$

Тогда для коэффициентов n_1^d, n_2^d с учетом (23) выполняются неравенства

$$n_1^p \leq n_1^d \leq n_2^d \leq n_2^p. \quad (24)$$

Сравнивая (20), (22) с учетом (19), следуют неравенства

$$n_1^d \leq n_1^r, n_2^r \leq n_2^d.$$

Отсюда, учитывая, что согласно (19) $n_1^r \leq n_2^r$, получаем

$$n_1^d \leq n_1^r \leq n_2^r \leq n_2^d. \quad (25)$$

Тогда в силу (24), (25) выполняются неравенства

$$n_1^p \leq n_1^r \leq n_2^r \leq n_2^p. \quad (26)$$

Из выполнения (26) с учетом (21) следует выполнение заданных условий прочности (14) для коэффициента запаса n_b^0 . Ограничения на параметр δ_p находим из предположения существования условий прочности (17), т. е. пусть

$$\frac{n_1^p}{1 - \delta_p} \leq \frac{n_2^p}{1 + \delta_p}. \quad (27)$$

Откуда следует

$$\delta_p \leq C_p = \frac{\Delta n}{n_1^p + n_2^p}. \quad (28)$$

Отметим, что поскольку $n_2^p > n_1^p \geq 1$, то из (28) следует $0 < C_p < 1$. Если $\delta_p = C_p$, то диапазон для варьирования значений коэффициента n_b равен нулю, т. е. в этом случае $n_b = (n_1^p + n_2^p) / 2$, что трудно выполнить на практике при заданных n_1^p, n_2^p . Итак, при $\delta_p < C_p$ возможно выполнение заданных условий прочности (14) для коэффициента n_b^0 с применением скорректированных условий прочности (17) и приближенного решения, которое порождает для напряжения σ_b такую погрешность δ , что $|\delta| \leq \delta_p$. Теорема 2 доказана.

Скорректированные эквивалентные условия прочности, учитывающие погрешность напряжений. На практике для решения задач теории упругости, сформулированных для трехмерных композитных конструкций, применяются численные методы, например ММКЭ [10–12], которые порождают решения с малой погрешностью. В связи с этим возникает необходимость учитывать погрешность решений в эквивалентных условиях прочности. В работе [16] рассматриваются эквивалентные условия прочности без учета погрешности приближенных решений. Используя результаты работы [4], на основе теорем 1, 2 сформулируем скорректированные эквивалентные условия прочности, которые учитывают погрешность решений. Скорректированные эквивалентные условия прочности отражает следующая теорема, в которой используются обозначения, введенные в теоремах 1, 2.

Теорема 3. Пусть для коэффициента запаса упругой изотропной однородной конструкции V^b определены эквивалентные условия прочности вида

$$n_1^p \leq n_b^0 \leq n_2^p, \quad (29)$$

где n_1^p, n_2^p – заданы, т. е. определен параметр p (см. теорему 1); n_b^0 – коэффициент запаса прочности конструкции V^b , отвечающий точному решению трехмерной задачи упругости, сформулированной для конструкции V^b . Пусть для конструкции V^b определено максимальное эквивалентное напряжение σ_b , отвечающее приближенному решению задачи упругости. Пусть

$$|\delta| \leq \delta_p < C_p = \frac{\Delta n}{n_1^p + n_2^p}, \quad (30)$$

где $\Delta n = |n_2^p - n_1^p|$, δ – относительная погрешность для напряжения σ_b , т. е. $\delta = (\sigma_b - \sigma_b^0) / \sigma_b^0$, где σ_b^0 – максимальное эквивалентное напряжение конструкции V^b , отвечающее точному решению задачи упругости, δ_p – оценка для погрешности δ .

Пусть коэффициент запаса n_b конструкции, отвечающий приближенному решению, удовлетворяет

скорректированным эквивалентным условиям прочности вида

$$\frac{n_1^p}{1-\delta_p} \leq n_b \leq \frac{n_2^p}{1+\delta_p}. \quad (31)$$

где $n_b = \sigma_T / \sigma_b$, σ_T – предел текучести.

Тогда коэффициент запаса n_b^0 конструкции, отвечающий точному решению, удовлетворяет эквивалентным условиям прочности (29), где $n_b^0 = \sigma_T / \sigma_b^0$.

Доказательство теоремы 3 аналогично доказательству теоремы 2. Отметим, что δ_p можно рассматривать как максимальную погрешность для максимального эквивалентного напряжения σ_b конструкции V^b . Соотношения (31) представим в виде

$$n_1^p (1 + \varepsilon_1) \leq n_b \leq n_2^p (1 - \varepsilon_2),$$

или, учитывая (13), имеем

$$pn_1(1 + \varepsilon_1) \leq n_b \leq pn_2(1 - \varepsilon_2), \quad (32)$$

где величины ε_1 , ε_2 определяются с помощью погрешности δ_p напряжения σ_b по формулам

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{1-\delta_p} - 1, \quad \varepsilon_2 = 1 - \frac{1}{1+\delta_p}, \quad 0 \leq \delta_p < 1, \quad (33)$$

здесь p – коэффициент эквивалентности.

Основные положения метода эквивалентных условий прочности. Рассмотрим консольную композитную балку V_0 регулярной структуры (которая расположена в декартовой системе координат $Oxyz$) длиной $L = 1536h = 600$, квадратного сечения размерами $H \times H$, где $H = 128h = 50$ (рис. 1). Балка V_0 состоит из пластичных материалов и имеет статическое нагружение $q_z(x, y, z)$.

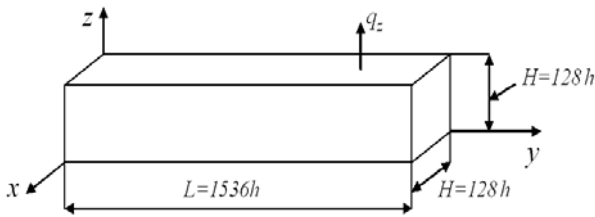


Рис. 1. Характерные размеры балки V_0

Fig. 1. The characteristic sizes of the beam V_0

Регулярная ячейка G_0 композитной балки V_0 имеет размеры $8h \times 8h \times 8h$, в которой расположены продольные волокна сечением $h \times h$ (рис. 2, сечения волокон закрашены, 16 волокон). Таким образом, балка армирована продольными волокнами – сечением $h \times h$, расстояние между волокнами равно h . Волокна являются изотропными однородными телами и имеют одинаковые модули упругости.

Если толщина волокон меньше 0,5 мм, то такие волокна образуют микро неоднородную структуру [17]. Пусть $L = 600$ мм, $H = 50$ мм, тогда $h = 0,3906$ мм, т. е. балка V_0 размерами $5 \times 60 \times 5$ см имеет микро неоднородную регулярную волокнистую структуру.

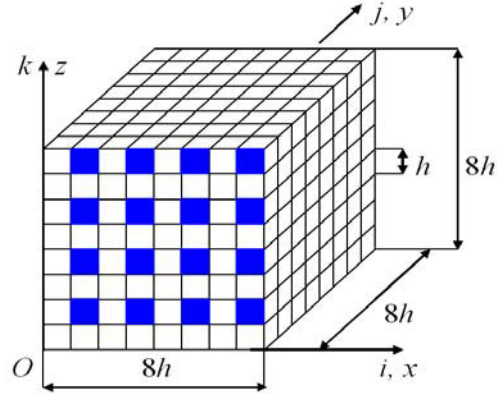


Рис. 2. Регулярная ячейка G_0

Fig. 2. Regular cell G_0

Для коэффициента запаса n_0 композитной балки V_0 заданы условия прочности вида (5). Требуется определить коэффициент запаса n_0 данной балки, т. е. проверить, удовлетворяет ли балка V_0 заданным условиям прочности. Для решения данной задачи используем МЭУП, основные положения которого рассмотрим (для простоты изложения, не теряя общности суждений) на примере балки V_0 с микро неоднородной регулярной структурой. Базовое регулярное разбиение \mathbf{R}_0 балки V_0 состоит из (базовых) односечных КЭ (1сКЭ) V_j^h 1-го порядка формы куба со стороной h [8], в которых реализуется трехмерное НДС. Разбиение \mathbf{R}_0 учитывает микро неоднородную структуру балки, порождает равномерную мелкую (базовую) сетку с шагом h размерности $129 \times 1537 \times 129$ и дискретную модель с общим числом узловых неизвестных МКЭ $N_0 = 76681728$, ширина ленты системы уравнений (СУ) МКЭ равна $b_0 = 50316$. Реализация МКЭ для базовой модели \mathbf{R}_0 (более 76 млн узловых неизвестных) требует больших ресурсов ЭВМ. Построение последовательности решений связано с применением процедуры измельчения базового разбиения, которая для композитной структуры балки V_0 является сложной и труднореализуемой, так как каждый шаг измельчения приводит к резкому увеличению размерности дискретной задачи. Отметим, что шаг базового регулярного разбиения \mathbf{R}_0 композитной балки V_0 не может быть больше h , так как сечение волокна имеет размеры $h \times h$.

Согласно МЭУП, введем изотропную однородную балку V^b такую, что балки V^b , V_0 имеют одинаковые

форму, размеры, заданные закрепления и нагружения, но отличаются модулями упругости. Модули упругости балки V^b равны модулям упругости волокна балки V_0 . Реализация МЭУП сводится к построению скорректированных эквивалентных условий прочности (32) и к определению коэффициента запаса n_b тела V^b , т. е. к определению коэффициента эквивалентности p для балки V_0 и к определению с помощью МКЭ максимального эквивалентного напряжения σ_b для тела V^b с погрешностью δ_p . Коэффициент p определяется по формуле $p = \sigma_0 / \sigma_b$, где σ_0, σ_b – максимальные эквивалентные напряжения соответственно тел V_0, V^b . Отметим, что нахождение напряжения σ_0 по МКЭ (с применением односеточных КЭ формы куба со стороной h [8]) для балки V_0 с учетом ее микронеоднородной структуры требует больших ресурсов ЭВМ.

Для нахождения коэффициента эквивалентности p и напряжения σ_b предлагается следующая процедура. Для изотропного однородного тела V^b строим последовательность базовых регулярных разбиений (дискретных моделей) $\{V_n^0\}_{n=1}^N$, состоящих из базовых 1сКЭ $V_j^{(n)}$ 1-го порядка формы куба со стороной h_n . Дискретная модель V_n^0 имеет размерность $n_1^{(n)} \times n_2^{(n)} \times n_3^{(n)}$, где

$$\begin{aligned} n_1^{(n)} &= 8n + 1, \quad n_2^{(n)} = 96n + 1, \\ n_3^{(n)} &= 8n + 1, \quad n = 1, \dots, N. \end{aligned} \quad (34)$$

Шаги базовой сетки по осям Ox, Oy, Oz равны $h_x^{(n)} = H / (8n), h_y^{(n)} = L / (96n), h_z^{(n)} = H / (8n)$, так как $L = 12H$, то $h_n = h_x^{(n)} = h_y^{(n)} = h_z^{(n)}$, причем, $h_n > h$, $n = 1, \dots, N - 1$. Отметим, что при $n = N$ получаем $h_N = h$ (для закона измельчения (34) при $N = 16$ имеем $h_{16} = h$), т. е. при $n = 16$ размерности изотропной однородной дискретной модели V_{16}^0 и базового разбиения \mathbf{R}_0 композитной балки V_0 одинаковы. Важно отметить следующее. Закон измельчения для разбиений задается так, что каждое разбиение V_n^0 состоит из конечного числа одинаковых по форме и размерам таких областей G_n^b , что область G_n^b и область регулярной ячейки G_0 (рис. 2) имеют одинаковую форму, но отличаются характерными размерами. Для заданного закона измельчения (34) область G_n^b имеет размеры $8h_n \times 8h_n \times 8h_n$. Область G_n^b отличается от области регулярной ячейки G_0 (размерами $8h \times 8h \times 8h$, см. рис. 2) характерными размерами вида $h_n = \beta_n h$, где $\beta_n > 1$. При $n \rightarrow 16$ имеем $\beta_n \rightarrow 1$, при $n = 16$ получаем $\beta_{16} = 1$.

Введем область G_n^0 , форма и характерные размеры которой совпадают с областью G_n^b , $n = 1, \dots, N$. При этом область G_n^0 имеет композитную структуру, которая по виду совпадает со структурой регулярной ячейки G_0 , т. е. область G_n^0 имеет такое же число волокон (с квадратным сечением размерами $h_n \times h_n$) и такое же их взаимное расположение, как в ячейке G_0 (16 продольных волокон, см. рис. 2). Волокна в областях G_n^0, G_0 имеют одинаковые модули упругости. Области G_n^0, G_0 , по сути, отличаются только масштабностью, т. е. формально можно записать $G_n^0 = \beta_n G_0$, где β_n – коэффициент масштабности, $\beta_n > 1$, $n = 1, \dots, N - 1$. При $n = N$ получаем $\beta_N = 1$, т. е. $G_N^0 = G_0$. Для закона измельчения (34) при $n = 16$ имеем $\beta_{16} = 1$, т. е. $G_{16}^0 = G_0$. Отметим, что в области G_n^0 учитывается неоднородная (волоконистая) структура.

Заменяем в дискретной модели V_n^0 все однородные изотропные области G_n^b на композитные области G_n^0 . В результате на основе изотропной однородной модели V_n^0 получаем композитную (базовую) дискретную модель, которую обозначим через R_n^0 (в которой учитывается неоднородная структура). Таким образом, при $n = 16$ композитная дискретная модель R_{16}^0 совпадает с базовой моделью \mathbf{R}_0 композитной балки V_0 , т. е. имеем $R_{16}^0 = \mathbf{R}_0$. Итак, дискретные модели V_n^0, R_n^0 имеют одинаковую форму, характерные размеры и размерность, одинаковые закрепления и нагружения, но отличаются модулями упругости. Согласно (34) размерности моделей V_n^0, R_n^0 резко возрастают при увеличении n . Для понижения размерности дискретных моделей эффективно применяются МнКЭ [10; 11; 13; 14]. Используя m -сеточные КЭ в дискретных базовых моделях V_n^0, R_n^0 , получаем соответственно m -сеточные дискретные модели V_n^b, R_n , которые имеют одинаковую форму, характерные размеры, размерность, одинаковые закрепления и нагружения как балка V_0 , но отличаются модулями упругости. Размерности m -сеточных дискретных моделей V_n^b, R_n значительно меньше размерностей соответственно базовых моделей V_n^0, R_n^0 . Процедура определения коэффициента эквивалентности p заключается в следующем. Для дискретных моделей V_n^b, R_n определяем соответственно максимальные эквивалентные напряжения σ_n^b, σ_n , с помощью которых находим коэффициент $p_n = \sigma_n / \sigma_n^b$, $n = 1, \dots, N$. Имеем $p_n \rightarrow p$ при $n \rightarrow N$. Пусть

$\delta_n = |p_n - p_{n-1}| / p_n$ есть малая величина, тогда принимаем $p = p_n$. Пусть построена последовательность решений $\{\sigma_n^b\}_{n=1}^{12}$, которая быстро сходится к точному решению и пусть $\delta_n^\sigma = |\sigma_n^b - \sigma_{n-1}^b| / \sigma_n^b$ малая величина. Тогда считаем, что σ_n^b есть максимальное эквивалентное напряжение изотропного однородного тела V^b (найденное с погрешностью δ_p). Подставляя полученные p , δ_p и заданные коэффициенты n_1, n_2 в (32), определяем скорректированные эквивалентные условия прочности для композитной балки V_0 . Коэффициент запаса n_b для тела V^b находим по формуле $n_b = \sigma_T / \sigma_n^b$, где σ_T – предел текучести волокна. Если найденный коэффициент n_b удовлетворяет полученным скорректированным эквивалентным условиям прочности вида (32), то коэффициент запаса n_0 композитной балки V_0 (см. рис. 1) удовлетворяет заданным условиям прочности вида (5).

Результаты численных экспериментов. Рассмотрим модельную задачу о расчете на прочность консольной балки V_0 с микронеоднородной волокнистой регулярной структурой размерами $128h \times 1536h \times 128h$, h – мало, задано (см. рис. 1). Балка V_0 состоит из пластичных материалов, имеет квадратное сечение размерами $H \times H$, где $H = 128h$. Регулярная ячейка микронеоднородной структуры балки V_0 размерами $8h \times 8h \times 8h$ имеет 16 одинаковых продольных волокон сечением $h \times h$ (см. рис. 2), т. е. балка армирована изотропными однородными продольными волокнами сечением $h \times h$, расстояние между волокнами равно h . При $y = 0: u = v = w = 0$, т. е. в плоскости xOz , балка V_0 закреплена. Для коэффициента запаса n_0 балки V_0 заданы условия прочности вида

$$1,3 \leq n_0 \leq 3,2. \quad (35)$$

Для балки V_0 используем следующие исходные данные:

$$h = 0,3906; \sigma_T = 5; E_v = 10, E_c = 1, \\ v_c = v_v = 0,3, q_z = 0,0018, \quad (36)$$

где $E_c, E_v (v_c, v_v)$ – модули Юнга (коэффициенты Пуассона) соответственно связующего материала и волокон, σ_T – предел текучести волокна, нагрузка q_z действует на поверхности $z = H, 0,5L \leq y \leq L$ (см. рис. 1).

Для расчета балки V_0 используем МЭУП с применением МНКЭ. В расчетах используем однородные и композитные лагранжевые трехсеточные КЭ (3сКЭ) формы прямоугольного параллелепипеда. Основные положения построения 3сКЭ рассмотрим на примере композитного 3сКЭ $V_\alpha^{(3)}$ формы прямоугольного

параллелепипеда размерами $8h \times 16h \times 8h$ [10; 15]. 3сКЭ $V_\alpha^{(3)}$ расположен в локальной декартовой системе координат $Oxyz$, который содержит две регулярных ячейки G_0 размерами $8h \times 8h \times 8h$ композитной балки V_0 . Вначале рассмотрим процедуру построения композитного лагранжевого двухсеточного КЭ (2сКЭ) $V_d^{(2)}$ размерами $8h \times 8h \times 8h$, который содержит одну регулярную ячейку G_0 . В процедуре используем равномерную мелкую сетку h_d с шагом h размерности $9 \times 9 \times 9$ и крупную сетку H_d , вложенную в мелкую, $H_d \subset h_d$. На рис. 3 показана мелкая сетка h_d и крупная сетка H_d , имеющая 125 узлов, которые отмечены точками. Мелкая сетка h_d порождена базовым разбиением R_d 2сКЭ $V_d^{(2)}$, которое состоит из 1сКЭ V_j^h 1-го порядка формы куба со стороной h (в которых реализуется трехмерное НДС, $j = 1, \dots, M, M$ – общее число 1сКЭ $V_j^h, M = 512$) и которое учитывает микронеоднородную структуру 2сКЭ $V_d^{(2)}$. Волокна параллельны оси Oy , сечения волокон в плоскости Oxz закрашены, 16 волокон (рис. 3).

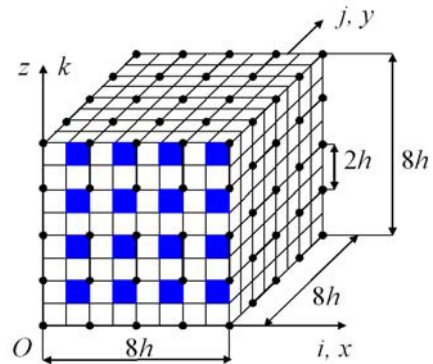


Рис. 3. Мелкая и крупная сетки 2сКЭ $V_d^{(2)}$

Fig. 3. Small and large mesh 2gFE $V_d^{(2)}$

Полную потенциальную энергию Π_d базового разбиения R_d 2сКЭ $V_d^{(2)}$ представим [5; 8]

$$\Pi_d = \sum_{j=1}^{512} \left(\frac{1}{2} \mathbf{q}_j^T [K_j^h] \mathbf{q}_j - \mathbf{q}_j^T \mathbf{P}_j \right), \quad (37)$$

где $[K_j^h]$ – матрица жесткости, $\mathbf{P}_j, \mathbf{q}_j$ – векторы узловых сил и перемещений 1сКЭ V_j^h базового разбиения 2сКЭ, T – транспонирование.

С помощью полиномов Лагранжа [5] на крупной сетке H_d определяем аппроксимирующие функции перемещений u_2, v_2, w_2 для 2сКЭ $V_d^{(2)}$, которые запишем в форме

$$u_2 = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^5 N_{ijk} u_{ijk}, \quad v_2 = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^5 N_{ijk} v_{ijk},$$

$$w_2 = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^5 N_{ijk} w_{ijk}, \quad (38)$$

где $u_{ijk}, v_{ijk}, w_{ijk}$ – значения перемещений u, v, w в узле i, j, k сетки H_d ; i, j, k – координаты целочисленной системы координат ijk , введенной для узлов сетки H_d (см. рис. 3); $N_{ijk} = N_{ijk}(x, y, z)$ – базисная функция узла i, j, k сетки H_d , $i, j, k = 1, \dots, 5$, $N_{ijk} = L_i(x)L_j(y)L_k(z)$, где

$$L_i(x) = \prod_{\alpha=1, \alpha \neq i}^5 \frac{x - x_\alpha}{x_i - x_\alpha}, \quad L_j(y) = \prod_{\alpha=1, \alpha \neq j}^5 \frac{y - y_\alpha}{y_j - y_\alpha},$$

$$L_k(z) = \prod_{\alpha=1, \alpha \neq k}^5 \frac{z - z_\alpha}{z_k - z_\alpha}, \quad (39)$$

здесь x_i, y_j, z_k – координаты узла i, j, k сетки H_d в системе координат $Oxyz$ (см. рис. 3).

Обозначим: $N_\beta = N_{ijk}$, $u_\beta = u_{ijk}$, $v_\beta = v_{ijk}$, $w_\beta = w_{ijk}$, где $i, j, k = 1, \dots, 5$, $\beta = 1, \dots, 125$. Тогда выражения (38) принимают вид

$$u_2 = \sum_{\beta=1}^{125} N_\beta u_\beta, \quad v_2 = \sum_{\beta=1}^{125} N_\beta v_\beta, \quad w_2 = \sum_{\beta=1}^{125} N_\beta w_\beta. \quad (40)$$

Обозначим через $\mathbf{q}_d = \{u_1, \dots, u_{125}, v_1, \dots, v_{125}, w_1, \dots, w_{125}\}^T$ вектор узловых перемещений сетки H_d , т. е. вектор узловых неизвестных 2сКЭ $V_d^{(2)}$. Используя (40), компоненты вектора \mathbf{q}_j узловых неизвестных 1сКЭ V_j^h выражаем через компоненты вектора \mathbf{q}_d , в результате получим равенство

$$\mathbf{q}_j = [A_j^2] \mathbf{q}_d, \quad (41)$$

где $[A_j^2]$ – прямоугольная матрица, $j = 1, \dots, 512$.

Подставляя (41) в выражение (37), из условия $\partial \Pi_d / \partial \mathbf{q}_d = 0$ получаем $[K_d] \mathbf{q}_d = \mathbf{F}_d$, где

$$[K_d] = \sum_{j=1}^{512} [A_j^2]^T [K_j^h] [A_j^2], \quad \mathbf{F}_d = \sum_{j=1}^{512} [A_j^2]^T \mathbf{P}_j, \quad (42)$$

здесь $[K_d]$ – матрица жесткости (размерности 375×375), \mathbf{F}_d – вектор узловых сил (размерности 375) 2сКЭ $V_d^{(2)}$.

Рассмотрим построение лагранжевого трехсеточного КЭ (3сКЭ) $V_\alpha^{(3)}$, используя два 2сКЭ $V_d^{(2)}$. Мелкая h_α и крупная H_α сетки 3сКЭ $V_\alpha^{(3)}$ показаны на рис. 4, узлы сетки H_α отмечены точками, 12 узлов. Узлы мелкой сетки h_α являются узлами крупных сеток H_d двух 2сКЭ $V_d^{(2)}$, $d = 1, 2$.

Полную потенциальную энергию Π_α 3сКЭ $V_\alpha^{(3)}$ представим в форме

$$\Pi_\alpha = \sum_{d=1}^2 \left(\frac{1}{2} \mathbf{q}_d^T [K_d] \mathbf{q}_d - \mathbf{q}_d^T \mathbf{F}_d \right), \quad (43)$$

где $[K_d]$, \mathbf{F}_d , \mathbf{q}_d – матрица жесткости, векторы узловых сил и перемещений 2сКЭ $V_d^{(2)}$, $d = 1, 2$.

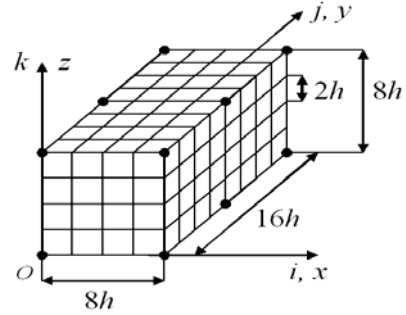


Рис. 4. Мелкая h_α и крупная H_α сетки 3сКЭ $V_\alpha^{(3)}$

Fig. 4. Small h_α and large H_α mesh 3gFE $V_\alpha^{(3)}$

С помощью полиномов Лагранжа на крупной сетке H_α определяем аппроксимирующие функции перемещений u_3, v_3, w_3 для 3сКЭ $V_\alpha^{(3)}$, которые запишем в форме

$$u_3 = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^2 N_{ijk} u_{ijk}, \quad v_3 = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^2 N_{ijk} v_{ijk},$$

$$w_3 = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^2 N_{ijk} w_{ijk}, \quad (44)$$

где $u_{ijk}, v_{ijk}, w_{ijk}$ – значения перемещений u, v, w в узле i, j, k сетки H_α ; i, j, k – координаты целочисленной системы координат ijk , введенной для узлов сетки H_α (см. рис. 4); $N_{ijk} = N_{ijk}(x, y, z)$ – базисная функция узла i, j, k сетки H_α , $i, k = 1, 2$, $j = 1, 2, 3$, $N_{ijk} = L_i(x)L_j(y)L_k(z)$, где

$$L_i(x) = \prod_{\alpha=1, \alpha \neq i}^2 \frac{x - x_\alpha}{x_i - x_\alpha}, \quad L_j(y) = \prod_{\alpha=1, \alpha \neq j}^3 \frac{y - y_\alpha}{y_j - y_\alpha},$$

$$L_k(z) = \prod_{\alpha=1, \alpha \neq k}^2 \frac{z - z_\alpha}{z_k - z_\alpha}, \quad (45)$$

здесь x_i, y_j, z_k – координаты узла i, j, k сетки H_α в системе координат $Oxyz$, рис. 4.

Обозначим: $N_\beta = N_{ijk}$, $u_\beta = u_{ijk}$, $v_\beta = v_{ijk}$, $w_\beta = w_{ijk}$, где $i, k = 1, 2$, $j = 1, 2, 3$, $\beta = 1, \dots, 12$. Тогда выражения (44) принимают вид

$$u_3 = \sum_{\beta=1}^{12} N_\beta u_\beta, \quad v_3 = \sum_{\beta=1}^{12} N_\beta v_\beta, \quad w_3 = \sum_{\beta=1}^{12} N_\beta w_\beta. \quad (46)$$

Обозначим через $\mathbf{q}_\alpha = \{u_1, \dots, u_{12}, v_1, \dots, v_{12}, w_1, \dots, w_{12}\}^T$ вектор узловых перемещений крупной сетки H_α , т. е. вектор узловых неизвестных 3сКЭ $V_\alpha^{(3)}$. Используя (46), компоненты вектора \mathbf{q}_d узловых неизвестных 2сКЭ $V_d^{(2)}$ выражаем через компоненты вектора \mathbf{q}_α , в результате получим

$$\mathbf{q}_d = [A_d^3] \mathbf{q}_\alpha, \quad (47)$$

где $[A_d^3]$ – прямоугольная матрица, $d = 1, 2$.

Подставляя (47) в выражение (43), из условия $\partial \Pi_\alpha / \partial \mathbf{q}_\alpha = 0$ получаем $[K_\alpha] \mathbf{q}_\alpha = \mathbf{F}_\alpha$, где

$$[K_\alpha] = \sum_{d=1}^2 [A_d^3]^T [K_d] [A_d^3], \quad \mathbf{F}_\alpha = \sum_{d=1}^2 [A_d^3]^T \mathbf{F}_d, \quad (48)$$

здесь $[K_\alpha]$ – матрица жесткости (размерности 36×36), \mathbf{F}_α – вектор узловых сил (размерности 36) 3сКЭ $V_\alpha^{(3)}$.

Замечание 2. Решение, построенное для крупной сетки H_α 3сКЭ $V_\alpha^{(3)}$, с помощью формулы (47) проецируется на мелкую сетку h_α 3сКЭ $V_\alpha^{(3)}$. Затем, с помощью формулы (41) определяем узловые перемещения базовых разбиений 2сКЭ $V_d^{(2)}$, что дает возможность вычислять напряжения в любом 1сКЭ V_j^h базового разбиения R_d 2сКЭ $V_d^{(2)}$, $d = 1, 2$.

Замечание 3. В силу (41) размерность вектора \mathbf{q}_d (т. е. размерность 2сКЭ $V_d^{(2)}$) не зависит от общего числа M 1сКЭ V_j^h , т. е. от размерности разбиения R_d . Поэтому для учета в 2сКЭ микронеоднородной структуры можно использовать сколь угодно мелкие базовые разбиения R_d , состоящие из 1сКЭ V_j^h . В этом случае в 2сКЭ $V_d^{(2)}$ (следовательно, и в 3сКЭ $V_\alpha^{(3)}$) сколь угодно точно описывается трехмерное НДС (без введения дополнительных упрощающих гипотез).

С помощью процедур, изложенных в работе [14], проектируются 2сКЭ для расчета композитных оболочек вращения, колец сложной формы и валов, которые имеют центральные круговые отверстия, композитных и однородных цилиндрических оболочек, пластин и балок сложной формы, которые широко используются на практике. Процедура построения однородных МКЭ аналогична процедуре построения композитных МКЭ.

Для композитной балки V_0 определяем изотропное однородное тело V^b (балку V^b). Тела V_0 , V^b имеют одинаковые форму, размеры, закрепление и нагружение, модули упругости тела V^b равны модулям упругости волокна. Используя закон измельчения (34), строим по процедуре, описанной выше, трехсеточные дискретные модели V_n^b , R_n , состоящие

соответственно из изотропных однородных и композитных 3сКЭ типа $V_\alpha^{(3)}$ размерами $8h_n \times 16h_n \times 8h_n$, $n = 1, 12$. Для дискретной изотропной однородной модели V_n^b находим решения w_n^b , σ_n^b , где w_n^b , σ_n^b – максимальные перемещение и эквивалентное напряжение дискретной модели V_n^b , $n = 1, \dots, 12$. Эквивалентные напряжения определяем по 4-й теории прочности. Результаты расчетов представлены в табл. 1. Анализ результатов расчетов показывает быструю равномерно монотонную сходимость приближенных решений (w_n^b, σ_n^b) к точному. Напряжения $\sigma_{11}^b = 0,665$, $\sigma_{12}^b = 0,686$, отличаются на $\delta = 3,061\%$. Тестовые расчеты показывают, что в этом случае напряжение σ_{12}^b найдено с погрешностью $10 \div 15\%$. Принимаем $\delta_p = 0,15$. Условие (30) для δ_p выполняется. Учитывая в (30) соотношения (13), (35), имеем $\delta_p = 0,15 < C_p = 0,42$. Согласно (33) при $\delta_p = 0,15$ получаем $\varepsilon_1 = 0,176$, $\varepsilon_2 = 0,131$. Скорректированные эквивалентные условия прочности (32) для $\varepsilon_1 = 0,176$, $\varepsilon_2 = 0,131$ имеют вид

$$1,176 p n_1 \leq n_b \leq 0,869 p n_2, \quad (49)$$

где n_b – коэффициент запаса тела V^b , определяемый с помощью МКЭ.

Результаты расчетов балки V^b

V_n^b	w_n^b	σ_n^b	V_n^b	w_n^b	σ_n^b
V_1^b	204,851	0,377	V_7^b	238,033	0,569
V_2^b	228,503	0,489	V_8^b	238,263	0,595
V_3^b	234,023	0,524	V_9^b	238,422	0,620
V_4^b	236,109	0,537	V_{10}^b	238,545	0,643
V_5^b	237,119	0,543	V_{11}^b	238,630	0,665
V_6^b	237,683	0,547	V_{12}^b	238,697	0,686

Отметим, что трехсеточная дискретная модель V_{12}^b , состоящая из лагранжевых 3сКЭ типа $V_\alpha^{(3)}$ ($\alpha = 1, \dots, 32768$) размерами $8h_{12} \times 16h_{12} \times 8h_{12}$, имеет $N_{12}^b = 73008$ узловых неизвестных МКЭ, ширина ленты СУ МКЭ равна $b_{12} = 1059$. Реализация МКЭ для дискретной модели V_{12}^b требует в $k = \frac{N_0 \times b_0}{N_{12}^b \times b_{12}} = \frac{76681728 \times 50316}{73008 \times 1059} = 49903,566$ раз меньше объема памяти ЭВМ, чем для базовой модели \mathbf{R}_0 балки V_0 , что показывает высокую эффективность применения лагранжевых 3сКЭ типа $V_\alpha^{(3)}$ в расчетах. Коэффициент эквивалентности p для композитной балки V_0 определяем с помощью процедуры, которая описана выше. Дискретные модели V_n^b , R_n ,

$n = 9, 11, 12$ построены с помощью 3сКЭ типа $V_\alpha^{(3)}$ на основе базовых регулярных разбиений соответственно размерностей: $73 \times 865 \times 73$, $89 \times 1057 \times 89$ и $97 \times 1153 \times 97$. Коэффициенты эквивалентности p_n находим по формуле $p_n = \sigma_n / \sigma_n^b$, где σ_n , σ_n^b – максимальные эквивалентные напряжения соответственно моделей R_n , V_n^b , $n = 9, 11, 12$. В результате расчетов получаем: $p_9 = 3,002$, $p_{11} = 3,000$, $p_{12} = 2,999$. Относительные погрешности для найденных коэффициентов p_9 , p_{11} , p_{12} равны

$$\delta_1(\%) = 100\% \times |p_{11} - p_9| / p_{11} = \\ = 100\% \times |3,002 - 3,000| / 3,000 = 0,066\%$$

$$\delta_2(\%) = 100\% \times |p_{22} - p_{11}| / p_{12} = \\ = 100\% \times |3,000 - 2,999| / 2,999 = 0,033\%$$

Поскольку $p_9 > p_{11} > p_{12}$ и δ_2 самая малая величина, то считаем, что коэффициент эквивалентности равен $p = p_{12} = 2,999$. Подставляя в (49) $p = 2,999$, $n_1 = 1,3$, $n_2 = 3,2$, получаем

$$4,584 \leq n_b \leq 8,339. \quad (50)$$

Коэффициент запаса однородного тела V^b равен $n_b = \sigma_T / \sigma_{12}^b = 5 / 0,686 = 7,288$, который удовлетворяет скорректированным эквивалентным условиям прочности (50). Это означает, что коэффициент запаса n_0 композитной балки V_0 удовлетворяет заданным условиям прочности (35).

Проведем проверочные расчеты. На основе базового разбиения R_0 балки V_0 с применением 3сКЭ $V_\alpha^{(3)}$ строим трехсеточные дискретные модели: композитную R_{16} и изотропную однородную R_{16}^b , отвечающие закону измельчения (34) при $n = 16$. Считаем, что напряжения $\sigma_{16} = 2,279$, $\sigma_{16}^b = 0,762$ отвечают точным решениям, т. е. $\sigma_0 = \sigma_{16}$, $\sigma_b = \sigma_{16}^b$. Тогда коэффициент запаса для композитного тела V_0 равен $n_0 = \sigma_T / \sigma_0 = 5 / 2,279 = 2,194$, т. е. $n_0 = 2,194$ удовлетворяет заданным условиям прочности (35), что подтверждает аналогичный вывод, полученный с помощью МЭУП.

Коэффициент эквивалентности p_0 (отвечающий точным решениям) для балки V_0 равен $p_0 = \sigma_0 / \sigma_b = 2,279 / 0,762 = 2,990$. Отметим, что коэффициенты $p = 2,999$ и $p_0 = 2,990$ отличаются на 0,301 %, т. е. в самом деле, можно принять $p_0 = p$.

Размерность базовой дискретной модели V_{12}^0 (сетка которой при $n = 12$ имеет размерность $97 \times 1153 \times 97$, см. формулы (34)) равна 32517504, ширина ленты СУ МКЭ равна 28524. Число узловых неизвестных МКЭ трехсеточной дискретной модели V_{12}^b равно 73008, ширина ленты СУ МКЭ равна 1059. Реа-

лизация МКЭ для однородной изотропной трехсеточной дискретной модели V_{12}^b требует в $k_2 = \frac{32517504 \times 28524}{73008 \times 1059} = 11996,685$ раз меньше объема памяти ЭВМ, чем для базовой модели V_{12}^0 , состоящей из известных 1сКЭ формы куба со стороной h_{12} .

Заключение. Предложен метод эквивалентных условий прочности для расчета на статическую прочность конструкций (пластины, балки, оболочки) с неоднородной, микронеоднородной регулярной структурой при заданных условиях прочности. Реализация метода сводится к расчету на прочность изотропных однородных тел с применением эквивалентных условий прочности, построенных на основе заданных. При расчете однородных тел по МКЭ используются МнКЭ, которые порождают дискретные модели малой размерности и решения с малой погрешностью. Реализация предлагаемого метода требует малых ресурсов ЭВМ.

Библиографические ссылки

1. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев : Наук. думка, 1975. 704 с.
2. Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Иосилевич Г. Б. Расчет на прочность деталей машин. М. : Машиностроение, 1993. 640 с.
3. Москвичев В. В. Основы конструкционной прочности технических систем и инженерных сооружений. Новосибирск : Наука, 2002. 106 с.
4. Матвеев А. Д. Расчет упругих конструкций с применением скорректированных условий прочности // Известия АлтГУ. Серия: Математика и механика. 2017. № 4. С. 116–119. Doi: 10.14258/izvasu(2017)4-21.
5. Норри Д., Ж. де Фриз. Введение в метод конечных элементов. М. : Мир, 1981. 304 с.
6. Голованов А. И., Тюленева О. И., Шигабутдинов А. Ф. Метод конечных элементов в статике и динамике тонкостенных конструкций. М. : Физматлит, 2006. 392 с.
7. Образцов И. Ф., Савельев Л. М., Хазанов Х. С. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов. М. : Высшая школа, 1985. 392 с.
8. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М. : Мир, 1975. 542 с.
9. Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов. М. : Мир, 1982. 232 с.
10. Матвеев А. Д. Метод многосеточных конечных элементов в расчетах трехмерных однородных и композитных тел // Учен. зап. Казан. ун-та. Серия: Физ.-матем. науки. 2016. Т. 158, кн. 4. С. 530–543.
11. Матвеев А. Д. Метод многосеточных конечных элементов в расчетах композитных пластин и балок // Вестник КрасГАУ. 2016. № 12. С. 93–100.
12. Matveev A. D. Multigrid finite element method in stress of three-dimensional elastic bodies of heterogeneous structure // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2016. Vol. 158, No. 1. Art. 012067. P. 1–9.
13. Матвеев А. Д. Построение сложных многосеточных конечных элементов с неоднородной и мик-

ронеоднородной структурой // Известия АлтГУ. Серия: Математика и механика. 2014. № 1/1. С. 80–83. Doi: 10.14258/izvasu(2014)1.1-18.

14. Матвеев А. Д. Построение многосеточных конечных элементов для расчета оболочек, пластин и балок на основе образующих конечных элементов // Вестник ПНИПУ. Механика. 2019. № 3. С. 48–57. Doi: 10/15593/perm.mech/2019.3.05.

15. Самуль В. И. Основы теории упругости и пластичности. М.: Высшая школа, 1982. 264 с.

16. Матвеев А. Д. Расчет на прочность композитных конструкций с применением эквивалентных условий прочности // Вестник КрасГАУ. 2014. № 11. С. 68–79.

17. Голушко С. К., Немировский Ю. В. Прямые и обратные задачи механики упругих композитных пластин и оболочек вращения. М.: Физматлит, 2008. 432 с.

References

1. Pisarenko G. S., YAKovlev A. P., Matveev V. V. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* [Handbook of resistance materials]. Kiev, Nauk. Dumka Publ., 1975, 704 p.

2. Birger I. A., SHorr B. F., Iosilevich G. B. *Raschet na prochnost' detaley mashin* [Calculation of the strength of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993. 640 p.

3. Moskvichev V. V. *Osnovy konstrukcionnoy prochnosti tekhnicheskikh sistem i inzhenernykh sooruzheniy* [Fundamentals of structural strength of technical systems and engineering structures]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2002, 106 p.

4. Matveev A. D. [Calculation of elastic structures using the adjusted terms of strength]. *Izvestiya AltGU. Matematika i mekhanika*. 2017, No. 4, P. 116–119 (In Russ.). Doi: 10.14258/izvasu(2017)4-21.

5. Norri D., de Friz Zh. *Vvedenie v metod konechnykh elementov* [Introduction to the finite element method]. Moscow, Mir Publ., 1981, 304 p.

6. Golovanov A. I., Tiuleneva O. I., Shigabutdinov A. F. *Metod konechnykh elementov v statike i dinamike tonkostennykh konstruksii* [Finite element method in statics and dynamics of thin-walled constructions]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006, 392 p.

7. Obraztsov I. F., Savel'ev L. M., Khazanov H. S. *Metod konechnykh elementov v zadachakh stroitel'noi mekhaniki letatel'nykh apparatov* [Finite element method in problems of aircraft structural mechanics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985, 392 p.

8. Zenkevich O. *Metod konechnykh elementov v tekhnike* [Finite element method in engineering]. Moscow, Mir Publ., 1975, 544 p.

9. Fudzii T., Dzako M. *Mekhanika razrusheniya kompozitsionnykh materialov* [Fracture mechanics of composite materials]. Moscow, Mir Publ., 1982.

10. Matveev A. D. [The method of multigrid finite elements in the calculations of three-dimensional homogeneous and composite bodies]. *Uchen. zap. Kazan. unta. Seriya: Fiz.-matem. Nauki*. 2016, Vol. 158, Iss. 4, P. 530–543 (In Russ.).

11. Matveev A. D. [Multigrid method for finite elements in the analysis of composite plates and beams]. *Vestnik KrasGAU*. 2016, No. 12, P. 93–100 (In Russ.).

12. Matveev A. D. Multigrid finite element method in stress of three-dimensional elastic bodies of heterogeneous structure. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2016, Vol. 158, No. 1, Art. 012067, P. 1–9.

13. Matveev A. D. [The construction of complex multigrid finite element heterogeneous and microinhomogeneities in structure]. *Izvestiya AltGU. Matematika i mekhanika*. 2014, No. 1/1, P. 80–83. Doi: 10.14258/izvasu(2014)1.1-18.

14. Matveev A. D. [Construction of multigrid finite elements to calculate shells, plates and beams based on generating finite elements]. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2019, No. 3, P. 48–57 (In Russ.). Doi: 10/15593/perm.mech/2019.3.05.

15. Samul' V. I. *Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti* [Fundamentals of the theory of elasticity and plasticity]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1982, 264 p.

16. Matveev A. D. [Strength calculation of composite structures using equivalent strength conditions]. *Vestnik KrasGAU*. 2014, No. 11, P. 68–79 (In Russ.).

17. Golushko S. K., Nemirovskii I. V. *Priamye i obratnye zadachi mekhaniki uprugikh kompozitnykh plastin i obolochek vrashcheniya* [Direct and inverse problems of mechanics of elastic composite plates and shells of rotation]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008, 432 p.

© Матвеев А. Д., 2019

Матвеев Александр Данилович – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник; Институт вычислительного моделирования СО РАН. E-mail: mtv241@mail.ru.

Matveev Alexander Danilovich – Cand. Sc., associate Professor, senior researcher; Institute of computational modeling SB RAS. E-mail: mtv241@mail.ru.

UDC 519.6

Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-436-442

For citation: Pavlenko A. A. Comparison of methods for initializing starting points on the optimization genetic algorithm. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2019, Vol. 20, No. 4, P. 436–442. Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-436-442

Для цитирования: Павленко А. А. Сравнение способов инициализации начальных точек на генетическом алгоритме оптимизации // Сибирский журнал науки и технологий. 2019. Т. 20, № 4. С. 436–442. Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-436-442

COMPARISON OF METHODS FOR INITIALIZING STARTING POINTS ON THE OPTIMIZATION GENETIC ALGORITHM

A. A. Pavlenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: saaprepod@mail.ru

The way to initialize the starting points for optimization algorithms is one of the main parameters. Currently used methods of initializing starting points are based on stochastic algorithms of spreading points. In a genetic algorithm, points are Boolean sets. These lines are formed in different ways. They are formed directly, using random sequences (with uniform distribution law) or formed using random sequences (with uniform distribution law) in the space of real numbers, and then converted to boolean numbers. Six algorithms for constructing multidimensional points for global optimization algorithms of boolean sets based on both stochastic and non-random point spreading algorithms are designed. The first four methods of initialization of Boolean lines used a random distribution law, and the fifth and sixth methods of initialization used a non-random method of forming starting points-LP τ sequence. A large number of optimization algorithms were restarted. Calculations of high accuracy were used. The research was carried out on the genetic algorithm of global optimization. The work is based on Acly function, Rastrigin function, Shekel function, Griewank function and Rosenbrock function. The research was based on three algorithms of starting points spreading: LP τ sequence, UDC sequence, regular random spreading. The best parameters of the genetic algorithm of global optimization were used in the work. As a result, we obtained arrays of mathematical expectations and standard deviations of the solution quality for different functions and optimization algorithms. The purpose of the analysis of ways to initialize the starting points for the genetic optimization algorithm was to find the extremum quickly, accurately, cheaply and reliably simultaneously. Methods of initialization were compared with each other by expectation and standard deviation. The quality of the solution is understood as the average error of finding the extremum. The best way of initialization of starting points for genetic optimization algorithm on these test functions is revealed.

Keywords: genetic optimization algorithm, points initialization methods.

СРАВНЕНИЕ СПОСОБОВ ИНИЦИАЛИЗАЦИИ НАЧАЛЬНЫХ ТОЧЕК НА ГЕНЕТИЧЕСКОМ АЛГОРИТМЕ ОПТИМИЗАЦИИ

А. А. Павленко

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

Способ инициализации начальных точек для алгоритмов оптимизации является одним из главных параметров. Сегодня используются способы инициализации начальных точек, основанные на стохастических алгоритмах разброса точек. В генетическом алгоритме точки представляют собой булевы строки. Эти строки формируются по-разному: напрямую с помощью случайных последовательностей (с равномерным законом распределения) или с помощью случайных последовательностей (с равномерным законом распределения) в пространстве вещественных чисел, а потом преобразуют вещественные числа в булевы. Спроектированы шесть алгоритмов построения многомерных точек для алгоритмов глобальной оптимизации – булевых строк, основанные как на стохастических, так и на неслучайных алгоритмах разброса точек. В первых четырех способах инициализации булевых строк использовался случайный закон распределения, а в четвертом и пятом способе инициализации использовался неслучайный способ формирования начальных точек – ЛП τ последовательность. Применялось большое количество повторных запусков алгоритмов оптимизации. Использовалась достаточно высокая точность вычислений. Исследования проводились на генетическом алгоритме глобальной

оптимизации. Использовались функция Акли, функция Растргина, функция Шекеля, функция Гриванка и функция Розенброка. Исследования проводились с использованием трех алгоритмов разброса начальных точек: ЛПτ последовательность, UDC последовательность, равномерный случайный разброс. В работе использовались лучшие параметры генетического алгоритма глобальной оптимизации. На выходе получены массивы математических ожиданий и среднеквадратических отклонений качества решения для разных функции и оптимизационных алгоритмов. Цель анализа способов инициализации начальных точек для генетического оптимизационного алгоритма заключалась в нахождении экстремума одновременно быстро, точно, дешево и надёжно. Способы инициализации сравнивались между собой по математическому ожиданию и среднеквадратическому отклонению. Под качеством решения понимается среднестатистическая ошибка нахождения экстремума. Выявлен лучший способ инициализации начальных точек для генетического алгоритма оптимизации на данных тестовых функциях.

Ключевые слова: генетический алгоритм оптимизации, способы инициализации точек.

Introduction. The genetic algorithm of global optimization [1] differs from the others in Economics, Finance, and banking. In the genetic algorithm, points are represented as boolean sets. These lines can be formed in different ways: directly, using random sequences (with regular distribution law) or spreading points using random sequences (with a regular distribution law) in the space of real numbers, and then convert them into Boolean ones. The research is based on Acly function, Rastrigin function, Shekel function, Griewank function and Rosenbrock function. [2]. LPτ sequence [3], UDC sequence, uniform random spread are very interesting and efficient algorithms for spreading starting points. Recent studies in this area were carried out in the works [4]. These studies were applied to specific practical problems, there was no goal in averaging these parameters, in testing on a large number of practical problems of a complex type of the tested function [5]. LPτ sequences is a point spreading algorithm based on the matrix of irreducible Marshall Polynomials. UDC sequence is an algorithm for regular distribution of points over all coordinates in multidimensional space [6] regardless of the number of spread points [7]. Regular random spread [8] is a stochastic point spreading algorithm using the normal distribution law.

The best parameters of the genetic algorithm of global optimization were used [9].

Parameter description. The paper used the best parameters of the genetic algorithm of global optimization:

1. Selection – tournament 4 participants.

2. Recombination – 2-point, the probability of crossing – 0.8.

3. Probability of mutation 0.001

4. Binary coding.

Additional parameters used:

1. The size of the space of the studied regularity – 2.
2. Total number of spreading points (boolean sets) – 50.
3. The maximum number of steps of the algorithm (generations) – 200.
4. The accuracy of finding the extremum – 0.0001.
5. The number of repeated runs of the algorithm – 400.
6. Boundaries of the study area отfrom –45 to +45 on each coordinate.

We used six methods of initialization:

Method 1: using random sequences (with regular distribution law), a real number from 1 to 100 is obtained. If the resulting number is less than 50, the corresponding bit of the boolean set [10] takes the value 1, otherwise 0. This produces boolean sets (fig. 1).

Method 2: using random sequences [11], we obtain a real number from 1 to K, where K is the maximum real number obtained if each bit of the boolean set is equal to 1. Then, this real number is converted to a boolean set by the conversion rules. This produces boolean sets (fig. 2).

Method 3. The third method is equal to the first but with the checking of boolean sets for repeatability (fig. 3).

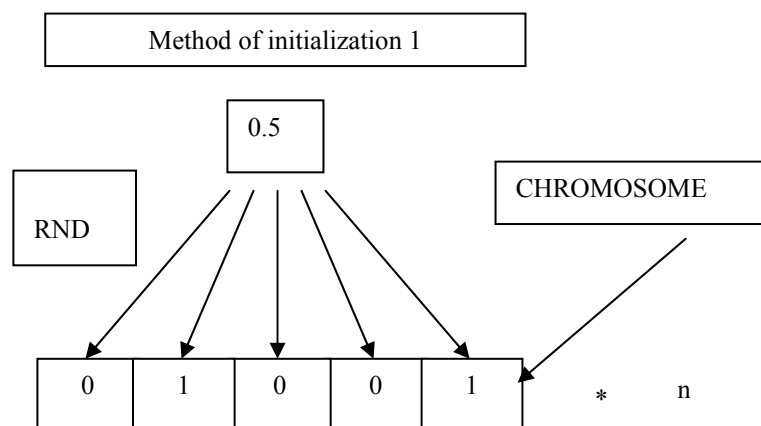


Fig. 1. The first method of initialization

Рис. 1. Первый способ инициализации

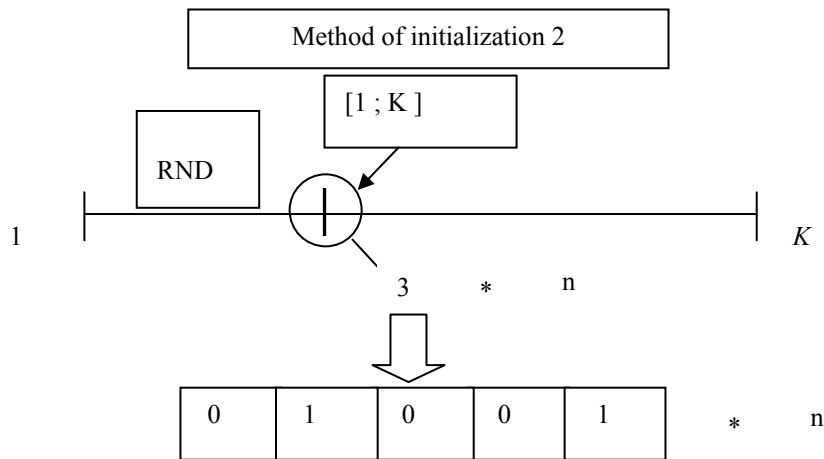


Fig. 2. The second method of initialization

Рис. 2. Второй способ инициализации

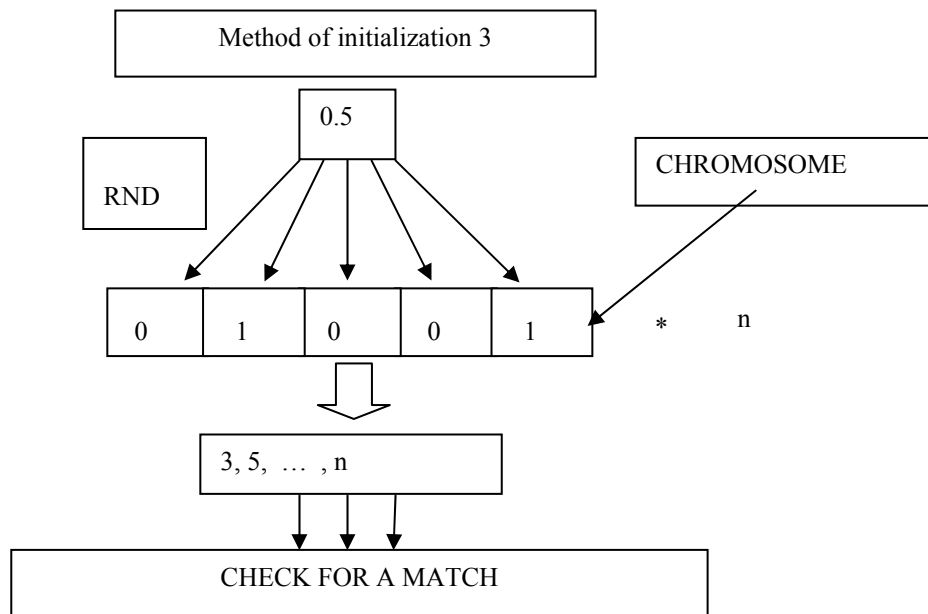


Fig. 3. The third method of initialization

Рис. 3. Третий способ инициализации

Method 4. The fourth method is equal to the second one but with the checking of real numbers for repeatability (fig. 4).

Method 5: with the help of the $LP\tau$ sequence, a real number from 1 to 100 is obtained. If the resulting number is less than 50, the corresponding bit of the boolean set will be 1, otherwise 0. This produces boolean sets (fig. 5).

Method 6: using the $LP\tau$ sequence, we obtain a real number from 1 to K , where K is the maximum real number obtained if each bit of the boolean set was equal to 1. Then, this real number is converted into a boolean set (fig. 6).

As a result, we get arrays of mathematical expectations and standard deviations of the solution quality for different functions and optimization algorithms [12]. The quality of the solution is the average error of finding the extremum [13].

Recent experiments in this area were carried out in the works of the scientist [7]. In his works, binary lines were formed without taking into account the check for repeatability.

Experimental part. The initialization methods are compared with each other on a genetic algorithm, according to math expectation, on the first function. The best way to initialize on a six-point scale is determined. Then they are compared on the second function, etc.

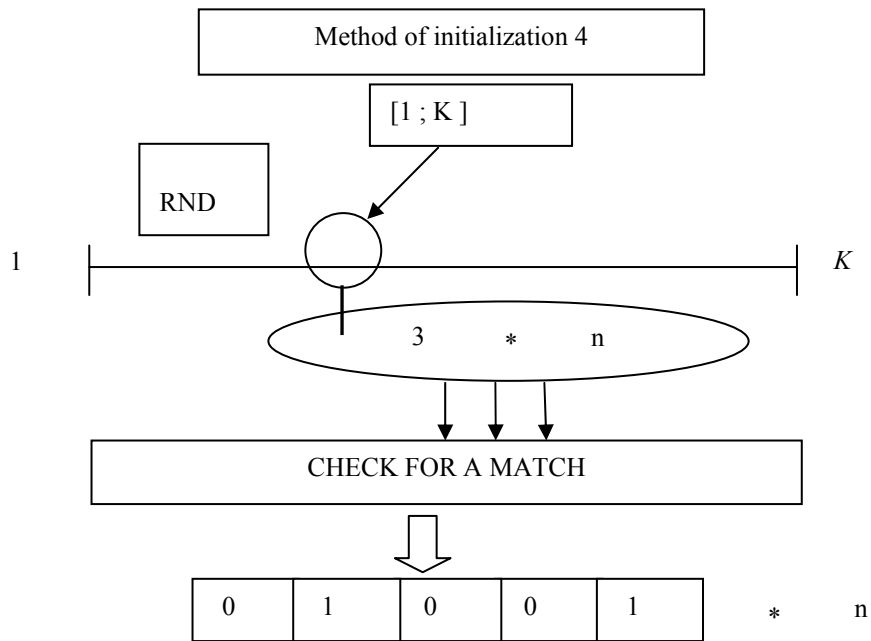


Fig. 4. The fourth method of initialization

Рис. 4. Четвёртый способ инициализации

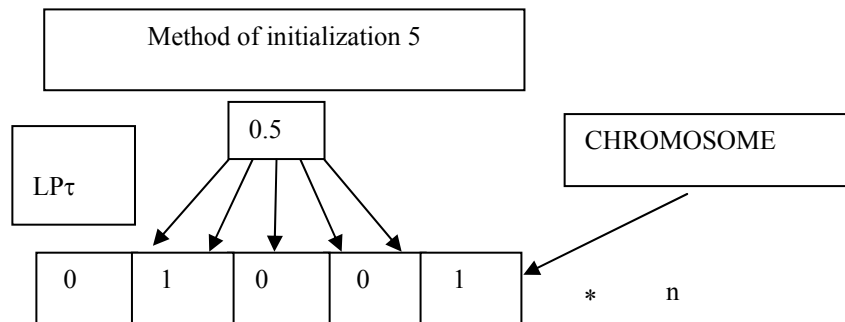


Fig. 5. The fifth method of initialization

Рис. 5. Пятый способ инициализации

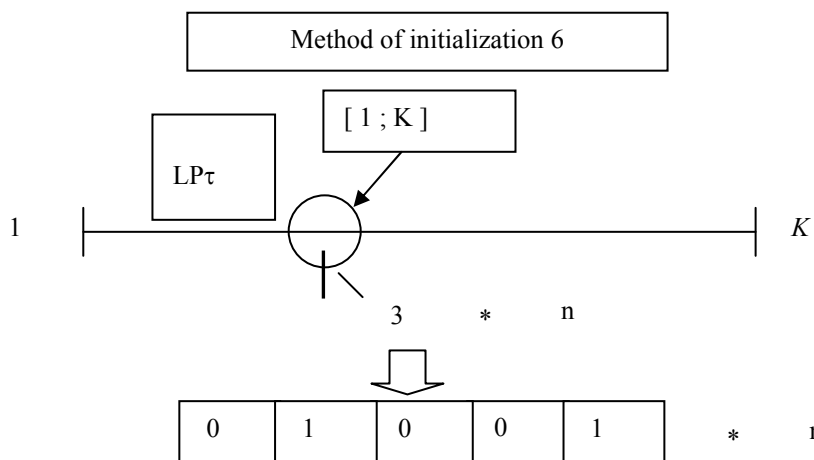


Fig. 6. The sixth method of initialization

Рис. 6. Шестой способ инициализации

Table 1

Percentage of finding the extremum for the algorithm by absolute value

		Method of initialization (I)						Best I
		1	2	3	4	5	6	
Function	1	4.00	3.50	2.75	2.25	3.50	3.25	1
	2	7.25	7.50	7.25	7.75	8.50	7.25	5
	3	0	0	0	0	0	0	–
	4	0	0.25	0	0.75	1.00	0.25	5
Total								5

Table 2

The quality of the solution for the Genetic algorithm by absolute value

Function		Method of initialization (I)						Best I by M	Best I by σ
		1	2	3	4	5	6		
1	M	0.2431	0.2453	0.2511	0.2401	0.2231	0.2370	5	2
	σ	0.2127	0.2035	0.2221	0.2177	0.2076	0.2077		
2	M	0.0613	0.0585	0.0629	0.0586	0.0533	0.0598	5	5
	σ	0.0512	0.0495	0.0725	0.0553	0.0310	0.0456		
3	M	0.5001	0.5478	0.5091	0.4904	0.4433	0.4455	5	5
	σ	0.3947	0.5188	0.3718	0.3459	0.0055	0.0422		
4	M	1.7635	1.7237	1.7866	1.7827	0.9066	1.9681	5	5
	σ	1.5675	1.7093	1.6367	1.6068	0.4152	1.8819		
Places by M		5	4	6	2	1	3		
Places by σ		3	3	5	4	1	2		
Total		5	4	6	3	1	2		

After that, the points obtained for all functions for each initialization method are summed up [14]. The larger the amount, the better place takes one or another method of initialization. The places got in this way are recorded in the tab. 1 and 2.

Then the whole cycle is repeated for the standard deviation (σ). After that, the obtained places by math expectation (M) and by σ are summed up and compared again [15]. Eventually we will know:

1. The best initialization method for each of the functions when using a genetic algorithm, both by math expectation and by σ .

2. The best and the worst methods of initialization on average for all four optimization functions, both by math expectation and by σ , and in general, when using a genetic algorithm.

Results. As we know, the goal of any optimization algorithm is to find the extremum as quickly, more accurately, cheaper and more reliable as possible.

The percentage of finding the extremum, on average, for all optimization functions is better for the initialization method 5 (tab. 2), it follows that the initialization method 5 has the greatest reliability (probability) of finding the extremum.

We prove that at 50 points, the algorithm calculates 200 steps (generations), on average, for 1/400 seconds.

Accuracy is the inverse of an error. The higher the accuracy, the smaller the error. The higher the accuracy obtained, the smaller the number takes the characteristic on a six-point scale, which means that the characteristic is better.

For the genetic algorithm (tab. 1) the smallest error of finding the extremum (quality of solution) according to the expected value for the first function characterizes the method of initialization 5, this means that the method 5 has the highest accuracy of finding the extremum. For the genetic algorithm, the initialization method 5 also has the highest accuracy of finding the extremum by mathematical expectation for the function 2–4. On average, for the genetic algorithm, the initialization method 5 has the highest accuracy of finding the extremum.

For the genetic algorithm, the smallest error of finding the extremum by σ for the function 1 (error) is in the initialization method 2, and for the function 2–4 – in the initialization method 5. On average, for a genetic algorithm, the smallest error is that the resulting expectation value is the average expectation value of the initialization method 5.

Since, on average, for the genetic algorithm, the highest accuracy of finding the extremum and the smallest error of the result obtained is in the initialization method 5, then, on average, the initialization method 5 is the best initialization method for the genetic algorithm and takes the first place.

To compare the method of initialization 5, for example, with the applied now numerical method of initialization 1, the comparison of these methods in percentage being conducted in relation to the method of initialization 1 for each function, and then taken the arithmetic average of these percentages for all functions.

As a result, it became obvious that in the genetic algorithm, the initialization method 5 is better than the initialization method 1 by an average of 20 % and the application of check in boolean initialization does not lead to positive result, and in real – leads.

Conclusion. The genetic algorithm of global optimization based on Acl γ function, Rastrigin function, Shekel function, Griewank function and Rosenbrock function is analyzed. The research was carried out on six methods of initialization of boolean sets, using three algorithms of spreading initial points: LP τ sequence, UDC sequence, uniform random spread. Studies show that, on average, the initialization method 5 is the best initialization method for the genetic algorithm, and it follows that the initialization method 5 is very promising. It must be taken into account that the initialization method 5 is based on a non – random algorithm of spreading points LP τ sequence. This provides an incentive for further study of the LP τ sequence, and once again confirms its effectiveness.

References

1. Zaloga A. N., Yakimov I. S., Dubinin P. S. Multipopulation Genetic Algorithm for Determining Crystal Structures Using Powder Diffraction Data. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2018, Vol. 12, No. 1, P. 128–134.
2. Stanovov V., Akhmedova S., Semenkina E. Automatic Design of Fuzzy Controller for Rotary Inverted Pendulum with Success-History Adaptive Genetic Algorithm. *2019 International Conference on Information Technologies (InfoTech)*. IEEE, 2019. P. 1–4.
3. Zaloga A. et al. Genetic Algorithm for Automated X-Ray Diffraction Full-Profile Analysis of Electrolyte Composition on Aluminium Smelters. *Informatics in Control, Automation and Robotics 12th International Conference, ICINCO 2015 Colmar, France, July 21–23, 2015 Revised Selected Papers*. Springer, Cham, 2016, P. 79–93.
4. Du X. et al. Genetic algorithm optimized non-destructive prediction on property of mechanically injured peaches during postharvest storage by portable visible/shortwave near-infrared spectroscopy. *Scientia Horticulturae*. 2019, Vol. 249, P. 240–249.
5. Akhmedova S., Stanovov V., Semenkina E. Soft Island Model for Population-Based Optimization Algorithms. *International Conference on Swarm Intelligence*. Springer, Cham, 2018, P. 68–77.
6. Yakimov I. et al. Application of Evolutionary Rietveld Method Based XRD Phase Analysis and a Self-

Configuring Genetic Algorithm to the Inspection of Electrolyte Composition in Aluminum Electrolysis Baths. *Crystals*. 2018, Vol. 8, No. 11, P. 402.

7. Chen W. et al. Applying population-based evolutionary algorithms and a neuro-fuzzy system for modeling landslide susceptibility. *Catena*. 2019, Vol. 172, P. 212–231.

8. Karabadzha G. et al. Semi-Empirical Method for Evaluation of a Xenon Operating Hall Thruster Erosion Rate Through Analysis of its Emission Spectra. *Spacecraft Propulsion*. 2000, Vol. 465, P. 909.

9. Akhmedova S., Stanovov V., Semenkina E. Success-History Based Position Adaptation in Co-operation of Biology Related Algorithms. *International Conference on Swarm Intelligence*. Springer, Cham, 2019, P. 39–49.

10. Yakimov I., Zaloga A., Dubinin P., Bezrukova O., Samoilo A., Burakov S., Semenkina E., Semenkina M., Andruschenko E. Application of Evolutionary Rietveld Method Based XRD Phase Analysis and a Self-Configuring Genetic Algorithm to the Inspection of Electrolyte Composition in Aluminum Electrolysis Baths. *Crystals*. 2018, Vol. 8, No. 11, P. 402.

11. Brester C., Rönkkö M., Kolehmainen M., Semenkina E., Kauhanen J., Tuomainen T. P., Voutilainen S., Ronkainen K. Evolutionary methods for variable selection in the epidemiological modeling of cardiovascular diseases. *BioData Mining*. 2018, Vol. 11, No. 18.

12. Mamontov D. et al. Evolutionary Algorithms for the Design of Neural Network Classifiers for the Classification of Pain Intensity. *IAPR Workshop on Multimodal Pattern Recognition of Social Signals in Human-Computer Interaction*. Springer, Cham, 2018, P. 84–100.

13. Brester C. et al. On a restart metaheuristic for real-valued multi-objective evolutionary algorithms. *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion*. ACM, 2019, P. 197–198.

14. Sharifpour E. et al. Zinc oxide nanorod loaded activated carbon for ultrasound assisted adsorption of safranin O: Central composite design and genetic algorithm optimization. *Applied Organometallic Chemistry*. 2018, Vol. 32, No. 2, P. e4099.

15. Penenko A. V. 2019 Newton–Kantorovich method for solving inverse problems of source identification in product–destruction models with time series data. *Siberian J. of computational mathematics*. 2019, No. 1, P. 57–79.

Библиографические ссылки

1. Zaloga A. N., Yakimov I. S., Dubinin P. S. Multipopulation Genetic Algorithm for Determining Crystal Structures Using Powder Diffraction Data // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2018. Vol. 12, No. 1. P. 128–134.
2. Stanovov V., Akhmedova S., Semenkina E. Automatic Design of Fuzzy Controller for Rotary Inverted Pendulum with Success-History Adaptive Genetic Algorithm // *2019 International Conference on Information Technologies (InfoTech)*. IEEE, 2019. P. 1–4.
3. Genetic Algorithm for Automated X-Ray Diffraction Full-Profile Analysis of Electrolyte Composition on Aluminium Smelters / A. Zaloga et al. // *Informatics in*

Control, Automation and Robotics 12th International Conference, ICINCO 2015 Colmar, France, July 21–23, 2015 Revised Selected Papers. Springer, Cham, 2016. P. 79–93.

4. Genetic algorithm optimized non-destructive prediction on property of mechanically injured peaches during postharvest storage by portable visible/shortwave near-infrared spectroscopy / X. Du et al. // *Scientia Horticulturae*. 2019. Vol. 249. P. 240–249.

5. Akhmedova S., Stanovov V., Semenkin E. Soft Island Model for Population-Based Optimization Algorithms // *International Conference on Swarm Intelligence*. Springer, Cham, 2018. P. 68–77.

6. Application of Evolutionary Rietveld Method Based XRD Phase Analysis and a Self-Configuring Genetic Algorithm to the Inspection of Electrolyte Composition in Aluminum Electrolysis Baths / I. Yakimov et al. // *Crystals*. 2018. Vol. 8, No. 11. P. 402.

7. Applying population-based evolutionary algorithms and a neuro-fuzzy system for modeling landslide susceptibility / W. Chen et al. // *Catena*. 2019. Vol. 172. P. 212–231.

8. Semi-Empirical Method for Evaluation of a Xenon Operating Hall Thruster Erosion Rate Through Analysis of its Emission Spectra / G. Karabadzha et al. // *Spacecraft Propulsion*. 2000. Vol. 465. P. 909.

9. Akhmedova S., Stanovov V., Semenkin E. Success-History Based Position Adaptation in Co-operation of Biology Related Algorithms // *International Conference on Swarm Intelligence*. Springer, Cham, 2019. P. 39–49.

10. Application of Evolutionary Rietveld Method Based XRD Phase Analysis and a Self-Configuring Genetic Algorithm to the Inspection of Electrolyte Composition in Aluminum Electrolysis Baths / I. Yakimov, A. Zaloga, P. Dubinin et al. // *Crystals*. 2018. Vol. 8, No. 11. P. 402.

11. Evolutionary methods for variable selection in the epidemiological modeling of cardiovascular diseases / C. Brester, M. Rönkkö, M. Kolehmainen et al. // *BioData Mining*. 2018. Vol. 11, No. 18.

12. Evolutionary Algorithms for the Design of Neural Network Classifiers for the Classification of Pain Intensity / D. Mamontov et al. // *IAPR Workshop on Multimodal Pattern Recognition of Social Signals in Human-Computer Interaction*. Springer, Cham, 2018. P. 84–100.

13. On a restart metaheuristic for real-valued multi-objective evolutionary algorithms / C. Brester et al. // *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion*. ACM, 2019. P. 197–198.

14. Zinc oxide nanorod loaded activated carbon for ultrasound assisted adsorption of safranin O: Central composite design and genetic algorithm optimization / E. Sharifpour et al. // *Applied Organometallic Chemistry*. 2018. Vol. 32, No. 2. P. e4099.

15. Penenko A. V. Newton–Kantorovich method for solving inverse problems of source identification in product–destruction models with time series data // *Siberian J. of computational mathematics*. 2019. No. 1. P. 57–79.

© Pavlenko A. A., 2019

Pavlenko Alexander Alexandrovich – Senior Lecturer; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: saaprepod@mail.ru.

Павленко Александр Александрович – старший преподаватель кафедры информационных экономических систем; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, инженерно-экономический институт. E-mail: saaprepod@mail.ru.

For citation: Pashkovskaya O. V., Brening D. V. Attribute features application in specification of regression model of apartments cost. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2019, Vol. 20, No. 4, P. 443–450. Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-443-450

Для цитирования: Пашковская О. В., Бренинг Д. В. Использование атрибутивных признаков при спецификации регрессионной модели стоимости квартир // Сибирский журнал науки и технологий. 2019. Т. 20, № 4. С. 443–450. Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-443-450

ATTRIBUTE FEATURES APPLICATION IN SPECIFICATION OF REGRESSION MODEL OF APARTMENTS COST

O. V. Pashkovskaya*, D. V. Brening

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

In the study of statistical data with a pronounced endogenous variable, it is necessary to identify factors (explanatory variables) that have a strong impact on the result. In this, factors can be both quantitative and attributive. To assess influence of numerical features, regression analysis methods can be used. Influence of attributive features is not taken into account. However, often these are they who make the decisive contribution to variation of the result. It is necessary to develop methods for analyzing influence of attributive features and accounting for these features in regression models.

On the example of sets of apartments proposed for sale in the city of Krasnoyarsk, a new method is used to assess influence of attributive features on the quantitative using ranking them in accordance with their influence on the endogenous variable. Method of fictitious variables is used to analyze the attribute features. Each attribute with m values is assigned $(m-1)$ dummy variables and a regression model is constructed. Influence of exogenous variables can be expressed using standardized regression coefficients. In this case, influence of attributes can be estimated by cumulative correlation coefficient calculated on the basis of a regression model with fictitious variables.

For further research, set is proposed to rank, assigning each element a "rank" – value of a standardized coefficient which reflects closeness of the relationship with the endogenous variable. Thus, all features have a numerical value. A standardized regression model is constructed.

Proposed approach can be used in the analysis of statistical aggregates, units of which are characterized by quantitative and attributive features.

Keywords: attributive features (qualitative variables), ranking of variables, correlation, standardized multiple regression model.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АТРИБУТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ ПРИ СПЕЦИФИКАЦИИ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ СТОИМОСТИ КВАРТИР

О. В. Пашковская*, Д. В. Бренинг

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

При изучении статистических совокупностей с явно выраженной эндогенной переменной, необходимо выявить факторные признаки, которые оказывают сильное влияние на результат. При этом факторные признаки могут быть, как количественными, так и атрибутивными. Для оценки влияния числовых признаков можно использовать методы регрессионного анализа. Влияние атрибутивных признаков не учитывается. Однако часто именно они вносят решающий вклад в вариацию результата. Необходимо разработать методы анализа влияния атрибутивных признаков и учета этих признаков в регрессионных моделях.

На примере совокупности квартир, предлагаемых к продаже в г. Красноярске, применен новый метод оценки влияния атрибутивных признаков на количественные с использованием ранжирования их в соответствии с их влиянием на эндогенную переменную. Для анализа атрибутивного признака используется метод фиктивных переменных. Каждому атрибуту, имеющему t значений, ставится в соответствие $t-1$ фиктивная переменная, строится регрессионная модель. Силу влияния экзогенных переменных можно выразить с помощью стандартизированных коэффициентов регрессии. В этом случае влияние атрибутов можно оценить

совокупным коэффициентом корреляции, вычисленным на основе регрессионной модели с фиктивными переменными.

Для дальнейшего исследования совокупность предлагается ранжировать, присваивая каждому элементу «ранг» – значение стандартизированного коэффициента, который отражает тесноту связи с эндогенной переменной. Таким образом, все признаки имеют числовое значение. Построены стандартизированные регрессионные модели.

Предлагаемый подход можно использовать при анализе статистических совокупностей, единицы которых характеризуются количественными и атрибутивными признаками.

Ключевые слова: атрибутивные признаки, ранжирование переменных, корреляция, стандартизированная модель множественной регрессии.

Introduction. To assess influence of factor variables on an endogenous variable, various econometric tools are used [1–14]. For example, in the work, published earlier [1], cost of an apartment in aggregate of apartments offered for sale in the housing market in the city of Krasnoyarsk in 2017, a regression model is being constructed, in which quantitative explanatory variables (total area, residential area and others) are used. As a result, some characteristics were obtained, according to which the degree of influence of any factor [1–14] was estimated. When studying the aggregate of apartments, offered for sale on the primary housing market in the city of Krasnoyarsk in 2017 [15], it was revealed that a strong influence on the price of an apartment, in addition to quantitative, such characteristics as total area of the apartment, qualitative variables: district of the city, in which the house is located and material from which this house is built, also exert influence.

If the statistical analysis of numerical features does not cause any difficulties, but when dealing with qualitative variable, various difficulties arise: meaning of attribute is represented by the word - attribute, data needs ranking, substituting each meaning by rank. If, when ranking, values are replaced simply by serial numbers, then the numerical value will distort influence on the resultant attribute. For example, when ranking on the basis of “district”, apartments in Akademgorodok are given rank 12, and apartments in Pokrovka are ranked 6. It turns out that apartments in the same region are twice “bigger” than in the other. The question arises, why exactly twice, and is it really “bigger” or is it just an unconfirmed guess of the researcher?

For the studied aggregate [5], it is proposed to apply a new method for assessing influence of qualitative variable on the endogenous variable. We distinguish two attribute signs: wall materials and region in which the house is built. We will develop this method for a set of one-room apartments, and then test it on a set of 2, 3, 4-room apartments.

Method of fictitious variables. When studying influence of attributive features, method of fictitious variables will be used.

Let us evaluate influence of the district (z), in which the house is built, on formation of the price of apartment (y) (structure of the studied phenomenon is shown in fig. 1).

To account for the qualitative variable (z), we introduce twelve fictitious variables z1, z2, ... z12 into the regression model. Based on available sample of one-room apartments (volume of 765 elements), we calculate esti-

mates of parameters of regression equation. Regression equation will be built in a standardized form:

$$\hat{t}_y = -0.01t_{z_1} + 0.25t_{z_2} - 0.08t_{z_3} - 0.01t_{z_4} - 0.05t_{z_5} - 0.30t_{z_6} - 0.18t_{z_7} + 0.04t_{z_8} - 0.14t_{z_9} - 0.44t_{z_{10}} - 0.04t_{z_{11}} + 0.09t_{z_{12}} + 0.60t_x \quad (1)$$

where t_y is the price of apartment (standardized variable

corresponding to the value of the apartment), $t_y = \frac{y - \bar{y}}{s_y}$,

$t_{z_1}, t_{z_2}, \dots, t_{z_{12}}$ standardized fictitious variables, corresponding to attributive feature “district”, t_x – total area (standardized variable); for evaluating each parameter, the observed value of t-statistics is given below.

In equation (1) adjusted coefficient of determination was 82.6 %, what indicates high quality and statistical significance of constructed equation.

To assess influence of qualitative variable (z) – “district”, basing on the constructed correlation matrix, we calculate total correlation coefficient:

$$r_{y|z_1 z_2 \dots z_{12}} = \beta_1 r_{yz_1} + \dots + \beta_{12} r_{yz_{12}} = (-0.012) \cdot (-0.029) + \dots + 0.092 \cdot 0.268 = 0.404.$$

Share of influence of quantitative feature in the explained variation was 51.2 %, and of qualitative variable – 48.7 %.

Next, we evaluate influence of material of the house walls (u) on formation of apartment price (y) (structure of the phenomenon is shown in fig. 2).

To account for the qualitative variable (u), we introduce two fictitious variables u_1, u_2 into the regression model. Let's build a standardized regression model:

$$\hat{t}_y = -0.11t_{u_1} + 0.05t_{u_2} + 0.71t_x \quad (2)$$

For evaluation influence of attribute (u) – “wall material”, based on constructed correlation matrix

$$Q = \begin{pmatrix} 1 & -0.088 & 0.174 & 0.709 \\ -0.088 & 1 & -0.198 & 0.045 \\ 0.174 & -0.198 & 1 & 0.145 \\ 0.709 & 0.045 & 0.145 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{let's calculate}$$

total correlation coefficient:

$$r_{y|u_1 u_2} = \beta_1 r_{yu_1} + \beta_2 r_{yu_2} = (-0.11) \cdot (-0.088) + (0.05) \cdot (0.174) = 0.018.$$

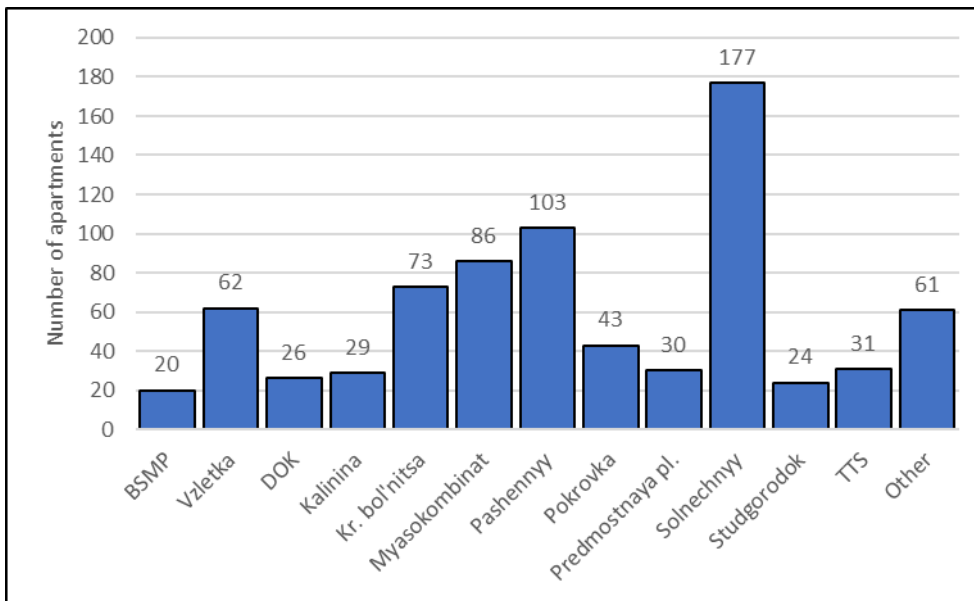


Fig. 1. Distribution of offered for sale one-room apartments by district of the city Krasnoyarsk, 2017 year

Рис. 1. Распределение предлагаемых к продаже однокомнатных квартир по районам, г. Красноярск, 2017 г.

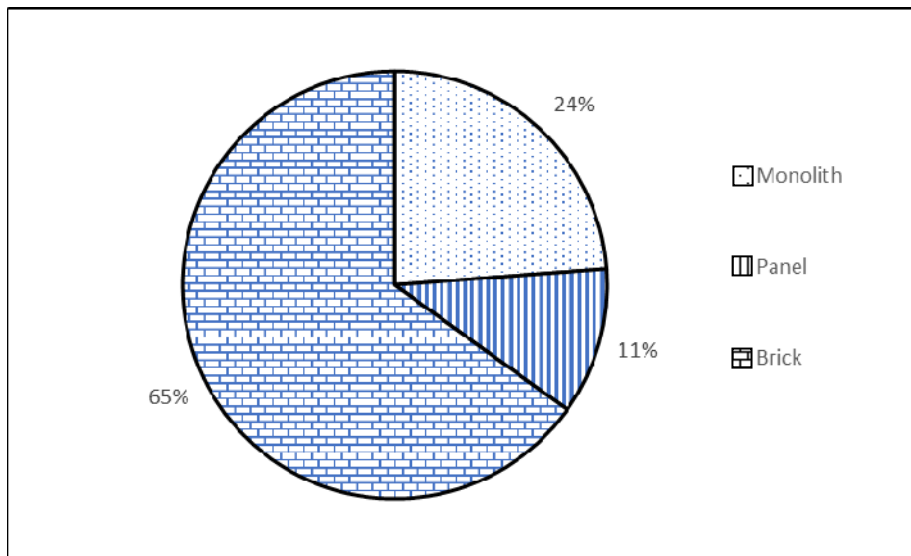


Fig. 2. Distribution of offered for sale one-room apartments by wall material, Krasnoyarsk, 2017 year

Рис. 2. Распределение предлагаемых к продаже однокомнатных квартир по материалу стен, г. Красноярск, 2017 г.

Ranking of aggregate. In the initial population, we replace values of attribute features with corresponding standardized regression coefficients, thus assigning each element a “rank”.

Now, in aggregate under consideration, all the features are quantitative. We get the following regression equation:

$$\hat{t}_y = \frac{0.63}{39.92} t_x + \frac{0.09}{5.93} t_u + \frac{0.55}{34.95} t_z. \quad (3)$$

Equation (3) by 81.6 % explains change in the price of apartments (adjusted coefficient of determination is 0.815) and with probability of 99 % is statistically significant, standard mistake is $S = 0.43$.

Approbation. In analogy, we analyze aggregate of two-room apartments (547 units of observation). In this aggregate, average apartment area is 55.13 square meters. m, average price of 1 square. m – 48.41 thousand rubles,

average cost of an apartment – 2668.93 thousand rubles. Structure of aggregation is shown in fig. 3–4.

In this population, there is a very strong influence of qualitative variable – part of influence of the qualitative variable in the overall determination coefficient is – 49.12 %. The resulting equation is:

$$\hat{t}_y = 0.58t_x - 0.02t_u + 0.57t_z.$$

30.47 -1.24 29.31

Statistically significant with probability of 99 % (adjusted coefficient of determination is equal to 0.818).

Next, we analyze sample of three-room apartments (200 units of observation). In this aggregate, average apartment area is 76.62 square meters, average price of 1 square. m – 51.05 thousand rubles, average cost of an apartment is – 3910.94 thousand rubles. The structure of aggregate is shown in fig. 5, 6.

Replacing attribute feature values with standardized coefficients

№	Cost of apartment, thousand rubles	Area of apartment, apt. m	Wall material		District	
			Attributes	Rank	Attributes	Rank
1	1863	48.27	Monolith	-0.11	Myasokombinat	-0.302
2	1262	31.77	Monolith	-0.11	Myasokombinat	-0.302
3	1010	26.01	Monolith	-0.11	Myasokombinat	-0.302
4	1010	26.01	Monolith	-0.11	Myasokombinat	-0.302
5	1646	42.20	Monolith	-0.11	Myasokombinat	-0.302
6	1646	42.20	Monolith	-0.11	Myasokombinat	-0.302
7	1545	42.70	Monolith	-0.11	Solnechnyy	-0.435
...
687	1677	36.11	Brick	0.00	Solnechnyy	-0.435
688	1531	37.91	Brick	0.00	Myasokombinat	-0.302
689	2315	42.09	Panel	0.05	Innokentyevskiy	0.000
...
763	3162	51.00	Brick	0.00		0.242
764	1100	17.60	Brick	0.00	BSMP	-0.012
765	3162	51.00	Brick	0.00	Vzletka	0.242

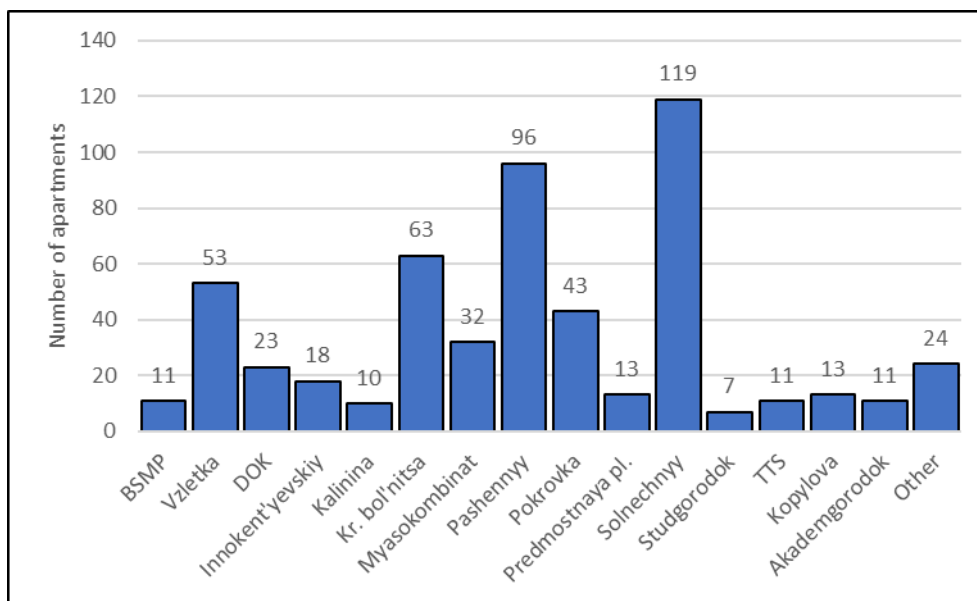


Fig. 3. Distribution of offered for sale two-room apartments by district of the city Krasnoyarsk, 2017 year

Рис. 3. Распределение предлагаемых к продаже двухкомнатных квартир по районам, г. Красноярск, 2017 г.

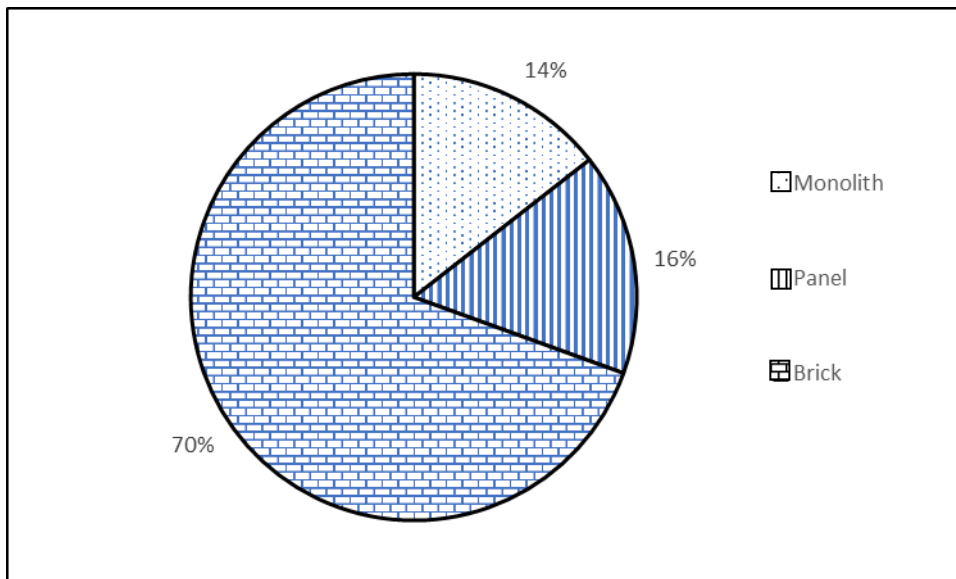


Fig. 4. Distribution of offered for sale two-room apartments by wall material, Krasnoyarsk, 2017 year
 Рис. 4. Распределение предлагаемых к продаже двухкомнатных квартир по материалу стен, г. Красноярск, 2017 г.

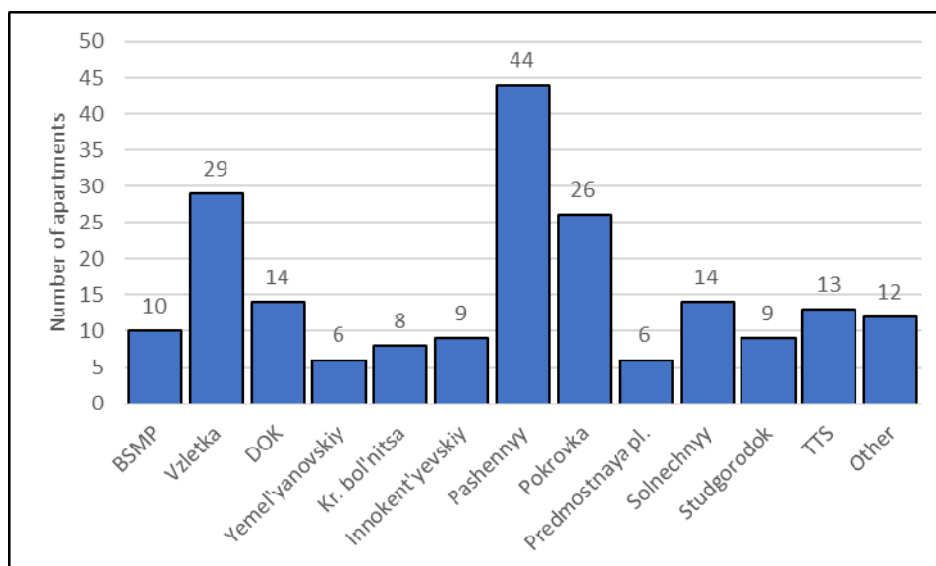


Fig. 5. Distribution of offered for sale three-room apartments by district of the city Krasnoyarsk, 2017 year
 Рис. 5. Распределение предлагаемых к продаже трехкомнатных квартир по районам, г. Красноярск, 2017 г.

Based on the available quantitative characteristics (y – is price of apartment, thousand rubles; x_1 is the total area, sq. m; x_2 – is living area, sq. m; x_3 is the kitchen area, sq. m) we construct a regression model in a standardized form:

$$\hat{t}_y = 0.78t_{x_1} + 0.06t_{x_2} + 0.05t_{x_3}.$$

12.19
1.28
0.86

For these models: adjusted coefficient of determination is 71.4 % and regression equation is statistically significant with a probability of 99 %. Low values

of t -statistics indicate that estimates of regression parameters are not statistically significant, and high values of correlation coefficients between factors ($r_{x_1x_2} = 0.549$; $r_{x_1x_3} = 0.648$) signal about presence of multicollinearity in the model. Let's try to improve quality of the model by adding attributive features and excluding factors (x_2 – living area, sq. m; x_3 – kitchen area, sq. m) closely associated with the sign x_1 – total area, sq. m

Dealing with qualitative variables wall material (u) and district (z) and quantitative feature total area (x) and

using method, presented in this article earlier, we obtain standardized equation:

$$\hat{t}_y = 0.68t_x + 0.01t_u + 0.42t_z$$

$\begin{matrix} 24.31 & & & \\ & 0.39 & & \\ & & 14.31 & \end{matrix}$

Note, that correlation matrix does not show close relationship between factors: $r_{xu} = 0.272$; $r_{xz} = 0.379$; $r_{zu} = 0.390$, therefore, there is no need to eliminate multicollinearity.

Share of influence of attribute feature in the overall coefficient of determination is 33.54 %. Such equation is

statistically significant with probability of 99 % and adjusted R -square is 0.868.

Finally, we analyze aggregate of four-room apartments (83 units of observation).

In this aggregate, average apartment area is 107.82 square meters. m, average price of 1 square. m – 52.79 thousand rubles, average cost of an apartment – 5692.53 thousand rubles. The structure of population is shown in fig. 7, 8. Aggregate is heterogeneous (coefficient of variation is 41.2 %), apartments in brick houses predominate.

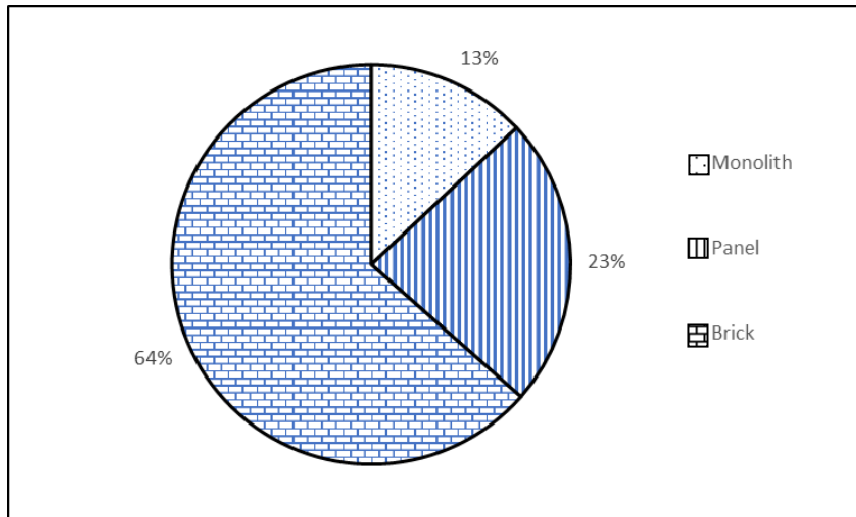


Fig. 6. Distribution of offered for sale three-room apartments by wall material, Krasnoyarsk, 2017 year

Рис. 6. Распределение предлагаемых к продаже трехкомнатных квартир по материалу стен, г. Красноярск, 2017 г.

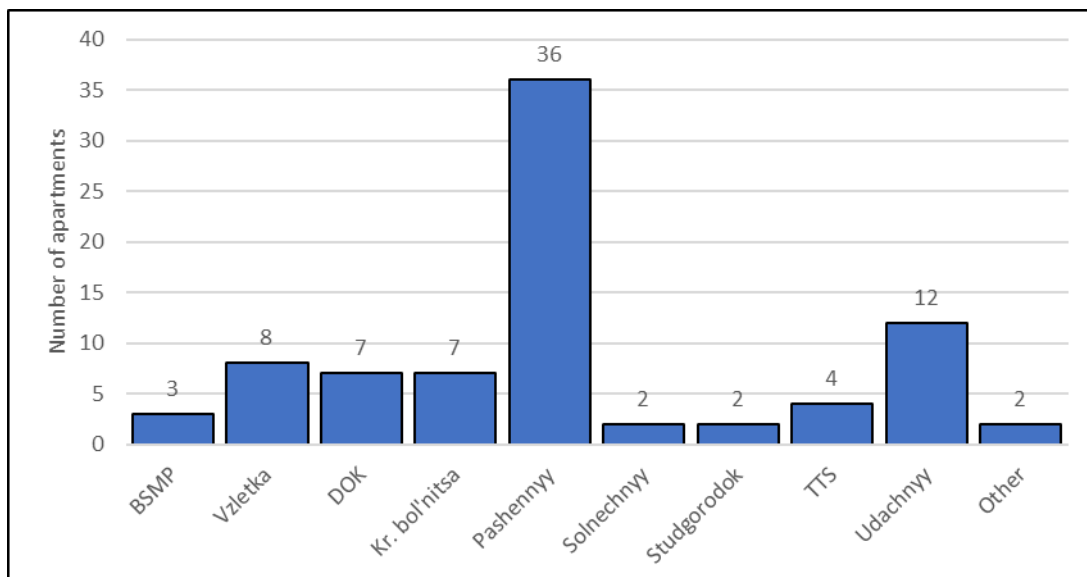


Fig. 7. Distribution of offered for sale four-room apartments by district of the city Krasnoyarsk, 2017 year

Рис. 7. Распределение предлагаемых к продаже четырехкомнатных квартир по районам, г. Красноярск, 2017 г.

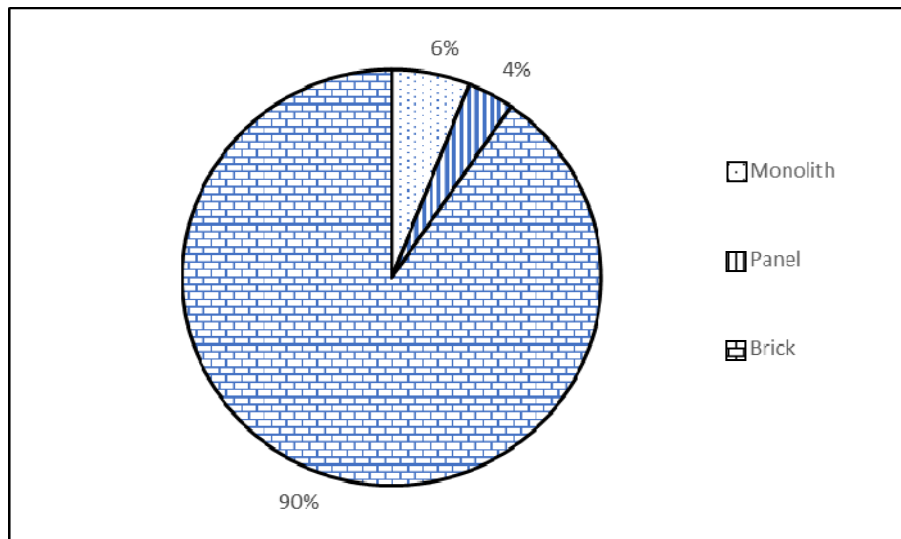


Fig. 8. Distribution of offered for sale four-room apartments by wall material, Krasnoyarsk, 2017 year

Рис. 8. Распределение предлагаемых к продаже четырехкомнатных квартир по материалу стен, г. Красноярск, 2017 г.

In a model containing only quantitative attributes:

$$\hat{t}_y = 1.11t_{x_1} - 0.17t_{x_2},$$

18.11 -2.74

adjusted coefficient of determination is 0.930 and regression equation is statistically significant with a probability of 99 %.

Dealing with attributive features, we obtain equation

$$\hat{t}_y = 0.96t_x + 0.04t_u + 0.001t_z.$$

29.13 1.38 0.02

Conclusion. Thus, the proposed method allows to analyze statistical data, elements of which are characterized by both numerical and attribute features (qualitative variable). This significantly improves quality of models and takes into account large amount of factors. This method can be easily applied to arbitrary aggregates.

References

- 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]. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii*. 2018, Vol. 19, No. 4, P. 581–588 (In Russ.).
- Senashov S. I., Yuferova N. Yu., Vaytekunene E. L. *Ekonomicheskoe modelirovanie stoimosti zhil'ya v Krasnoyarske* [Econometric modelling of residential property cost in Krasnoyarsk]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2015, 178 p. (In Russ.).
- Pashkovskaya O. V., Senashov S. I., Savostyanova I. L., Yuferova N. Yu. [Modeling the cost of housing on the secondary real estate market in the city of Krasnoyarsk in 2016]. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii*. 2017, No. 4 (18), P. 788–796 (In Russ.).
- Senashov S. I. et al. [Actual modeling of real estate in Krasnoyarsk]. *Vestnik SibGAU*. 2013, No. 2 (48), P. 86–91 (In Russ.).
- Senashov S. I., Yuferova N. Yu., Groshak E. V. *Modelirovaniye stoimosti zhil'ya v g. Krasnoyarske* [Simulation of the cost of residential property in the city of Krasnoyarsk]. Krasnoyarsk, SibGTU Publ., 2007, 204 p.
- 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.).
- 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.).
- 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.).
- 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.).
- 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.).
- Surnina E. V., Senashov S. I. [The use of GIS technology for estimation of cost of apartments]. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики*. 2010, Vol. 1, No. 6, P. 444–445 (In Russ.).
- Senashov S. I., Savostyanova L. I. [Econometric modeling of the cost of housing]. *Lesnoy i khimicheskij kompleksy – problemy i resheniya*. 2016, Vol. 2, P. 235–236 (In Russ.).
- 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.).

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

15. Brening D. V., Savostyanova I. L., Kvartiry Krasnoyarska 2017. Rynok pervichnogo zhil'ya [Flats of Krasnoyarsk 2017. Primary real estate market]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh № 20186621065.

Библиографические ссылки

1. Математическое моделирование стоимости вторичного жилья в городе Красноярске в 2017 г. / Д. В. Бренинг, О. В. Пашковская, С. И. Сенашов, И. Л. Савостьянова // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. № 4 (19). С. 581–588.

2. Сенашов С. И., Юферова Н. Ю., Вайтекунене Е. Л. Эконометрическое моделирование стоимости жилья в Красноярске. Красноярск : Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т., 2015. 178 с.

3. Моделирование стоимости жилья на вторичном рынке недвижимости в г. Красноярске в 2016 г. / О. В. Пашковская, С. И. Сенашов, И. Л. Савостьянова, Н. Ю. Юферова // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. № 4 (18). С. 788–796.

4. Актуальное моделирование недвижимости в Красноярске / С. И. Сенашов и др. // Вестник СибГАУ. 2013. № 2 (48). С. 86–91.

5. Сенашов С. И., Юферова Н. Ю., Грошак Е. В. Моделирование стоимости жилья в г. Красноярске : монография / СибГТУ. Красноярск, 2007. 204 с.

6. 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.

7. Cost estimation of information system of apartments at secondary housing markets as a management

investment tool / С. И. Сенашов и др. // Вестник СибГАУ. 2009. № 5(26). Р. 154–157.

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. 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.

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

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. Квартиры Красноярска 2017. Рынок первичного жилья: свид. 20186621065 / Д. В. Бренинг, И. Л. Савостьянова и др. ; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО СибГУ им. М.Ф. Решетнева (RU) №20186621065. Дата регистр. 12.07.2018. Реестр баз данных. 1 с.

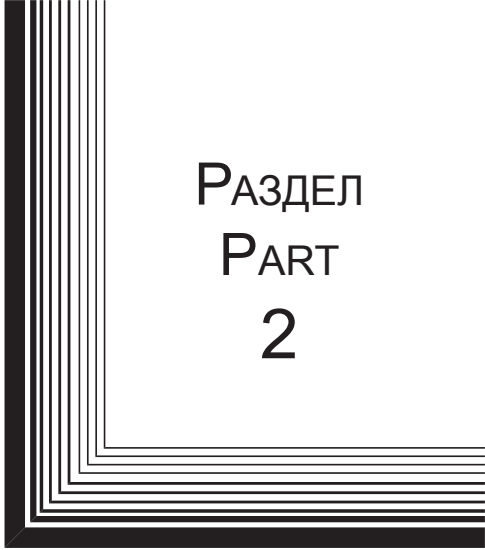
© Pashkovskaya O. V., Brening D. V., 2019

Pashkovskaya Olga Vladimirovna – Cand. Sc., Docent, Department of Information Economic Systems; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: pashkovskaya@sibsau.ru.


Brening Darya Vladimirovna – student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: brening98@gmail.com.

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@sibsau.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.



РАЗДЕЛ
PART
2



АВИАЦИОННАЯ
И РАКЕТНО-
КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

AVIATION
AND SPACECRAFT
ENGINEERING



UDC 656.7.076

Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-452-457

For citation: Akzigitov A. R., Pisarev N. S., Statsenko N. I., Neverov U. A., Akzigitov R. A. Information-measuring system of pyrometric type for small-sized unmanned aircraft. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2019, Vol. 20, No. 4, P. 452–457. Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-452-457

Для цитирования: Акзигитов А. Р., Писарев Н. С., Стаценко Н. И., Неверов Ю. А., Акзигитов Р. А. Информационно-измерительная система пирометрического типа для малоразмерного беспилотного летательного аппарата // Сибирский журнал науки и технологий. 2019. Т. 20, № 4. С. 452–457. Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-452-457

INFORMATION-MEASURING SYSTEM OF PYROMETRIC TYPE FOR SMALL-SIZED UNMANNED AIRCRAFT

A. R. Akzigitov*, N. S. Pisarev, N. I. Statsenko, U. A. Neverov, R. A. Akzigitov

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

A new trend of science and technology is now rapidly developing both in Russia and abroad – the development of miniature unmanned aerial vehicles.

The key system of on-board control equipment (avionics) of an unmanned aerial vehicle (UAV) is the orientation system for determining UAV attitude relative to reference system. In small-size UAV, we can meet the application of strapdown attitude reference systems, magnetometric, pyrometric, video systems, etc.

Rapid development of mini- and micro-UAVs requires the development of information-measuring systems (operating on different physical principles) in order to determine UAV attitude parameters in flight. With UAV mass and wingspan reduction, there are growing requirements for these systems, concerning the accuracy of positioning parameters and more compact dimensions.

Manufacturing of most information-measuring and control systems of manned aircraft and heavy UAVs rely on traditionally used gyroscopes and accelerometers. They are complex fine-mechanics instruments of considerable power consumption, rather large size, weight and high cost.

A significant improvement of the accuracy in UAV angular coordinates determination is achieved by integrating orientation systems of various types. The use of GPS / GLONASS signals also improves the accuracy and reliability of determining UAV angular coordinates and supplies the additional function of measuring its geographical coordinates.

Keywords: information-measuring system, unmanned aerial vehicle, pyrometric sensor.

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ПИРОМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА ДЛЯ МАЛОРАЗМЕРНОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

А. Р. Акзигитов*, Н. С. Писарев, Н. И. Стаценко, Ю. А. Неверов, Р. А. Акзигитов

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

В настоящее время в России, как и за рубежом, стремительно развивается новое направление науки и техники – разработка миниатюрных беспилотных летательных аппаратов (МБПЛА).

Ключевой системой бортовой аппаратуры управления (авионики) БПЛА является система ориентации для определения углового положения БПЛА относительно опорной системы координат. В МБПЛА могут применяться бесплатформенные системы ориентации, магнитометрические, видеосистемы, пирометрические и др.

Стремительно развивающееся направление мини- и микро-БПЛА требует разработки информационно-измерительных систем, необходимых для определения параметров ориентации БПЛА в пространстве, построенных на различных физических принципах. Вместе с уменьшением массы и размаха крыльев БПЛА, возрастают требования к таким системам по точности определения параметров и минимизации габаритов.

В настоящее время большинство информационно-измерительных и управляющих систем пилотируемых самолётов и тяжёлых БПЛА строятся на базе гироскопов и акселерометров традиционного исполнения. Они представляют собой сложные приборы точной механики, обладающие значительными энергопотреблением, габаритами, массой и высокой стоимостью.

Существенное улучшение точности определения угловых координат БПЛА достигается комплексированием систем ориентации различных типов. Использование сигналов систем GPS/ГЛОНАСС также повышает точность и надёжность определения угловых координат БПЛА и добавляет функцию определения географических координат его положения.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, беспилотный летательный аппарат, пирометрический датчик.

Introduction. The proposed model relates to devices measuring aircraft (AC) attitude, and can be used as a device for orientation and stabilizing of small-size unmanned aerial vehicles.

There is a free-running orientation system that supplies the angle values of a moving object successive revolutions, known as Krylov angles, to be taken as orientation parameters. It consists of three angular velocity sensors, the sensitivity axes of which are normal to each other, and the angle calculators, the main elements of which are angular velocity calculators for Krylov angles, plus integrating and summing devices [1–3].

The disadvantage of the free-running orientation system is time-dependent errors in determining the object's

attitude, due to the presence of integrating links in the attitude rate sensor.

Pyrometric vertical. The closest analogue is the pyrometric vertical as part of the Co-Pilot CPD4 (fig. 1) model aircraft autopilot designed by FMA Inc (USA, Maryland).

This vertical consists of four pyrometric sensors (pyrometers) located horizontally on the printed board in the aircraft plane [2–5]. The principle of attitude determination is based on measuring the difference in infrared (thermal) radiation from the earth surface and from the sky (fig. 2). Since the earth is always warmer, there is a certain gradient distributed vertically from the zenith to the nadir.



Fig. 1. Co-Pilot CPD4

Рис. 1. Co-Pilot CPD4

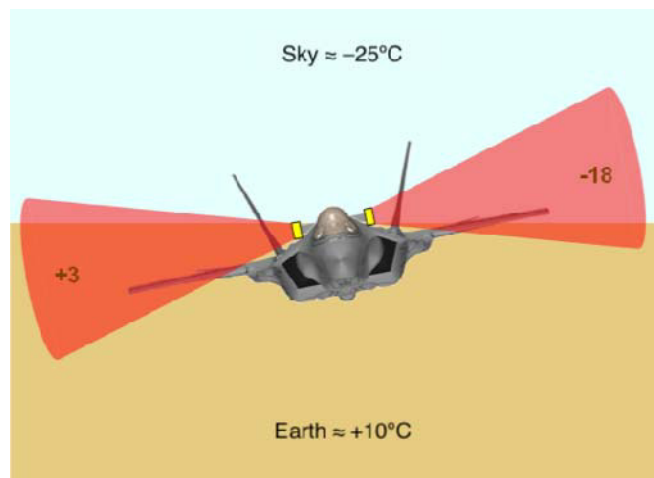


Fig. 2. Gradient between sky and earth

Рис. 2. Градиент между небом и землей

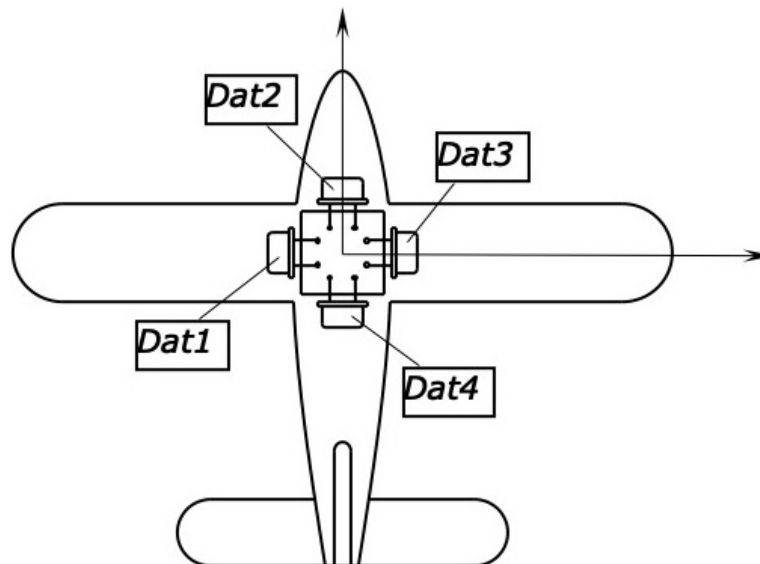


Fig. 3. Pyrometric sensors location

Рис. 3. Расположение пирометрических датчиков

Measuring the temperature with four perpendicular pyrometers located along the axes of symmetry of the aircraft, it is possible to determine bank and pitch angles without accumulating errors due to the absence of integrating links [6–9].

The known pyrometric vertical has the drawback of inability to operate in the absence of visible horizon (when flying in deep gorges, tunnels, along city streets) and with uneven thermal pattern on the opposite sides of the aircraft (for example, when there is a forest fire to the right and a cold sea to the left) [10; 11]. In the first case, the pyrometric vertical will not be able to function at all; the second case implies a significant error in determining bank and pitch angles (fig. 3).

Technical objective. The technical objective of the proposed device is to expand the capabilities of the pyrometric vertical by adding the function of controlling the accuracy of angles calculated by that pyrometric vertical and of bank and pitch angle calculation in the absence of visible horizon or in conditions of uneven thermal pattern [12–14].

The technical problem is solved by additional installation into the pyrometric vertical (containing four pyrometers on a printed board set perpendicularly in the same plane), a biaxial or three-axis unwedging angular velocity sensor independent of the pyrometers, and with the sensitivity axis parallel to the symmetry axes of the aircraft. The angular velocity sensor itself is located in the aircraft center of mass, and has the function of controlling the accuracy of bank and pitch angles. The pyrometers' readings are taken to calculate only dryness; the calculation of bank and pitch angles is also performed, but only by indications of the angular velocity sensor within a limited period (when the bank and pitch angles supplied by pyrometers are considered incorrect). In conditions unfavorable for the pyrometric vertical, it becomes possible to instantly switch the task of attitude calculation from the pyrometric vertical to the angular velocity sensor

(AVS), using the last correct reading of the pyrometric vertical as the initial bank and pitch angle value, and also to detect unfavorable conditions according to the AVS readings.

The utility model is illustrated by drawings, where fig. 4 shows a configuration of the pyrometric vertical together with non-serviceable AVS. The proposed device contains a printed board 1, on which four pyrometers 2 are perpendicular to each other and in the same plane, located in the same plane (the printed board 1 is installed in the aircraft so that the direction of pyrometers' sensitivity axes is parallel to the aircraft axes of symmetry), and two- or three-axis AVS 3 located in the aircraft center of mass with sensitivity axes parallel to the axes of symmetry of the aircraft. Pyrometers and AVS are linked with computer 4.

The introduced device performs as follows: in the standard mode, the calculation of bank and pitch angles is performed only by the readings of the pyrometers 2. In flight, the bank and pitch angles are continuously measured according to the readings of the pyrometers 2 integrated in the pyrometric vertical, and AVS 3; the recent readings are accumulated in the RAM of computer 4, and compared (fig. 4).

The execution of sensor readings' inequalities means that the readings of the pyrometric vertical and of independent AVS for the latest meterage are correlated, and the pyrometric vertical works correctly. With this ϕ , AVS pitch angle is assigned the value of the pyrometric vertical pitch angle, and the AVS bank angle – the value of the pyrometric vertical bank angle, and the reading of the AVS angular position restarts every time from the last value supplied by the pyrometric vertical. Thus, continuous monitoring of the angle accuracy supplied by the pyrometric vertical is supported. As the integration errors do not get accumulated, the reliability and multi-functional operation of the given device are perfected, as compared with the known units [15].

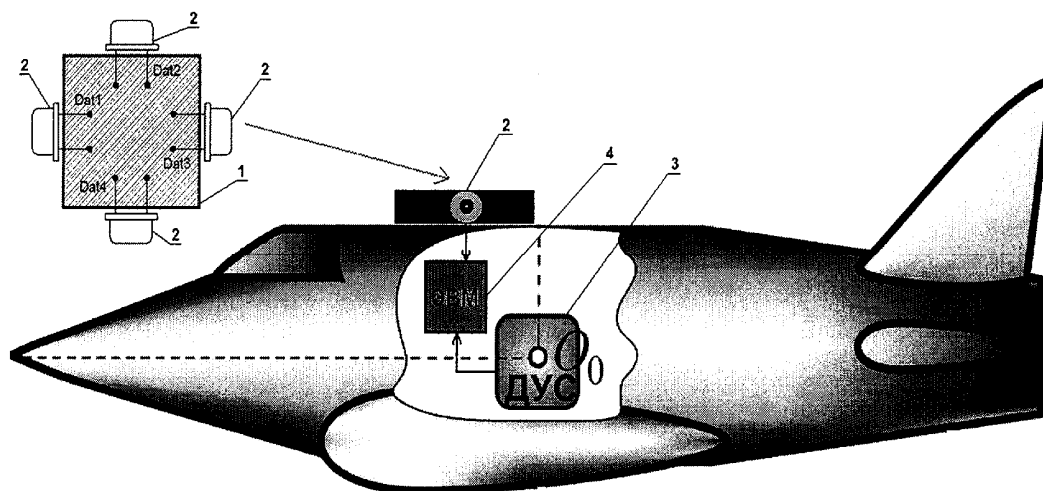


Fig. 4. Location of pyrometric sensors together with angular velocity sensor

Рис. 4. Расположение пирометрических датчиков совместно с датчиком угловой скорости

In case of the inequalities' non-execution, the assignment of angles does not occur. If the inequalities are not executed in succession of times set by the construction, the operating conditions of the pyrometric vertical are considered unfavorable, and the task of bank and pitch angle calculations is fully transferred to AVS, by integrating the readings of which the current bank and pitch angles relative to their last correct values are obtained. Switching to AVS can also be performed at the command of the aircraft pilot or UAV operator. The values of other parameters are assigned specially for the presently operated aircraft and autopilot.

The most commonly used AVS have their own reduction rate of 0.33 degrees per minute. As the aircraft configuration allows, they may be able to maintain the stabilization with bank and pitch angle error from 1 (for not self-stabilizing aerodynamic designs) to 5 degrees (for self-stabilizing aerodynamic designs). Thus, with the accumulation of errors of bank and pitch angle readings at the rate of 0.33 degrees per minute, the aircraft can go on stable using the readings of the non-serviceable AVS from 3 to 15 minutes, which allows not only to get out of the zone unfavorable for the pyrometric vertical operation, but also to carry out short-term flights in gorges, tunnels and city streets.

Returning to stable flight by the pyrometric vertical readings is possible with execution of inequalities several times running.

As the stable flight according to the pyrometric vertical readings is resumed, the values of bank and pitch angles are reset, and the attitude reading by AVS starts again as before, from the last correct value determined by the pyrometric vertical – that allows to exercise AVS control many times over without accumulation of integration errors.

Thus, the combination of device attributes appropriate for implementation allows to extend the pyrometer functions as to the vertical – in the absence of the visible horizon or in conditions of uneven thermal pattern – by intro-

ducing the control of accuracy calculated only by bank and pitch angle pyrometer readings, and calculation of the same angles only by indications of the angular velocity sensor within a limited period, when the bank and pitch angles supplied by pyrometers are considered incorrect.

Conclusion. The article analyzes the characteristics of information-measuring system of pyrometric type in application for small-sized unmanned aerial vehicle. The advantages of applying the system are evident on the background of drawbacks demonstrated by the orientation system used to determine UAV attitudes relative to the reference system.

The reviewed way of using pyrometric sensors can help to considerably improve the accuracy of UAV angular coordinates determination.

References

1. Gal'kevich A. I. *Nizkoorbital'naya kosmicheskaya sistema personal'noy sputnikovoy svyazi i peredachi dannykh* [Low-orbit space system of personal satellite communication and data transmission]. Moscow, Yulis Publ., 2013, 170 p. (In Russ.).
2. Kuzovnikov A. V., Testodov N. A., Agureev V. A. [Problems of development of low-orbit multifunction personal satellite communication system GONETS-D1M]. *Vestnik SibGAU*. 2013, Vol. 52, No. 6, P. 158–163 (In Russ.).
3. Akzigitov A. R., Statsenko N. I., Pisarev N. S., Efimova A. N., Andronov A. S. Aircraft monitoring in remote areas via the low-orbit satellite communications system IRIDIUM along with the GSM data transmission through ASC-6 telemetry terminal. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2017, Vol. 18, No. 3, P. 552–557.
4. Shevchuk D. V. [The time estimate message delivery system "GONETS" for various variants of construction of the orbital group]. *Radiotekhnika*. 2012, No. 11, P. 127–130 (In Russ.).

5. Mukhin I. E., Shevtsov A. N., Shchitov A. N. [Prospects for the use of the multifunctional personal satellite communication system MSPSC GONETS]. *Infokommunikatsii i informatsionnaya bezopasnost': sostoyanie, problemy i puti resheniy a: Materialy II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Infocommunication and information security: status, problems and ways of solution: materials of the II all-Russian scientific-practical conference]. Moscow, 2015, P. 151–155 (In Russ.).
6. Zharov A. A. [Multifunctional system for personal satellite communications “Gonets-D1M”: state and prospects of development]. *Tekhnologii i sredstva svyazi*. 2013, Vol. 2, No. 6, P. 72–78 (In Russ.).
7. Akimov A., Poleshchuk V. [Spatial accessibility and operational readiness of the low-orbital group of communication spacecraft]. *Tekhnologii i sredstva svyazi*. 2014, Vol. 2, No. 6, P. 76–81 (In Russ.).
8. Antamoshkin O. A. [Design of highly reliable real-time systems]. *Trudy MAI*. 2011, No. 45, P. 61–63 (In Russ.).
9. Marinich A. N., Pripotnyuk A. V., Ustinov Yu. M. [Monitoring of ships along the Northern sea route using satellite communication systems]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. Admirala S. O. Makarova*. 2016, No. 6, P. 184–205 (In Russ.).
10. Akimov A., Shevchuk D., Danilov D. [Efficiency of information transfer in low-orbit communication system with message transfer onboard spacecraft]. *Tekhnologii i sredstva svyazi*. 2015, No. 1, P. 69–72 (In Russ.).
11. Akimov A., Shevchuk D., Danilov D. [Efficiency of information transfer in low-orbit communication system with message transfer onboard spacecraft]. *Tekhnologii i sredstva svyazi*. 2015, No. 2, P. 72–75 (In Russ.).
12. Tsisar L. [The best satellite communications expands standards]. *Tekhnologii i sredstva svyazi*. 2008, No. 64, P. 40–42 (In Russ.).
13. Bisterfel'd O. A. [The algorithm for moving data through communication channel with the segment of satellite communications]. *Nauka i obrazovanie*. 2014, No. 10, P. 41–43 (In Russ.).
14. Kartavtsev D. V., Oblienko A. V., Oblienko M. V. [Organization of communication via satellite stations such as VSAT]. *Pozharnaya bezopasnost': problemy i perspektiv*. 2014, No. 5, P. 360–363 (In Russ.).
15. Nazarov S. N. [Improving communication efficiency of mobile subscribers through the integration of cellular and satellite communication systems]. *Vestnik Ulyanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2010, No. 52, P. 53–56 (In Russ.).
- зи «ГОНЕЦ-Д1М» // Вестник СибГАУ. 2013. Т. 52, № 6. С. 158–163.
3. Мониторинг воздушных судов в высоких широтах посредством использования спутниковой связи ИРИДИУМ на основе телеметрического терминала ASC-6 / А. Р. Акзигитов, Н. И. Стаценко, Н. С. Писарев и др. // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 3. С. 552–557.
4. Шевчук Д. В. Оценка времени доставки сообщений системой «ГОНЕЦ» при различных вариантах построения орбитальной группировки // Радиотехника. 2012. № 11. С. 127–130.
5. Мухин И. Е., Шевцов А. Н., Щитов А. Н. Перспективы применения многофункциональной системы персональной спутниковой связи МСПСС «ГОНЕЦ» // Инфокоммуникации и информационная безопасность: состояние, проблемы и пути решения : Материалы II Всеросс. науч.-практ. конф. 2015. С. 151–155.
6. Жаров А. А. Многофункциональная система персональной спутниковой связи «ГОНЕЦ-Д1М»: состояние и перспективы развития // Технологии и средства связи. 2013. № 6 (2). С. 72–78.
7. Акимов А., Поleshchuk В. Пространственная доступность и оперативная готовность низкоорбитальной группировки космических аппаратов связи // Технологии и средства связи. 2014. № 6 (2). С. 76–81.
8. Антамошкин О. А. Проектирование высоконадежных систем реального времени // Труды МАИ. 2011. № 45. С. 61–63.
9. Маринич А. Н., Припотнюк А. В., Устинов Ю. М. Мониторинг судов на трассах северного морского пути с помощью спутниковых систем связи // Вестник гос. ун-та мор. и реч. флота им. Адмирала С. О. Макарова. 2016. № 6. С. 184–205.
10. Акимов А., Шевчук Д., Данилов Д. Оперативность передачи информации в низкоорбитальной системе связи с переносом сообщений на борту космических аппаратов // Технологии и средства связи. 2015. № 1. С. 69–72.
11. Акимов А., Шевчук Д., Данилов Д. Оперативность передачи информации в низкоорбитальной системе связи с переносом сообщений на борту космических аппаратов // Технологии и средства связи. 2015. № 2. С. 72–75.
12. Цисар Л. Лучшая спутниковая связь расширяет стандарты // Технологии и средства связи. 2008. № 64. С. 40–42.
13. Бистерфельд О. А. Алгоритм транспортировки данных по каналу связи с сегментом спутниковой связи // Наука и образование. 2014. № 10. С. 41–43.
14. Картавцев Д. В., Облиенко А. В., Облиенко М. В. Организация связи с помощью станций спутниковой связи типа VSAT // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2014. № 5. С. 360–363.
15. Назаров С. Н. Повышение эффективности связи подвижных абонентов посредством интеграции сотовой и спутниковой систем связи // Вестник Ульяновского гос. техн. ун-та. 2010. № 52. С. 53–56.

Библиографические ссылки

1. Галькевич А. И. Низкоорбитальная космическая система персональной спутниковой связи и передачи данных. М. : Юлис, 2013. 168 с.
2. Кузовников А. В., Тестоедов Н. А., Агуреев В. А. Проблемы развития низкоорбитальной многофункциональной системы персональной спутниковой свя-

Akzigitov Artur Revovich – Senior professor, Lecturer; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, PNK department. E-mail: aakzigitov88@mail.ru

Pisarev Nikita Sergeevich – student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, PNK department. E-mail: nike0996@gmail.com.

Statsenko Nikolay Ivanovich – student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, PNK department. E-mail: stacenkoni@mail.ru.

Neverov Yuriy Aleksandrovich – Master student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, PNK department. E-mail: pnk-sibsau@mail.ru.

Akzigitov Revo Avhadievich – Docent; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, PNK department. E-mail: akzigitov-r@mail.ru.

Акзигитов Артур Ревович – старший преподаватель; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, кафедра ПНК. E-mail: aakzigitov88@mail.ru.

Писарев Никита Сергеевич – студент; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, кафедра ПНК. E-mail: nike0996@gmail.com.

Стаценко Николай Иванович – студент; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, кафедра ПНК. E-mail: stacenkoni@mail.ru.

Неверов Юрий Александрович – магистрант; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, кафедра ПНК. E-mail: pnk-sibsau@mail.ru.

Акзигитов Рево Авхадиевич – доцент; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, кафедра ПНК. E-mail: akzigitov-r@mail.ru.

UDC 629.78.08.018

Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-458-464

For citation: Aliseenko Y. V., Nesterishin M. V., Vorontsova E. O., Fedosov V. V., Patelev V. I. Additional screening tests at the testing technical center for ground power equipment. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2019, Vol. 20, No. 4, P. 458–464. Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-458-464

Для цитирования: Алисеенко Ю. В., Нестеришин М. В., Воронцова Е. О., Федосов В. В., Пантелеев В. И. Дополнительные отбраковочные испытания в испытательном техническом центре для наземного силового оборудования // Сибирский журнал науки и технологий. 2019. Т. 20, № 4. С. 458–464. Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-458-464

ADDITIONAL SCREENING TESTS AT THE TESTING TECHNICAL CENTER FOR GROUND POWER EQUIPMENT

Y. V. Aliseenko¹, M. V. Nesterishin¹, E. O. Vorontsova^{1,2}, V. V. Fedosov³, V. I. Pantelev⁴

¹JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”
52, Lenin St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

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

³JSC “Testing Technical Center”
20, Molodeznnaya Av., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662970, Russian Federation

⁴Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
E-mail: Jenvoroncova@gmail.com

When testing a spacecraft in a thermal vacuum chamber, special attention is paid to ensuring guaranteed continuous power supply to the spacecraft for a long time (up to several months). The de-energization of the spacecraft can lead to the failure of thermal control systems, up to the complete failure of the spacecraft worth several billion rubles. During the operation of ground power equipment, the necessary data on the intensity and types of failures in the operation of this ground power equipment were obtained, the result of which led to an increase in the test time and the risks of failure of the spacecraft at this stage.

As a result of collaborative work of JSC “Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems” and Research Institute of Automation and Electromechanics of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics on the analysis of failure statistics obtained during operation, a technical task was worked out to develop methods for increasing the uptime of ground power equipment manufactured.

One of the key requirements for the new generation of ground power equipment being manufactured is to ensure a high reliability indicator – “uptime”.

Experience in the field of additional screening tests of electro-radio parts before their installation in a spacecraft allows us to propose a method for determining the quantitative value of the decreasing coefficient of screening tests using a method for evaluating the coefficients characterizing the degree of difference between radio-electronic products that have successfully passed additional screening tests and received ones from the factory manufacturer.

As a result of the calculations of the decreasing coefficient and the mathematical calculations of the uptime, it is possible to determine the effect of the decreasing coefficient of screening tests on improving the reliability of ground power equipment.

High requirements for uptime of ground power equipment for electrical tests of the spacecraft have led to the need for additional screening tests in special testing technical centers, where the verification of indicators of the number of failures by confidence probabilities should be carried out. The introduction of additional screening tests in the technological process of ground equipment manufacturing is the next step in the methods of increasing reliability.

Keywords: spacecraft, power ground equipment, reliability, screening tests, electro-radio parts.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ОТБРАКОВОЧНЫЕ ИСПЫТАНИЯ В ИСПЫТАТЕЛЬНОМ ТЕХНИЧЕСКОМ ЦЕНТРЕ ДЛЯ НАЗЕМНОГО СИЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Ю. В. Алисеенко¹, М. В. Нестеришин¹, Е. О. Воронцова^{1,2}, В. В. Федосов³, В. И. Пантелеев⁴

¹АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»

Российская Федерация, 662970, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

³АО «Испытательный технический центр – НПО ПМ»

Российская Федерация, 662970, г. Железногорск Красноярского края, ул. Молодежная, 20

⁴Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

E-mail: Jenvoroncova@gmail.com

При испытаниях космического аппарата в термовакуумной камере особое внимание уделяется обеспечению гарантированного непрерывного энергопитания космического аппарата в течение продолжительного времени (до нескольких месяцев). Обесточивание космического аппарата может повлечь за собой отказ систем терморегулирования, вплоть до полного выхода из строя космического аппарата стоимостью несколько миллиардов рублей. В процессе эксплуатации наземного силового оборудования получены необходимые данные об интенсивности и типах отказов в работе данного наземного силового оборудования, что привело к увеличению сроков испытаний и рисков выхода из строя космического аппарата на этапе термовакуумных испытаний.

В результате совместно проведенного анализа статистики отказов наземного силового оборудования, полученных в процессе эксплуатации, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» и Научно-исследовательским институтом автоматики и электромеханики Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, было разработано техническое задание по созданию методик увеличения времени безотказной работы наземного силового оборудования.

Одним из ключевых требований к изготавливаемому наземному силовому оборудованию нового поколения является обеспечение высокого показателя надёжности – времени безотказной работы.

Опыт в области дополнительных отбраковочных испытаний электрорадиоизделий перед их установкой в космическом аппарате позволяет предложить способ определения количественного значения понижающего коэффициента отбраковочных испытаний с помощью метода оценки коэффициентов, характеризующих степень отличия электрорадиоизделий, успешно прошедших дополнительные отбраковочные испытания и полученных с завода-изготовителя.

В результате расчётов понижающего коэффициента и математических расчётов времени безотказной работы можно определить влияние понижающего коэффициента отбраковочных испытаний на повышение надёжности наземного силового оборудования.

Высокие требования по безотказной работе наземного силового оборудования для электроиспытаний космического аппарата привели к необходимости проведения дополнительных отбраковочных испытаний в специальных испытательных технических центрах, где должны проводиться проверки показателей количества отказов по доверительным вероятностям. Ввод дополнительных отбраковочных испытаний в технологический процесс изготовления наземного оборудования – это следующая ступень в методах повышения надёжности.

Ключевые слова: космический аппарат, силовое оборудование, надёжность, отбраковочные испытания, электрорадиоизделия.

Introduction. When testing a spacecraft (SC) in a thermal vacuum chamber, special attention is paid to ensuring a guaranteed continuous power supply of the spacecraft for a long time (up to several months). The de-energization of the spacecraft can lead to the failure of thermal control systems, up to the complete failure of the spacecraft worth several billion rubles. During the operation of ground power equipment (GRE), the necessary data were obtained on the intensity and types of failures in the operation of this GPE, the result of which led to an increase in the testing time and risks of spacecraft failure at the stage of thermal vacuum tests [1; 2].

As a result of collaborative work of JSC “Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems” and Research Institute of Automation and Electromechanics of Tomsk State University of Control Systems and

Radioelectronics on the analysis of failure statistics obtained during operation, a technical task was worked out to develop methods for increasing the uptime of ground power equipment manufactured.

One of the key requirements for the manufactured GPE of new-generation is to ensure a high reliability indicator – failure-free operation. Conducting continuous tests in a thermal vacuum chamber for up to 30 days depends entirely on the failure-free operation of the GPE – solar battery simulators (SBS) and storage battery simulation unit (SBSU).

In order to ensure the implementation of the technical task, the following methods for increasing reliability have been adopted [3; 4]:

– reservation of power channels of IBS with the possibility of on-line replacement of failed blocks from SPTA;

– BSU has developed eight identical independent power modules BIZR, with seven modules providing 100 % of the output power. Recovery of failed blocks from a set of spare parts in the on-line mode;

– introduction of technological vibration and thermal cycling procedures to the manufacturing process in order to identify manufacturing defects before preliminary acceptance tests;

– introduction of a screening test procedure (STP) for electro-radio products (ERP). This article discusses the method of additional screening tests (AST) as one of the methods for increasing the uptime of GPE. According to the results of the work, it is necessary to determine the effect of AST on improving the reliability of GPE.

General concepts of improving the reliability. ERP reliability during operation is characterized by a time dependence on the failure rate curve (fig. 1) [5].

This curve shows a relatively high failure rate during the early failure period (initial operating period), a relatively low and stable failure rate during the operation period, and increasing intensity during the aging period (after about 10 years of normal operation).

Early failures usually arise due to design flaws and non-compliance with manufacturing standards. Under normal operating conditions, the initial operating period lasts up to 1000 hours or about 6 weeks. The end of the initial operating period is indicated by the alignment of the failure rate curve. The failure rate during the initial operating period tends to decrease as the design of the equipment and its manufacturing technology improve.

At present, two main directions of improving the reliability of manufactured ERP are generally accepted [5]:

1) elimination of the causes of failures in the manufacturing products process by studying and improving the production process, as well as strengthening of control. Thus, the production process is affected by establishing stable feedback of information transfer in the direction of creating ideally defect-free technology;

2) identification and removal from the finished batch, products with “weak points” that could lead to failures (actual or potential) before delivering them to the consumer.

The first method is a more effective method of improving the quality and reliability of manufactured prod-

ucts. However, since failures cannot be avoided even for well-established production, a more common way to improve the quality and reliability of the manufactured batch of electronic components and integrated circuits is to carry out screening tests during the output control at the manufacturer. Moreover, the verification does not apply specifically to each product from a given batch, but to the entire batch of products [6].

It is believed that there are no accidental ERP failures, that each failure, on the one hand, has its own cause, and on the other hand, is a consequence of the application of a certain critical load to the product. Failures of GPE may be caused by “potentially unreliable” ERP, which remained undetected at the beginning of operation. The experience of using integrated circuits in spacecraft shows that the introduction of screening tests significantly increases the reliability level of GPE.

Modernization of the screening test method. For a long time, PJSC “ITC – NPO PM” and counterparties have been using ERP of the quality categories VP, OS and OSM, which underwent additional screening tests (AST), including diagnostic non-destructive testing (DNDT) and destructive physical analysis (DPA), in test technical centers (TTC) accredited by the “Voenelectronsert” systems and the Federal Space Technology Certification System. According to the data of [6; 7], these tests increase the quality of the applied ERP batches, reduce the failure rate due to the elimination of ERP with hidden defects from them, and make it possible to use a decreasing coefficient K_{TTC} , which refines the values of λ_s , the value of the operational ERP failure rate [8].

However, at present, the correction coefficient K_{TTC} is not taken into account when calculating the engineering estimate of the GPE reliability, since there is still no method for quantifying this coefficient. Thus, the task of technical justification of K_{TTC} value for use by clarifying the value of the operational failure rate remains relevant [9].

Experience in the field of AST of ERP before their installation in the SC allows us to propose a method for determining K_{TTC} using the method of evaluating the coefficients characterizing the degree of difference of ERP, which successfully passed AST and were received from the manufacturer [10].

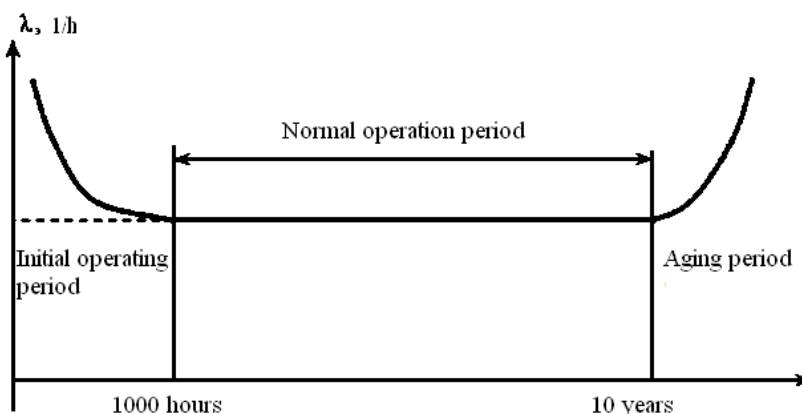


Fig. 1. Typical dependence of ERP failure rate on time

Рис. 1. Типичная зависимость интенсивности отказов ЭРИ от времени

The essence of the method lies in the fact that, based on the generally accepted function of the ERP time failure rate, the required failure-free lifecycle of ERP as part of the equipment corresponds to the ERP failure-free period provided by the basic group average failure rate and the tolerance fields of the ERP parameters according to the technical condition (TC) as shown in fig. 1 [11].

The result of the failure statistics analysis shows that during normal operation of the equipment, ERP failures are mainly parametric, i. e. failures of the type “out of tolerance range” occur. AST allows one to classify elements with narrowed parameter values compared to the tolerance fields for technical specifications. This leads to an increase in the duration of the period of stable failure rate of ERP that have passed the classification.

The validity of this approach is based on the fact that when assessing the failure rate according to the test results for failure, a complete loss of performance or departure of the parameters-criteria of validity are taken for the norms established in the technical specifications. An illustration of this approach is shown in fig. 2.

Designations of the following periods are introduced in fig. 2:

- 1) the initial operating period of ERP at the manufacturer;
- 2) the period of stable operation of ERP not subjected to AST;
- 3) the period of wear and aging of ERP not subjected to AST;
- 4) the AST period of the whole party of ERP; период ДООИ ЭРИ всей партии;
- 5) the period of stable operation of ERP subjected to AST;

6) the period of wear and aging of ERP subjected to AST.

Allowing for the fact that the test results for each type of additional test are independent events, K_{TTC} is determined by the expression:

$$K_{TTC} = \prod_1^n k_i,$$

where k_i – safety coefficient for i types of ST; n – the number of types of AST. The specific value of K_{TTC} depends on the volume of AST.

The basis of the AST for ERP of GPE is presented by the ST conducted for ERP, which are part of the spacecraft, modified to meet the requirements of the technical task of JSC “ISS”. As a result, the range and scope of tests for GPE were determined [10].

The composition of the additional tests of ERP includes up to 100 % ERP and relays for the components of the product SBSU-200LI and SBS-160/4-8. The scope of additional tests of foreign ERP, component parts of SBSU – 200LI and SBS-160/4-8 are given in tab. 1.

It must be emphasized that the coefficient k_i for tests related to the measurement of electrical parameters is complex, since it takes into account all the electrical parameters involved in the classification and is determined by the formula: $k_i = \max k_j$, where k_j is the coefficient for each AST parameter.

Thus, in accordance with tab. 1 the generalized safety factor for the parametric reliability of a particular batch of electronic components will be equal to:

$$K_{TTC} = k_{TS} \times k_D.$$

Where k_{TS} is classification according to tightened standards, k_D is drift estimation of parameters.

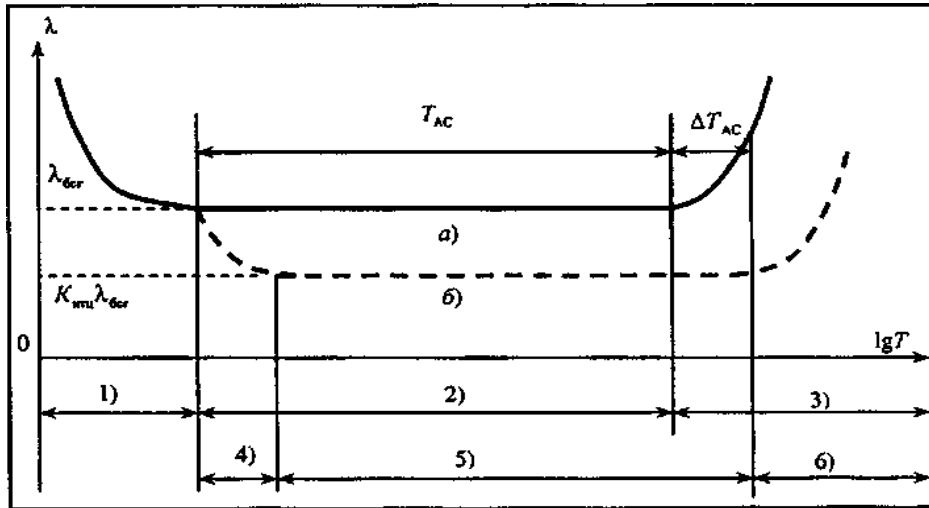


Fig. 2. Refinement of the function of the failure rate for ERP that passed ST:
 a – without ST; b – passed ST; T_{AC} – warranty period of the equipment and SC provided by the area of stable failure rate of ERP according to technical conditions; $\Delta T_{AC} - T_{AC}$ increase due to additional ST in testing technical centers

Рис. 2. Уточнение функции интенсивности отказов для ЭРИ, прошедших ОИ:
 а – без ОИ; б – прошедших ОИ; T_{AC} – гарантийный срок службы аппаратуры и КА, обеспечиваемый участком стабильной интенсивности отказов ЭРИ по техническим условиям; ΔT_{AC} – прирост T_{AC} за счёт ОИ в ИТЦ

Table 1

Scope of Additional Tests

№	Test Type	Sampling	Note
1	Serializing Elements	100 %	
2	Measurement of electrical parameters under normal conditions	100 %	with recording parameters
3	Statistical processing of measurement results, the establishment of standards for "tightening" parameters		
4	Classification according to tightened standards for electrical parameters	100 %	in accordance with established tightened standards with recording parameters
5	Burn-in testing	100 %	not less than 72 hours at 125 °C
6	Measurement of electrical parameters under normal conditions	100 %	with recording parameters
7	Statistical processing of measurement results and setting standards for parameter drift	100 %	
8	Parameter drift classification	100 %	in accordance with established standards with recording parameters

Table 2

Additional Test Results

Item	Quantity of ERP			
	Tested	Suitable	Reject	Potentially unreliable
Generators	117	115	0	2
Diodes	31787	31171	305	313
Microchips	11623	11104	115	404
Relay	1749	1663	13	73
Zener diodes	2840	2624	67	149
Thyristors	1030	842	2	186
Transistors	5505	5255	4	246

The minimum composition of additional tests of foreign ERP, component parts of SBSU-200LI and SBS-160/4-8 includes 100 % ERP:

1. Microchips, OE converter and generators.
2. Modularized secondary power supplies.
3. Semiconductors with a small housing size.
4. Semiconductor devices with a sufficient housing size for serialization [12].

Based on the results of the tests, we drew up the present act that JSC "ITC – NPO PM" carried out work on the topic "Conducting additional tests of electric radio products (ERP) intended for installation in products of SBS-160/4-8 and SBSU-200LI" in accordance with the terms of the contract concluded between JSC "ITC – NPO PM" and "NII AET TU SUR" [13; 14].

AST of ERP were carried out in accordance with the technical task for the implementation of the component of the development work.

The results of AST of ERP (the number of tested, suitable, rejected and classified as potentially unreliable – PU) intended for the assembly of SBSU-200LI and SBS-160/4-8 products are presented in tab. 2.

To bind the obtained coefficient, it is necessary to carry out a mathematical calculation of the reliability of SBS-160 – this is the probability of failure-free operation (FFO) in the ASRN-2006 program.

To calculate the operational failure rate of domestic ERP, the models given in the manual [15] are used.

The manual contains information intended for use in calculating the reliability indicators of equipment, the composition of sets of spare parts for military equipment,

and predicting the reliability of new types of ERP in accordance with the requirements of fundamental documents on standardization.

To calculate the operational failure rate of foreign ERP, the models described in the manual [16] are used.

Calculation results. Calculations show that the FFO SBS-60/4-8 is 0.94677 for 1000 hours of operation, which meets the requirements of the technical task.

Taking into account the coefficient K_{TTC} obtained in the calculations and the influence of AST on the reliability of GPE, the value of FFO of SBS-160/4-8 is 0.96599 for 1000 hours of operation.

Analysis of the calculation leads to the following conclusions:

1. Additional tests of the influence of various factors on the failure rate of a particular batch showed that screening for compliance with the technical specifications followed by the removal of low-quality products from factory batch led to a significant reduction in the likelihood of failure of calibration equipment.

2. It is possible to estimate K_{TTC} coefficients for any batches of ERP for a certain period of their manufacture (for one year) and issue recommendations for conducting tests in order to reduce their volume and increase confidence probabilities in terms of parameters.

Conclusion. High requirements for the reliability of the GPE for the spacecraft EI have led to the need for additional screening tests in special testing technical centers, where the verification of indicators of the number of failures by confidence probabilities should be carried out. These tests lead to higher prices for manufactured

products up to 40 % of the cost. Nevertheless, the introduction of additional screening tests in the manufacturing process of ground power equipment justifies the increase in cost by reducing the risks of failure of test objects. The introduction of additional screening tests into the technological process of manufacturing ground power equipment is the next step in the methods of increasing reliability [17].

References

1. Lizunov A., Tarasov V. [Methodology for accelerated thermal vacuum tests of storage batteries for a spacecraft]. *Vestnik MGTU*. 2011, No. 3, P. 43–47 (In Russ.).
2. GOST R 56469–2015. *Apparaty kosmicheskiye avtomaticheskkiye. Termobalansnyye i termovakuumnyye ispytaniya* [State Standard R 56469–2015. Space automatic devices. Thermal balance and thermal vacuum tests]. Moscow, 2017. 15 p.
3. Aliseenko Y. V., Ivanov D. V., Bubnov O. V., Panteleev V. I. [Analysis of failure statistics and increased reliability of ground power equipment manufactured by NIIAEM TUSUR]. *Materialy Nauchno tekhnicheskoy konferentsii molodykh spetsialistov "Elektronnyye i elektromekhanicheskiye sistemy i ustroystva"* [Materials of the Scientific and Technical Conference of Young Specialists "Electronic and Electromechanical Systems and Devices"]. Tomsk, 2018, p. 31–33 (In Russ.).
4. Aliseenko Y. V., Leonov D. V., Golovko V. V. [Development of a solar simulator with redundancy and longer uptime]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh "Tekhnicheskkiye nauki: fundamental'nyye i prikladnyye issledovaniya"*. [Materials of the international scientific conference of young scientists "Engineering: fundamental and applied research"]. Novosibirsk, 2016, P. 5–10 (In Russ.).
5. Fedosov V. V. *Nadezhnost' sistem upravleniya kosmicheskikh apparatov* [Reliability of the control systems of spacecraft]. Krasnoyarsk, 2017, 360 p.
6. Schwank J. R., Sexton F. W., Fleetwood D. M. Temperature effects on the radiation response of MOS devices. *IEEE Trans*, 1988, Vol. 6. P. 1432–1437.
7. Danilin N. S. *Informatsionnyye tekhnologii i sertifikatsiya elementnoy bazy novykh rossiyskikh telekommunikatsiy* [Information technology and certification of the element base of new Russian telecommunications]. Moscow, RTA GTK, 2000, P. 76–78.
8. Urlichich Y. M., Danilin N. S. *Upravleniye kachestvom kosmicheskoy radioelektronnoy apparatury v usloviyakh global'noy otkrytoy ekonomiki* [Quality management of space electronic equipment in a global open economy]. Moscow, Maks Press Publ., 2003, P. 198–199.
9. Fedosov V. V., Patraev V. E. [Improving the reliability of spacecraft electronic equipment when using electronic radio products that have undergone additional screening tests in specialized testing technical centers]. *Aviakosmicheskoye priborostroyeniye*. 2006, No. 10, P. 50–55 (In Russ.).
10. Gorlov M., Anufriev L., Stroganov A. [Screening technology tests as a means of increasing the reliability of IP batches]. *Chip News*. 2001, No. 5 (In Russ.).
11. RD V 22.32.119–89. *Metodicheskoye posobiye po vyboru i ispol'zovaniyu metodov i sredstv elektrofizicheskogo diagnostirovaniya elektroradioizdeliy* [Methodological manual on the selection and use of methods and means of electrophysical diagnosis of radio products]. 22 CNII MO RF, 1989, 210 p.
12. Integrated circuits, monolithic. ESA/SCC. Generic Specification No 9000. 1998, P. 36.
13. RD 11 0682–89. *Mikroskhemy integral'nyye. Metody nerazrushayushchego kontrolya diagnosticheskikh parametrov* [Integrated circuits. Non-destructive testing methods for diagnostic parameters]. 1990, 77 p.
14. Fedosov V. V., Orlov V. I. [The minimum required test volume of microelectronics products at the input control stage]. *Izv. Vuzov. Priborostroyeniye*. 2011, Vol. 54, No. 4, P. 56–62 (In Russ.).
15. Pritkoe S. F., Gorbacheva V. M., Borisov A. A. *Nadezhnost' ERI* [EEEs Reliability]. Moscow, 22 CNII MO RF, 2006, 641 p.
16. *Nadezhnost' ERI IP* [EEEs Reliability of foreign manufacture]. St. Petersburg, RNI Electronstandart Publ., 2006, 52 p.
17. Aliseenko Y. V., Vorontsova E. O., Pravikova A. A. [Increased reliability and feasibility study of ground power variation equipment manufactured by NIIAEM TUSUR]. *Tezisy dokladov vtoroy molodozhnoy konferentsii "Innovatsionnaya deyatel'nost' v nauke i tekhnike. Elektromekhanika, avtomatika i robototekhnika"* [Abstracts of the second youth conference "Innovation in science and technology. Electromechanics, automation and robotics"]. Istra, 2018, P. 5–7 (In Russ.).

Библиографические ссылки

1. Лизунов А., Тарасов В. Методика ускоренных термовакуумных испытаний аккумуляторных батарей для космического аппарата // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2011. № 3. С. 43–47.
2. ГОСТ Р 56469–2015. Аппараты космические автоматические. Термобалансные и термовакуумные испытания. М., 2017. 15 с.
3. Анализ статистики отказов и увеличение надежности наземного силового оборудования производства НИИАЭМ ТУСУР / Ю. В. Алисеенко, Д. В. Иванов, О. В. Бубнов, В. И. Пантелеев // Электронные и электромеханические системы и устройства : материалы науч.-техн. конф. молодых специалистов (12–13 апреля 2018, г. Томск). С. 31–33.
4. Алисеенко Ю. В., Леонов С. Н., Головкин В. В. Разработка имитатора солнечных батарей с функцией резервирования и с увеличенным временем бесперебойной работы // Технические науки: фундаментальные и прикладные исследования : материалы междунар. науч. конф. молодых ученых (2016, г. Новосибирск). С. 5–10.
5. Федосов В. В. Надежность систем управления космических аппаратов. Красноярск, 2017. 360 с.
6. Schwank J. R., Sexton F. W., Fleetwood D. M. Temperature effects on the radiation response of MOS devices // IEEE Trans. 1988. Vol. 6. P. 1432–1437.

7. Данилин Н. С. Информационные технологии и сертификация элементной базы новых российских телекоммуникаций. М. : РТА ГТК, 2000. С. 76–78.
8. Урличич Ю. М., Данилин Н. С. Управление качеством космической радиоэлектронной аппаратуры в условиях глобальной открытой экономики. М. : МАКС Пресс, 2003. С. 198–199.
9. Федосов В. В, Патраев В. Е. Повышение надежности радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов при применении электрорадиоизделий, прошедших дополнительные отбраковочные испытания в специализированных испытательных технических центрах // Авиакосмическое приборостроение. 2006. № 10. С. 50–55.
10. Горлов М., Ануфриев Л., Строгонов А. Отбраковочные технологические испытания как средство повышения надежности партий ИС // Chip News. 2001. No. 5.
11. РД В 22.32.119-89. Методическое пособие по выбору и использованию методов и средств электрофизического диагностирования электрорадиоизделий. 22 ЦНИИ МО РФ, 1989. 210 с.
12. Integrated circuits, monolithic. ESA/SCC. Generic Specification No 9000. 1998. P 36.
13. РД 11 0682–89. Микросхемы интегральные. Методы неразрушающего контроля диагностических параметров. 1990. 77 с.
14. Федосов В. В, Орлов В. И. Минимально необходимый объем испытаний изделий микроэлектроники на этапе входного контроля // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 4. С. 58–62.
15. Надёжность ЭРИ : справочник // С. Ф. Прытков, В. М. Горбачева, А. А. Борисов и др./ Науч. рук. С. Ф. Прытков. М. : 22 ЦНИИ МО РФ, 2006. 641 с.
16. Надёжность ЭРИ ИП : справочник. СПб. : Электронстандарт, 2006. 52 с.
17. Увеличение надежности и технико-экономическое обоснование вариации наземного силового оборудования производства НИИАЭМ ТУСУР / Ю. В. Алисеенко, Е. О. Воронцова, А. А. Правикова и др. // Инновационная деятельность в науке и технике. Электромеханика, автоматика и робототехника : тез. докл. второй молодёж. конф. (28 апреля 2018, г. Истра). С. 5–7.

© Aliseenko Y. V., Nesterishin M. V.,
Vorontsova E. O., Fedosov V. V.,
Panteleev V. I., 2019

Aliseenko Yuriy Vladimirovich – design engineer; JSC “Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems”. E-mail: Yurik922@iss-reshetnev.ru.

Nesterishin Michael Vladlenovich – head of Onboard Power Supply Department; JSC “Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems”. E-mail: Micky-Nest@iss-reshetnev.ru.

Vorontsova Evgeniya Olegovna – engineer; JSC “Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems”. E-mail: Jenvoroncova@gmail.com.

Fedosov Victor Vladimirovich – deputy director; Joint Stock Company “Testing Technical Center”.

Panteleev Vasilij Ivanovich – Dr. Sc., Professor, Head of Department Electrical complexes and systems; Siberian Federal University. E-mail: Vpanteleev@sfu-kras.ru.

Алисеенко Юрий Владимирович – инженер-конструктор; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: Yurik922@iss-reshetnev.ru.

Нестершин Михаил Владленович – начальник отдела бортовых систем электропитания; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: Micky-Nest@iss-reshetnev.ru.

Воронцова Евгения Олеговна – инженер; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: Jenvoroncova@gmail.com.

Федосов Виктор Владимирович – заместитель директора; АО «Испытательный технический центр – НПО ПМ».

Пантелеев Василий Иванович – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой электротехнических комплексов и систем; Сибирский федеральный университет. E-mail: Vpanteleev@sfu-kras.ru.

UDC 629.7.016.3

Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-465-476

For citation: Kolovsky I. K., Shmakov D. N. Spacecraft motion in a low circular orbit in establishing intersatellite link. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2019, Vol. 20, No. 4, P. 465–476. Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-465-476

Для цитирования: Коловский И. К., Шмаков Д. Н. Исследование движения космических аппаратов на низкой около круговой орбите при создании межспутниковой линии связи // Сибирский журнал науки и технологий. 2019. Т. 20, № 4. С. 465–476. Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-465-476

SPACECRAFT MOTION IN A LOW CIRCULAR ORBIT IN ESTABLISHING INTERSATELLITE LINK

I. K. Kolovsky*, D. N. Shmakov

JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”
52, Lenin St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
*E-mail: kolovigor@mail.ru

The article investigates the problem of inter-satellite linking in the constellation of spacecraft in a low circular orbit. A specific problem of establishing intersatellite link (IL) in that orbit – cross-pointing of the antennae – is also studied. To support cross-tracking, it is important to place spacecraft (SC) in the orbital plane so that they are constantly in the zone of mutual visibility. The line-of-sight range is analyzed both in one orbital plane and between adjacent planes. IL is treated in terms of the orbital constellation (OC) ballistic formation. Several typical modes of motion of SC with IL in adjacent planes are determined – parallel, orthogonal, oncoming. The parameter values of IL antenna pointing are also assessed. The obtained results of OC formation and antenna pointing parameters’ calculations may be relevant for establishing a modified system.

Keywords: ballistics, range, low circular orbit, orbital constellation, intersatellite link.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА НИЗКОЙ ОКОЛО КРУГОВОЙ ОРБИТЕ ПРИ СОЗДАНИИ МЕЖСПУТНИКОВОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ

И. К. Коловский*, Д. Н. Шмаков

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

В работе исследуется задача организации межспутниковой линии связи (МЛС) в космической системе, которая строится на основе орбитальной группировки (ОГ) космических аппаратов (КА) на низкой около круговой орбите. Рассматривается одна из проблем при создании МЛС на такой орбите – наведение антенны КА друг на друга. Для возможности отслеживания друг друга важно размещать КА в орбитальной плоскости так, чтобы они были постоянно в зоне взаимной видимости. Анализируется дальность прямой видимости как внутри одной орбитальной плоскости, так и в соседних плоскостях. Создание МЛС рассматривается с точки зрения баллистического построения ОГ. При организации МЛС определены несколько типов характерного движения КА в соседних плоскостях: параллельного, ортогонального, встречного. Приводятся значения параметров наведения антенны МЛС. Полученные результаты построения ОГ и вычисления параметров наведения антенны могут быть актуальны для создания модифицированной системы.

Ключевые слова: баллистика, дальность, низкая круговая орбита, орбитальная группировка, межспутниковая линия связи.

Introduction. Intersatellite links can increase the efficiency in achieving the principle objective of satellite systems – providing communications for subscribers distributed globally. Besides, operating IL helps to solve the problems of parallel control of all spacecraft in the constellation without numerous ground tracking stations [1].

There are several satellite systems which provide monitoring and data transmission, such as “Globalstar”, “Iridium”. Development of such intersatellite systems is also essential for solving various problems of data transmission, monitoring and locating moving objects. Technical solutions of these systems provide the basis of monitoring facilities development [2; 3].

The aim of IL is to provide radio exchange of subscribers not in the line of sight of the same spacecraft - that requires information exchange both between SC in the same plane and between ones in different planes. The use of IL significantly increases the efficiency of radio links [4]:

- the service area is increased by interconnection of all radio visibility zones (RVZ) of SC into an integrated RVZ of the orbital constellation;
- the load on the satellite links is reduced due to instant information exchange;
- the reliability and stability of satellite links is increased.

Establishing IL in OC of SC. For the experiment we assume that there is an OC of 24 SC in a near-circular orbit of 1500 km altitude, and from the point of view of the OC ballistic formation and SC motion, we review the ways of plotting the IL for the given satellite system, both in one plane and between adjacent planes. A similar IL configuration is already introduced in "Iridium" satellite system [5]. "Iridium" is a low-orbit system operating in circular orbits. The orbit altitude is about 700 km; the standard OC includes 66 interlinked SC [6].

When an IL are made in a circular orbit of 1500 km altitude, the optimal mutual visibility of SC in the orbital plane is achieved when the number of SC in the plane is more than or equals 6 [7].

It must be noted that for IL correct operation in one plane, orbit correction must be carried out to keep the orbital position of all SC stable, otherwise the distance between the SC can alter too much and cause operational failure.

We can determine the station-keeping zone and positioning of SC in the orbital plane for IL operation in reference to 5, 6, 7 SC. It is necessary to view the orbit configuration of SC 1 and SC 2 in more detail (fig. 1).

The symbols in fig.1 are: a – Earth radius; b – half-distance between SC 1 and SC 2; c – major semi-axis of SC orbit; $\angle\beta$ – half of the center angle between SC 1 and SC 2.

We take the basic relation of a right-angled triangle [8] to calculate $2\cdot\angle\beta$ – the limit angle of keeping SC in the line of sight

$$\begin{aligned}
 a &= 6378.16 \text{ km} - \text{Earth radius [9]}; \\
 c &= 1500 + 6378.16 = 7878,16 \text{ km} - \text{major semi-axis of SC orbit}; \\
 \sin\alpha &= a/c; \\
 \angle\alpha &= 54.056^\circ; \\
 \angle\beta &= 35.944^\circ; \\
 2\cdot\angle\beta &= 71.888^\circ. \tag{1}
 \end{aligned}$$

According to the formula (1), for a number of SC composition variants in the orbital plane, we obtain the

values of the angle between the nearest SC and of the station-keeping zone (tab. 1).

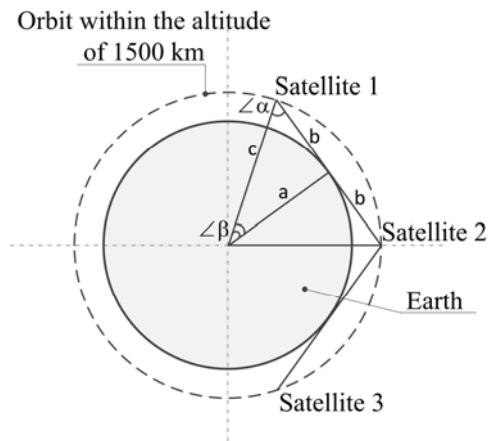


Fig. 1. IL within an orbital plane

Рис. 1. МЛС внутри орбитальной плоскости

The results in tab. 1 show that for IL at 1500 km altitude with five SC in the plane, to provide mutual visibility it is necessary to keep the SC in orbit with an accuracy of 0.5° by latitude argument, which is quite demanding technically.

Therefore, an architecture of 6 SC in the plane with ± 5° station-keeping zone relative to the SC orbital position can be applicable. In this case, the distance between two adjacent SC with an IL will depend on the accuracy of keeping the SC in the orbital positions with respect to the latitude argument. Half-distance value between adjacent SC with IL (parameter b in fig. 1) when there are 6 SC in the orbital plane will make

$$b = c\cdot\sin\beta. \tag{2}$$

In case 6 SC are evenly positioned in the plane, (the center angle between these SC is 60°) and the station-keeping accuracy is ± 5°, the expression (2) gives the 7878 km distance in the nominal position. The distance calculations for the center angle of 50° and 70° are listed in tab. 2.

We form the chosen for the experiment standard OC architecture of 24 SC for modeling and studying the ballistic parameters of IL as follows: four orbital planes of 6 SC each (tab. 3).

Absolute longitude divergence of the ascending nodes of adjacent orbital planes is 46°. The SC phase distribution is taken for the moment of SC 11 passing the ascending node of the orbit.

Fig. 2 represents 24 SC in four orbital planes and the track of every SC in flight period of a few minutes.

Table 1

Station-keeping zone for a SC with 1.500 km orbit altitude operating IL

SC number in the orbital plane	SC positioning in the plane with respect to the argument of latitude, °	Station-keeping zone, °
5	71.9	±0.5
6	60.0	±5.0
7	51.4	±9.3

Table 2

Values of distance and center angle between SC in the plane

	Distance between SC, $2 \cdot b$, km	Center angle between SC, $2 \cdot \angle \beta$, °
Minimal	6658	50
Nominal	7878	60
Maximal	9037	70

Table 3

Distribution for OC of 24 SC

Plane number	SC number	Ascending node longitude, °	Argument of latitude, °	Plane number	SC number	Ascending node longitude, °	Argument of latitude, °
1	11	0	0	3	31	92	50
	12	0	60		32	92	110
	13	0	120		33	92	170
	14	0	180		34	92	230
	15	0	240		35	92	290
	16	0	300		36	92	350
2	21	46	25	4	41	138	75
	22	46	85		42	138	135
	23	46	145		43	138	195
	24	46	205		44	138	255
	25	46	265		45	138	315
	26	46	325		46	138	15

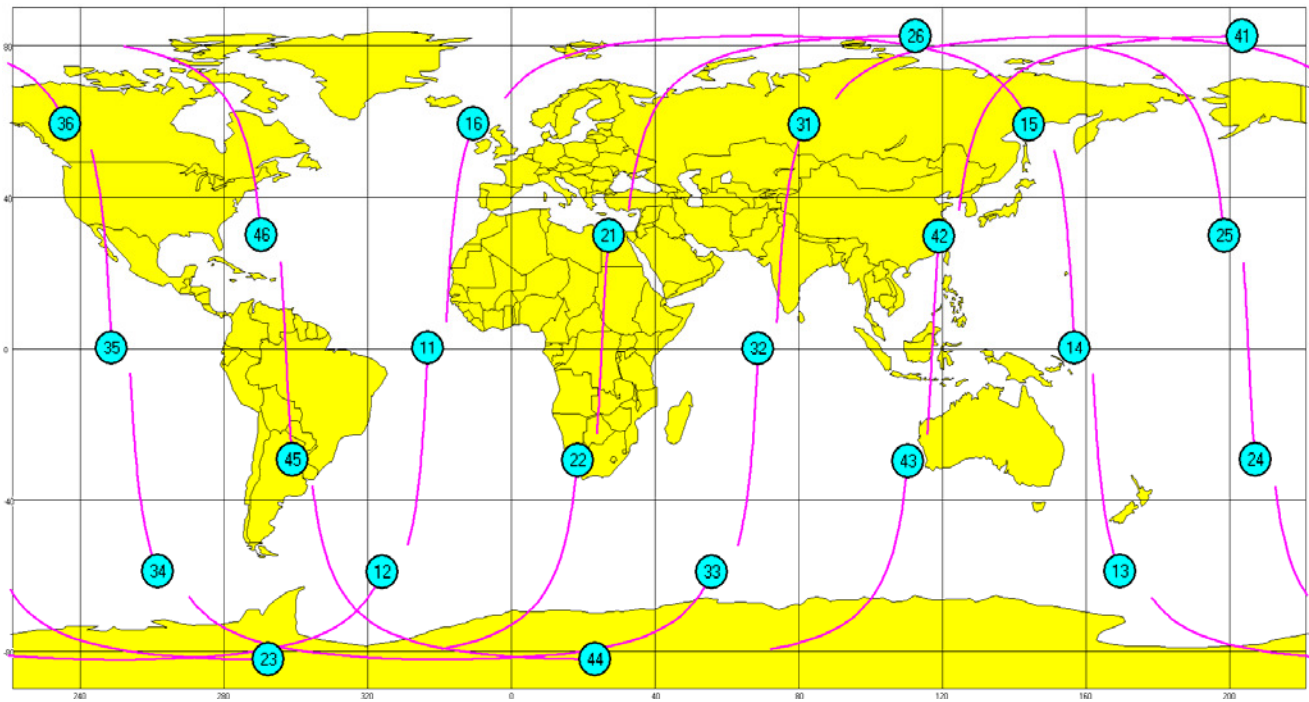


Fig. 2. Routes of 24 SC in the OC

Рис. 2. Трассы ОГ из 24-х КА

IL is a unique element of “Iridium” communication system, every SC of which is interconnected with 4 adjacent ones, 2 of them in front and in aft position in the same orbital plane, and 2 on the left and on the right in adjacent orbital planes [10].

For the experimental OC architecture of 24 SC we can outline the following IL configurations:

- Configuration 1 – IL between the SC in one orbital plane;
- Configuration 2 – IL between SC of adjacent planes № 1 and 2, № 2 and 3, № 3 and 4 (parallel motion);
- Configuration 3 – IL between SC in planes № 1 and 3, № 2 and 4 (orthogonal motion in the moment of mutual visibility);
- Configuration 4 – IL between SC in planes № 1 and 4 (cross-movement in the moment of mutual visibility).

Operating IL dictates the need of continuous communication during the SC flight. The analysis of this aspect is presented in [11] for “CubeSat” system.

Below, there is an analysis of some specified SC from every orbital plane in the experimental OC of 24 SC, as well as of ballistic parameters variation for each of the IL configurations, including the periods of SC mutual visibility.

Here is an analysis of the following ballistic parameters:

- the SC positioning range and the rate of its changing;
- declination and the rate of its changing;
- elevation and the rate of its changing;
- period of mutual visibility in an orbit pass.

These parameters allow to determine SC antenna control characteristics in IL communication, as well as the mutual visibility periods of SC within IL zone.

Configuration 1 – IL between the SC in one orbital plane. Fig. 3 presents an IL variant in one plane, when all RVZ of six SC (at an elevation angle of 10 °) are networked into a common RVZ of the orbital plane. Common RVZ will significantly increase the coverage zone.

Further we review the requirements for IL-providing equipment on the example of two most closely positioned SC of the first orbital plane SC № 11 and SC № 12. Fig. 4 presents the SC, their subsatellite points and flight route.

Tab. 4 presents the initial data – SC №11 and SC № 12 reference. MDT – Moscow decree time in the ascending node, the SC coordinates and velocities are in the Greenwich rotating coordinate system (GRCS).

Let us review the information transfer for SC № 11 to SC № 12 in the nominal position during one orbit pass (115 min).

In fig. 5–7 are shown ballistic parameter variations (where subitem a) parameter, b) parameter change rate):

- Range – line-of-sight distance between SC [12]. Range change rate;
- Declination – antenna direction angle from one SC to another measured from the direction to the Earth’s center. Declination change rate;
- Elevation – antenna direction angle from one SC to another measured from velocity vector in the clockwise direction. Elevation change rate.

We can put the calculations of SC antenna pointing ballistic parameters together. The range of parameter changing for IL in an orbit pass between SC № 11 and SC № 12 is listed in tab. 5.

We must point out that in the orbit pass SC № 11 and SC № 12 are constantly in the zone of mutual visibility – that is confirmed by the parameter of 100 %.

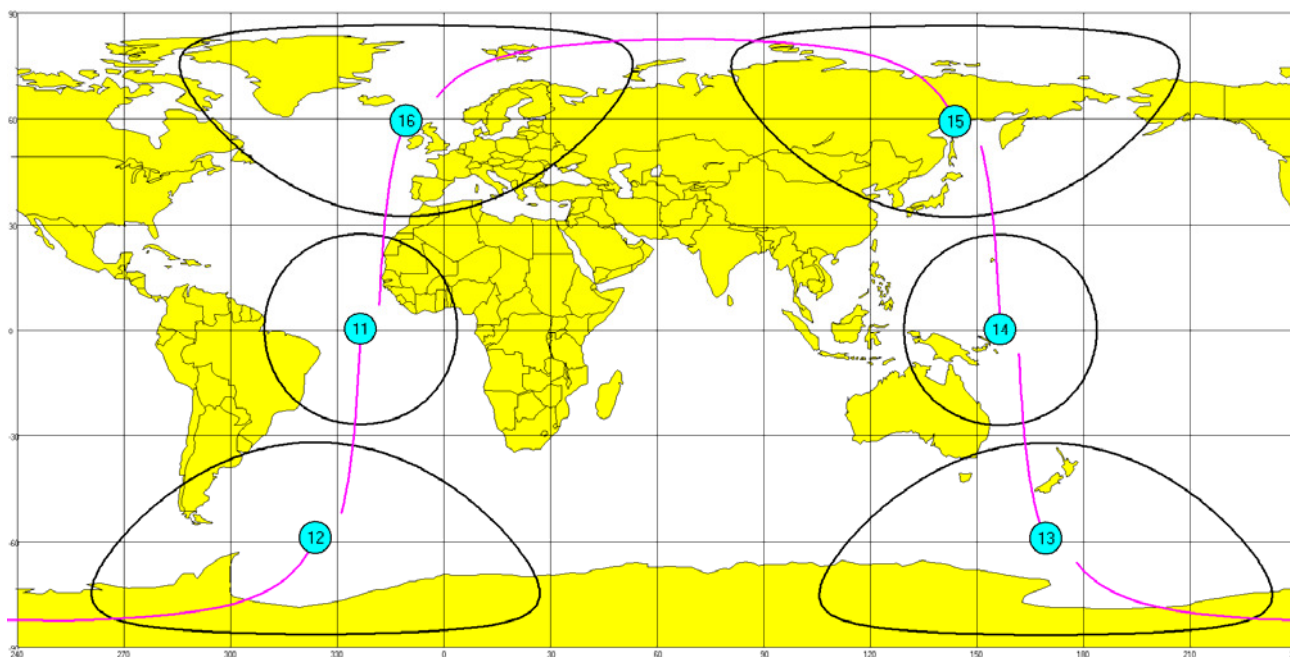


Fig. 3. Common RVZ in one orbital plane with IL within that plane

Рис. 3. Общая ЗРВ одной орбитальной плоскости при МЛС внутри плоскости

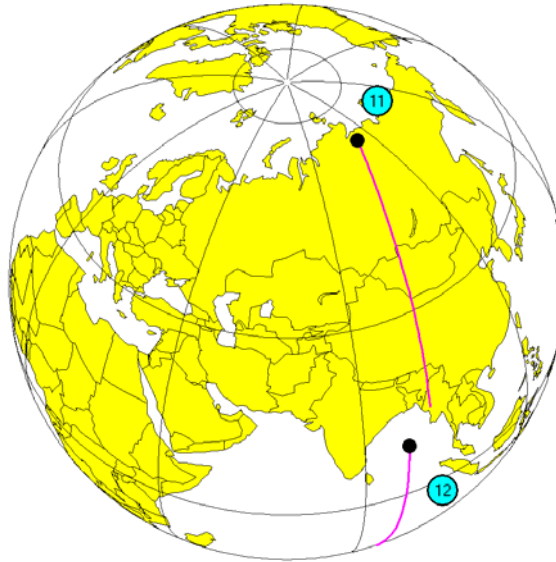


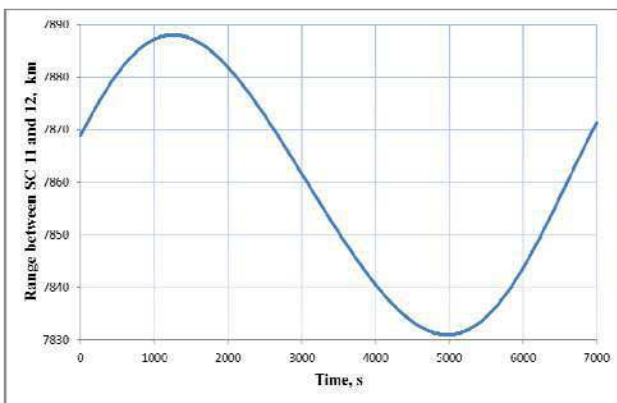
Fig. 4. The motion of two close-positioned SC № 11 and 12 in the first orbital plane

Рис. 4. Движение двух ближайших КА № 11 и 12 первой орбитальной плоскости

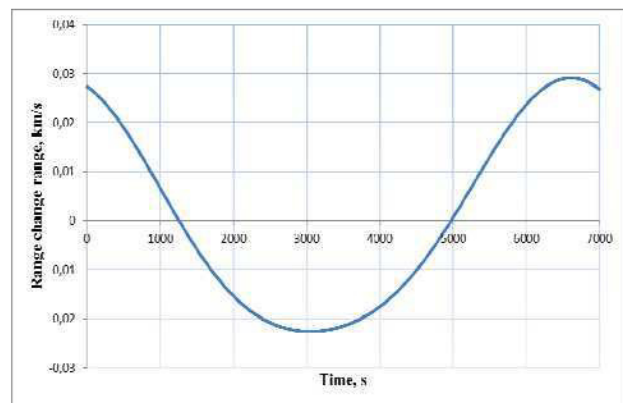
Table 4

SC № 11 and SC № 12 reference

Parameter	SC № 11	SC № 12
Date	31.05.2019	31.05.2019
MDT	11:59:57	12:19:14
Coordinate X, km	7232.954011	6936.407866
Coordinate Y, km	-3120.071909	-3714.968713
Coordinate Z, км	0,0	0.0
Velocity V _x , km/s	0.140334	0.171858
Velocity V _y , km/s	0.325291	0.310911
Velocity V _z , km/s	7.052965	7.060811



a



b

Fig. 5. Ballistic parameter range:
a – range changing between SC № 11 and 12; b – range change range

Рис. 5. Баллистический параметр «дальность»:
a – изменение дальности между КА № 11 и 12;
b – скорость изменения дальности

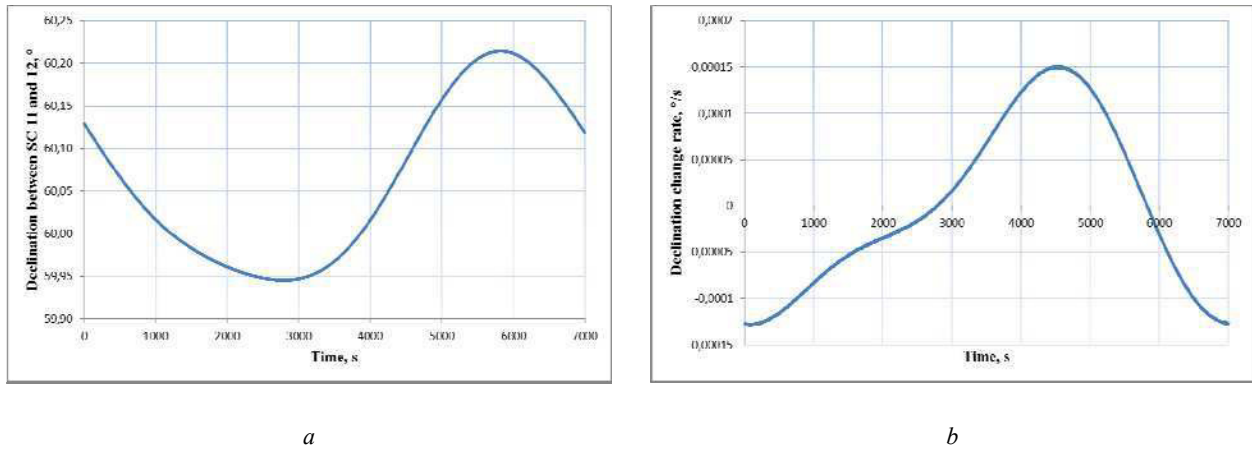


Fig. 6. Ballistic parameter declination:
a – declination changing between SC № 11 and 12; *б* – declination change rate

Рис. 6. Баллистический параметр «клонение»:
a – изменение склонения между КА № 11 и 12; *б* – скорость изменения склонения

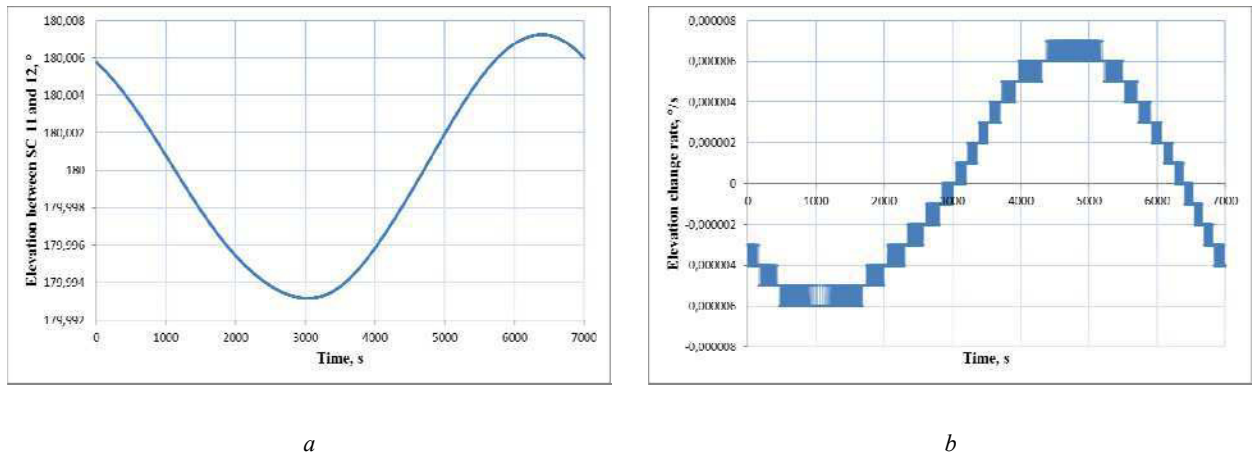


Fig. 7. Ballistic parameter elevation:
a – elevation change between SC № 11 and 12; *б* – elevation change rate

Рис. 7. Баллистический параметр «восхождение»:
a – изменение восхождения между КА № 11 и 12; *б* – скорость изменения восхождения

Changing of IL ballistic parameters between SC within the orbital plane

Table 5

Parameter	Range of parameter changing
Range, km	from 6658 to 9037
Range change rate, km/s	from -0.03 to 0,03
Declination, °	from 54.37 to 65.36
Declination change rate, °/s	from -0.001 to 0.001
Elevation, °	from 179.99 to 180.01
Elevation change rate, °/c	from -0.00006 to 0.00006
SC mutual visibility period in an orbit pass, min	115.9 (100 %)

Fig. 5–7 and tab. 5 data analysis demonstrates in the first place the stability of the basic parameters. Elevation is close to 0° in signal transmission from SC № 12 to SC № 11, and close to 180° in transmission from SC № 11 to SC № 12. The greatest variations are demonstrated by the SC antenna declination parameter.

Configuration 2 – IL between SC of adjacent planes № 1 and 2, № 2 and 3, № 3 and 4. Here is an analysis of IL configuration for SC moving in adjacent planes № 1 and 2, on example of SC № 12, 22, 23.

Tab. 6 presents the reference of SC № 22 and SC № 23, SC № 12 – in tab. 4.

Fig. 8 shows the OC fragment, consisting of SC № 12 from the first orbital plane and SC № 22, SC № 23 from the second orbital plane, for the moment of their positioning in the equator and pole areas. During the full orbit pass SC № 12 motion is mostly parallel to SC № 22, SC № 23 is also parallel; SC routes get crossed only in the pole areas.

We can put together the calculations of SC antenna pointing parameters for planes № 1 and 2. The range of IL parameter changing is listed in tab. 7.

We must point out that the sampled SC № 12, SC № 22 and SC № 23 continuously remain in the mutual visibility zone.

The IL in tab. 7 compared to the IL of one orbital plane (tab. 5) shows the increasing dynamics of declination and elevation angles changing. Here the declination change rate increased by 50 times (0.001 and 0.05), and the elevation change rate increased from 0.00006 °/s to 0.15°/s.

We have the best conditions for information transmission in the equator area. There the information can be transmitted in chain order to all 4 planes of the system.

It should be noted that for the sampled OC of 24 SC at 1500 km altitude, the common IL including configurations 1 and 2 is self-supporting (provides general linking of all SC in the OC).

Configuration 3 – IL between SC in planes № 1 and 3, № 2 and 4. Let us review the IL configuration, in which SC move almost transversely, at the example of orbital planes № 1 and 3.

Tab. 8, in addition to Tab. 4, presents SC № 31, 32, 33 reference.

Here the mutual visibility of SC in different planes occurs at high latitudes.

Each SC of one orbital plane can see from two to three SC of another orbital plane. We can point out that the time of simultaneous visibility of three SC is not long. We analyze the example of IL for SC № 11 of the first orbital plane, and SC № 31, 32 and 33 of the third orbital plane (fig. 9).

IL parameter changes between SC № 11 and SC № 31, 32, 33 are listed in tab. 9.

In motion of SC № 11 relative to SC № 31, 32 and 33, mutual visibility period or IL operational time of the SC is rather long, mainly close to revolution half-period.

Comparison of this IL parameters (tab. 9) with IL in one orbital plane (tab. 5) and IL in adjacent orbital planes (tab. 7) demonstrates still more growing dynamics when the declination and elevation angles get changed. Now the declination change rate comes up to 0.17 °/s, and elevation change rate – to 0.55 °/s.

Configuration 4 – IL between SC in planes № 1 and 4. Here is an analysis of IL configuration in planes № 1 and 4. Its main feature is the SC oncoming motion.

During the revolution half-period a SC of one orbital plane runs across all other SC of another orbital plane.

The dynamics of the SC route intersection depends on the Earth's surface latitude, over which the SC route intersection takes place. In this case, there may be three variants: equator zone, middle latitudes and high latitudes.

Let us review the IL on the example of SC № 11 of the first orbital plane and all six SC of the fourth orbital plane.

Tab. 10 shows the reference of SC № 41-46, SC № 11 – in tab. 4.

SC of one orbital plane can see from one to three SC of another orbital plane at the same time. Fig. 10 shows SC positioning in equator and pole areas.

Table 6

SC № 22 and № 23 reference

Parameter	SC № 22	SC № 23
Date	31.05.2019	31.05.2019
MDT	12:09:37	12:28:54
Coordinate X, km	7386,336533	7591.458385
Coordinate Y, km	2724.447324	2091.536252
Coordinate Z, km	0.0	0.0
Velocity Vx, km/s	-0.127584	-0.086993
Velocity Vy, km/s	0.341148	0.352760
Velocity Vz, km/s	7.055772	7.054474

Table 7

Changing of IL ballistic parameters between SC in adjacent planes № 1 и 2

Parameter	Range of parameter changing
Range, km	from 3800 to 7200
Range change rate, km/s	from -3 to 3
Declination, °	from 63 to 77
Declination change rate, °/c	from -0.05 to 0.05
Elevation, °	from -60 to 60; from 120 to 240
Elevation change rate, °/c	from -0.4 to 0.15; from -0.15 to 0.15
SC mutual visibility period in an orbit pass, min	115.9 (100 %)

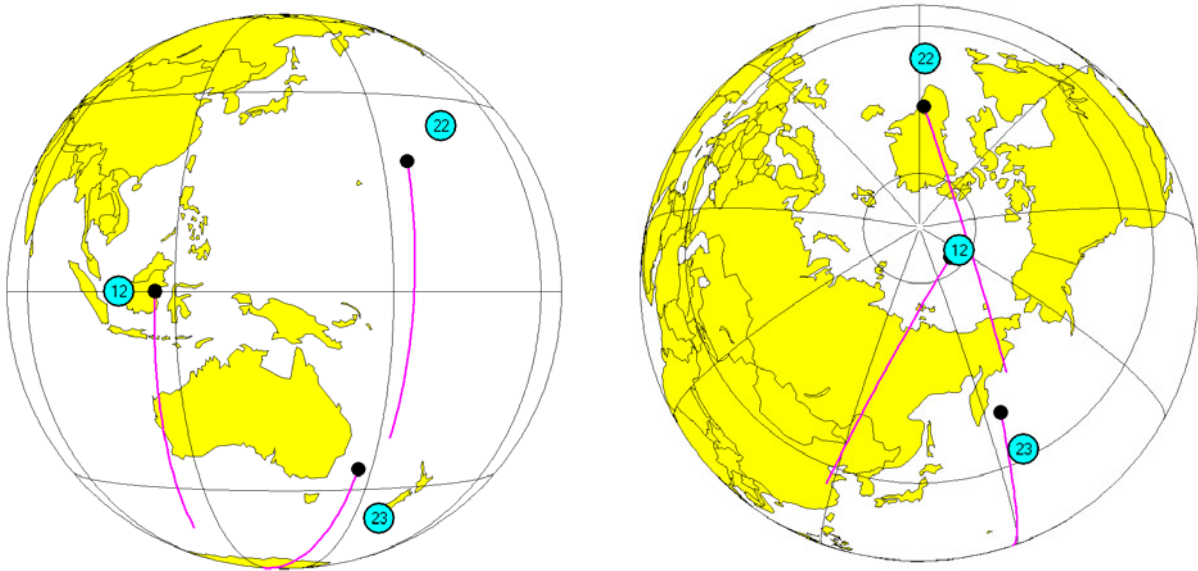


Fig. 8. SC motion in adjacent planes № 1 and 2

Рис. 8. Движение КА в соседних плоскостях № 1 и 2

Table 8

SC № 31, 32 and 33 reference

Parameter	SC № 31	SC № 32	SC № 33
Date	31.05.2019	31.05.2019	31.05.2019
MDT	11:40:43	12:00:00	12:19:17
Coordinate X, km	2233.447140	2864,993939	3469.973938
Coordinate Y, km	7544.938345	7337.622768	7062.144241
Coordinate Z, km	0.0	0.0	0,0
Velocity Vx, km/s	-0.354350	-0.342044	-0.328272
Velocity Vy, km/s	0.099865	0.133551	0.166529
Velocity Vz, km/s	7.059052	7.051298	7.059063

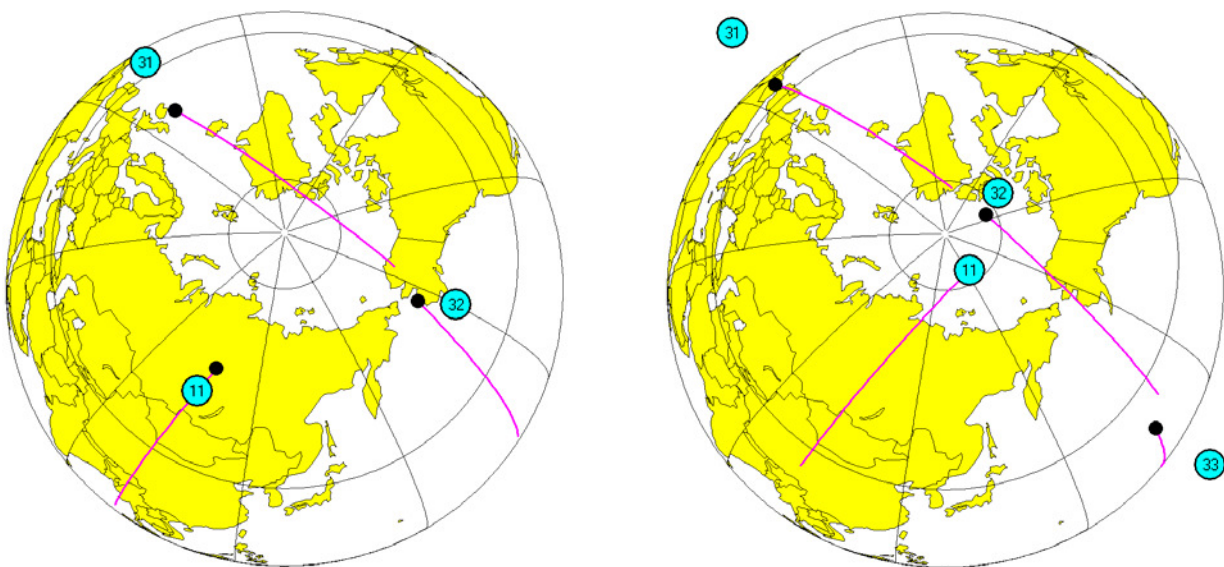


Fig. 9. SC orthogonal motion in planes № 1 and 3

Рис. 9. Ортогональное движение КА в плоскостях № 1 и 3

Table 9

Changing of IL ballistic parameters between SC in planes № 1 and 3

Parameter	Range of parameter changing		
	SC № 11 and 31	SC № 11 and 32	SC № 11 and 33
Range, km	from 6000 to 9200	from 500 to 9200	from 5000 to 9200
Range change rate, km/s	from -6 to 6	from -9 до +9	from -6.3 to +6.3
Declination, °	from 54 to 68	from 54 to 88	from 54 to 71
Declination change rate, %/c	from -0.14 to 0.14	from -0.17 to 0.17	from -0.15 to 0.15
Elevation, °	from 7 to -93; from 170 to 267	from 60 to -120; from 140 to 310	from 82 to 190; from -20 to 100
Elevation change rate, %/c	from -0.5 to 0.05	from -0.18 to 0.06	from -0.05 to 0.55
SC mutual visibility period in an orbit pass, min	50.1 (43.2 %)	71.1 (61.3 %)	56.0 (48.3 %)

Table 10

Reference of SC № 41–46 in the OC

Parameter	SC № 41	SC № 42	SC № 43	SC № 44	SC № 45	SC № 46
Date	31.05.2019	31.05.2019	31.05.2019	31.05.2019	31.05.2019	31.05.2019
MDT	11:31:05	11:50:22	12:09:40	12:28:57	12:48:20	13:07:37
Coordinate X, km	-4165.747	-3585.969	-2981.510	-2356.174	-1709.746	-1055.799
Coordinate Y, km	6682.119	7008.555	7286.171	7513.579	7688.098	7804.910
Coordinate Z, km	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Velocity Vx, km/s	-0.302	-0.324	-0.335	-0.348	-0.353	-0.359
Velocity Vy, km/s	-0.199	-0.164	-0.139	-0.099	-0.080	-0.047
Velocity Vz, km/s	7.054	7.055	7.056	7.054	7.053	7.052

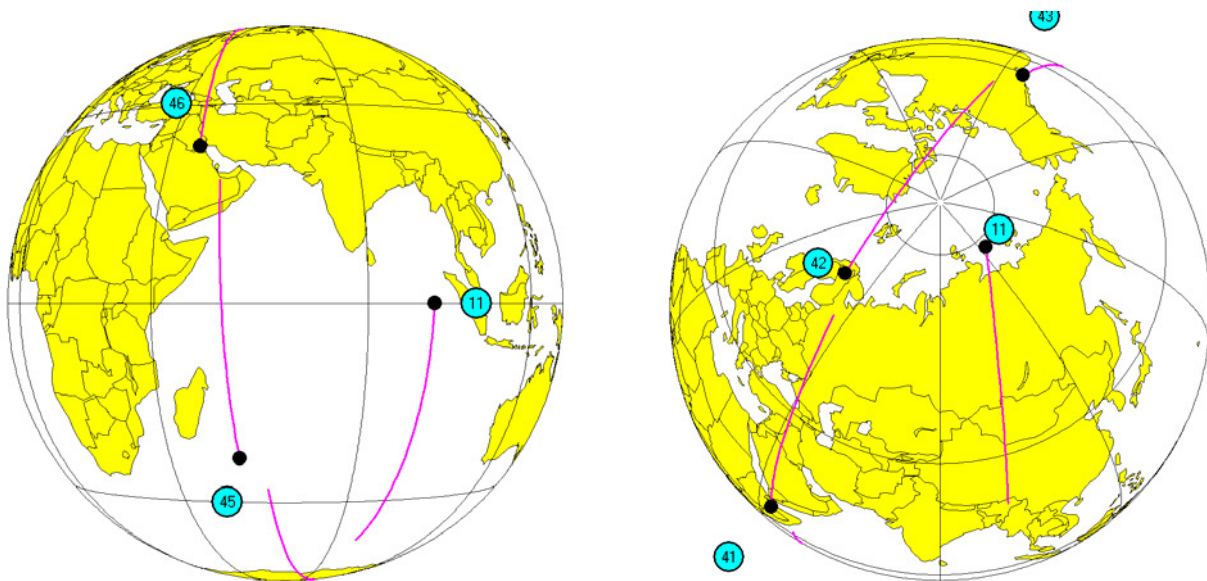


Fig. 10. Oncoming motion of SC from planes № 1 and 4

Рис. 10. Встречное движение КА плоскостей № 1 и 4

IL parameter changing range between SC № 11 and all SC of the fourth orbital plane, SC № 41–46, is listed in tab. 11.

Mutual visibility period of SC № 11 and SC in the fourth orbital plane is less than in the other previously reviewed IL configurations.

This IL (tab. 11) compared to the other previously reviewed IL (tab. 5, 7, 9) shows That the type of IL presented here demands the most dynamic SC antenna pointing by declination angle and elevation angle change. Here

the declination change rate comes up to 0.24 %/s, and elevation change rate – to 0,75 %/c.

Conclusion. The analysis of the main ballistic parameter changing taken into account for antenna pointing in transmission of data via IL either in one orbital plane or in adjacent planes shows that the changing is quite varied. Table 12 presents generalized ranges of main ballistic parameter changing for the IL configuration within OC of 24 SC (4 orbital planes, 6 SC each) at the orbit of 1500 km.

We can conclude that for an orbital constellation IL antenna pointing and proper operation, the destabilizing factors analyzed in this article must be taken into account:

- limited time intervals for information exchange of SC in the line of sight;
- mutual change of position at SC high motion velocity.

IL operating optical or radio communication channels of a satellite system has a number of special characteristics – limited power supply of IL equipment; that should be taken into account in hardware design [13].

Comparing the reviewed IL types for the sampled OC of 24 SC, we can find that the simplest IL to be put into practice is the inter-satellite line within one plane. With this type, the ballistic parameters change in the least, and the neighboring SC stay in the line of sight all the time.

For the IL configuration in OC adjacent orbital planes, special apparatus and antennae for dynamic tracking of one SC by another are required, since the target indications used for antenna pointing get dynamically and considerably changed.

In this case, favorable conditions for IL operation – the lowest parameter changing rates for IL antenna pointing – develop in SC parallel motion in adjacent orbital planes (between orbital planes № 1 and 2, № 2 and 3, № 3 and 4).

It should be noted that to improve the OC of 24 SC consumer characteristics from the point of view of its usability, it is enough to make use of the first two IL types reviewed above: inside any single plane and in adjacent planes № 1 and 2, № 2 and 3, № 3 and 4.

After successful IL configuration for OC of SC in a low circular orbit, further development of SC between the SC positioned in various orbits can be considered. This type of IL was outlined in [14; 15], describing a combined satellite communication system, comprising a relay satellite operating in a highly elliptical orbit and providing information exchange with SC in its line of sight moving in low earth orbits.

The use of the results obtained in design of updated SC, in OC ballistic configuration and establishing IL in the OC of 24 SC, may help to produce a highly-efficient monitoring and data transmission satellite system.

Table 11

Changing of IL ballistic parameters between SC in planes № 1 and 4

Parameter	Parameter change rate between SC № 11 and SC № 41-46					
	SC № 46	SC № 41	SC № 42	SC № 43	SC № 44	SC № 45
Range, km	from 6000 to 9200	from 5000 to 9200	from 2640 to 9200	from 500 to 9200	from 3300 to 9200	from 5340 to 9200
Range change rate, km/s	from -9.0 to 9.0	from -9.3 to 9.3	from -10.3 to 10.3	from -12.3 to 12.4	from -10.1 to 10.1	from -9.1 to 9.1
Declination, °	from 54 to 68	from 54 to 72	from 54 to 80	from 54 to 88	from 54 to 78	from 54 to 70
Declination change rate, %/c	from -0.2 to 0.2	from -0.22 to 0.22	from -0.23 to 0.23	from -0.24 to 0.24	from -0.24 to 0.24	from -0.2 to 0.2
Elevation, °	from 220 to 320	from 230 to 340	from 220 to 360	from 30 to 200	from 45 to 180	from 47 to 155
Elevation change rate, %/c	from -0.65 to 0.20	from -0.75 to -0.15	from -1.4 to 0	from -0.1 to 0.1	from 0.55 to 1.15	from 0.18 to 0.71
SC mutual visibility period in an orbit pass, min	37.9 (32.7 %)	41.5 (35.8 %)	48.0 (41.4 %)	50.5 (43.5 %)	46.6 (40.2 %)	40.6 (35.0 %)

Table 12

Changing of IL ballistic parameters for OC of 24 SC

Parameter	IL configuration type			
	Within a plane	Between 1 and 2, 2 and 3, 3 and 4 planes	Between 1 and 3, 2 and 4 planes	Between 1 and 4 planes
Range, km	from 6658 to 9037	from 4000 to 7200	from 5000 to 9000 from 500 to 9000	from 500 to 9000 from 3500 to 9000 from 5500 to 9000
Range change rate, km/s	from -0.03 to 0.03	from 0 to 3	from -10 to 10	from -12 to 12
Declination, °	from 54.37 to 65.36	from 63 to 75	from 55 to 90	from 54 to 90
Declination change rate, %/c	from -0.001 to 0.001	from 0 to 0.01	from -0.035 to 0.035	from -0.05 to 0.05
Elevation, °	from -0.01 to 0.01; from 179.99 to 180.01	from 10 to 60; from 330 to 360	from 300 to 360; from 0 to 120	from 340 to 360
Elevation change rate, %/c	from -0.000006 to 0.000006	from 0.03 to 0.07	from -0.05 to 0.05	from 0 to 0.9
SC mutual visibility period in an orbit pass, min	115.9 (100 %)	115.9 (100 %)	from 50.1 to 71.1 (from 43.2 to 61.3 %)	from 37.9 to 50.5 (from 32.7 to 43.5 %)

References

1. Zolkin I. A., Ignatovich E. I., Shekutiev A. F., Bolkunov A. I. [Intersatellite communications as a key element of GNSS technologies]. *Polyot*. 2012, No. 4, P. 29–33 (In Russ.).
2. Katsura A. V., Akzigitov A. R., Andronov A. S., Stokov D. E., Akzigitov R. A. [Development of an on-board device for satellite monitoring of aircraft]. *Vestnik SibGAU*. 2016, Vol. 17, No. 1, P. 125–130 (In Russ.).
3. Krylov A. *Sputnikovyе системы svyazi i veshchaniia. Sostoianie i perspektivy razvitiia* [Satellite communication and broadcasting systems. Status and prospects of development]. Moscow, 2014, 182 p.
4. Vecytomov V. A. [Inter-Satellite link IIM range]. *Materialy XX Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XVIII Intern. Scientific. Conf. "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2014, Vol. 1, P. 63–65 (In Russ.).
5. Sanjay Kumar. *Wireless Communication the fundamental and advanced concepts*, Birla Institute of Technology Mesra, Ranchi, India, Published River Publ., 2015, P. 790.
6. Chini P., Giambene G., Kota S. A survey on mobile satellite systems. *International journal of satellite communications*. 2010, Vol. 28, P. 29–57.
7. Kolovsky I. K., Podolyakin V. N., Shmakov D. N. [Ballistic building of the «Gonets-M» orbital constellation for ensuring the inter-satellite link inside orbital plane]. *Materialy XX Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XXII Intern. Scientific. Conf. "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2018, Vol. 1, P. 30–31.
8. Vygodskiy M. Ya. *Spravochnik po elementarnoy matematike* [The handbook on elementary mathematics]. Moscow, AST, Astrel Publ., 2014, 509 p.
9. El'yasberg P. E. *Vvedenie v teoriyu poleta iskusstvennogo sputnika Zemli* [Introduction to the theory of flight satellite]. Moscow, URSS Publ., 2015, 544 p.
10. Makarenko S. I. Descriptive model of Iridium satellite communication system. *System of control, communication and security*. 2018, Vol. 4, P. 1–34.
11. Gibalina Z. S., Fadeev V. A. Optical inter-satellite link in comparison with RF case in CUBESAT system. *Zhurnal Radioelektroniki. Magazine of radioelectronics*. 2017, Vol. 10, P. 12.
12. Moskaliev A. N., Muratov D. S., Serenkov V. I. [Evaluation ephemeris navigation spacecraft of GLONASS measurements inter-satellite radiolines]. *Materialy XI Mezhdunar. nauch.-praktich. konf. "Aktualnye problem aviatsii i kosmonavtiki"* [Materials XI Intern. Scientific.-Pract. Conf. "Pressing problems of the aviation and astronautics"]. 2015, Vol. 1, P. 74–76.
13. Shirobokov V. V., Shinkarenko A. F. [An approach to the organization inter-satellite interaction in distributed computing structure of the orbital group microsatellites]. *Trudy voenno-kosmicheskoy akademii im. A. F. Mozhaiskogo*. 2015, Vol. 646, P. 77–82.
14. Vygon'skiy Yu. G., Mukhin V. A., Kuzovnikov A. V., Somov V. G. [Combined satellite communications system serving ground and space users based on geosynchronous

orbit data relay satellites equipped with multiple beam antennas]. *Fundamental'nyye issledovaniya*. 2014, No. 9-5, P. 965–970 (In Russ.).

15. Mukhin V. A. *Sposob postroyeniya kosmicheskoy sistemy retranslyatsii s ispol'zovaniyem geosinkhronnykh sputnikov-retranslyatorov* [A method of constructing a space relay system using geosynchronous relay satellites]. RF patent № 2366086, MPK H04B.

Библиографические ссылки

1. Межспутниковые линии-важный элемент перспективных спутниковых навигационных технологий / И. А. Золкин, Е. И. Игнатович, А. Ф. Щекутьев, А. И. Болкунов // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2012. № 4. С. 29–33.
2. Разработка бортового устройства спутникового мониторинга воздушных судов / А. В. Кацура, А. Р. Акзигитов, А. С. Андронов и др. // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17, № 1. С. 125–130.
3. Крылов А. М. Спутниковые системы связи и вещания. Состояние и перспективы развития. М., 2014. 182 с.
4. Вечтомов В. А. Межспутниковая линия связи ММВ диапазона // Решетневские чтения : материалы XVIII Междунар. науч. конф. (11–14 ноября 2014, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т им. акад. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2014. Ч. 1. С. 63–65.
5. Sanjay Kumar, *Wireless Communication the fundamental and advanced concepts*, Birla Institute of Technology Mesra, Ranchi, India, Published River Publishers, 2015, p. 790.
6. Chini P., Giambene G., Kota S. A survey on mobile satellite systems // *International journal of satellite communications*. 2010. Vol. 28. P. 29–57.
7. Коловский И. К., Подолякин В. Н., Шмаков Д. Н. Баллистическое построение орбитальной группировки «Гонец-М» для организации межспутниковой линии связи внутри орбитальной плоскости // Решетневские чтения : материалы XXII Междунар. науч. конф. (12–16 ноября 2018, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2018. Ч. 1. С. 30–31.
8. Выгодский М. Я. Справочник по элементарной математике. М. : АСТ, Астрель, 2014. 509 с.
9. Эльясберг П. Е. Введение в теорию полета искусственных спутников Земли. М. : URSS, 2015. 544 с.
10. Макаренко С. И. Описательная модель системы спутниковой связи Iridium // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 4. С. 1–34.
11. Gibalina Z. S., Fadeev V. A. Optical inter-satellite link in comparison with RF case in CUBESAT system. *Zhurnal Radioelektroniki // Magazine of radioelectronics*. 2017. Vol. 10. P 12.
12. Москалев А. Н., Муратов Д. С., Серенков В. И. Оценка эфемерид навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС по измерениям межспутниковой радиолинии // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : материалы XI Междунар. науч.-практич.

конф. (6–10 апреля 2015, г. Красноярск) : в 2 т. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2015. Т. 1. С. 74–76.

13. Широбоков В. В., Шинкаренко А. Ф. Подход к организации межспутникового взаимодействия в распределенной вычислительной структуре орбитальной группировки микроспутников // Тр. военно-космич. акад. им. А. Ф. Можайского. 2015. № 646. С. 77–82.

14. Комбинированная спутниковая система связи с земными и космическими абонентами на базе гео-

синхронных спутников-ретрансляторов, оснащенных многолучевыми антеннами / Ю. Г. Выгонский, В. А. Мухин, А. В. Кузовников, В. Г. Сомов // Фундаментальные исследования. 2014. № 9-5. С. 965–970.

15. Патент 2366086 РФ, МПК H04B. Способ построения космической системы ретрансляции с использованием геосинхронных спутников-ретрансляторов / Мухин В. А. (РФ). № 2008131091/09 ; заявлено 28.07.08 ; опубл. 27.08.09, Бюл. № 24.

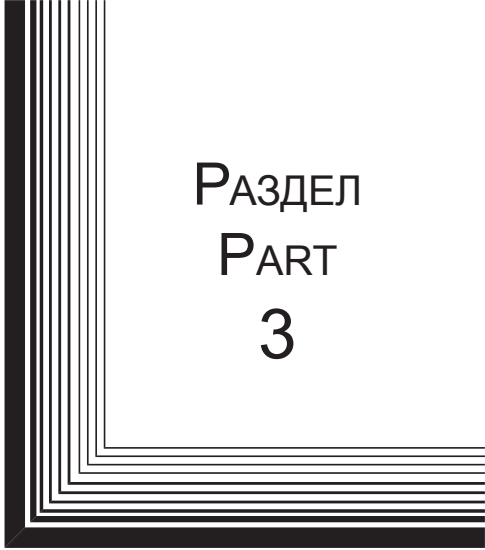
© Kolovsky I. K., Shmakov D. N., 2019

Kolovsky Igor Konstantinovich – engineer of the 2nd category; JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: kolovigor@mail.ru.

Shmakov Dmitri Nikolaevich – leading engineer; JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”.

Коловский Игорь Константинович – инженер 2-й категории; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: kolovigor@mail.ru.

Шмаков Дмитрий Николаевич – ведущий инженер; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева».



РАЗДЕЛ
PART
3



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ
И МАТЕРИАЛЫ

TECHNOLOGICAL
PROCESSES
AND MATERIALS SCIENCE



UDC 621.793

Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-478-484

For citation: Voronin A. S., Fadeev Yu. V., Simunin M. M., Podshivalov I. V., Khartov S. V. Research of electromagnetic shielding properties of single-walled carbon nanotubes thin transparent films. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2019, Vol. 20, No. 4, P. 478–484. Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-478-484

Для цитирования: Воронин А. С., Фадеев Ю. В., Симунин М. М., Подшивалов И. В., Хартов С. В. Исследование радиоэкранирующих свойств тонких прозрачных пленок одностенных углеродных нанотрубок // Сибирский журнал науки и технологий. 2019. Т. 20, № 4. С. 478–484. Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-478-484

RESEARCH OF ELECTROMAGNETIC SHIELDING PROPERTIES OF SINGLE-WALLED CARBON NANOTUBES THIN TRANSPARENT FILMS

A. S. Voronin^{1*}, Yu. V. Fadeev¹, M. M. Simunin^{1,2}, I. V. Podshivalov³, S. V. Khartov¹

¹Krasnoyarsk Scientific Center of the SB RAS
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

²Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

³Institute of Physics named after L.V. Kirensky
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

*E-mail: a.voronin1988@mail.ru

The paper presents the results of studying the shielding properties of thin transparent films in single-walled carbon nanotubes on flexible substrates of polyethylene terephthalate. The films were formed by spraying colloidal solution on single-walled carbon nanotubes. The film thickness was determined by the volume of the sprayed colloidal solution and was measured using transmission electron microscopy in a cross-section mode. The morphology and structural quality of the films were studied by electron microscopy, optical spectroscopy, and Raman spectroscopy. The results showed the high structural quality of the material. According to Raman spectroscopy, the ratio of peaks intensities G / D is 23.4, which is the evidence of a significant predominance of carbon in the sp^2 hybridization. It is typical for graphite-like systems and, in particular, carbon nanotubes. The spectral dependences of the transmission and reflection coefficients of radio waves in the K range of 18–26.5 GHz were studied. Absorption of radiation is the dominant shielding mechanism. Increasing the film thickness from 15.9 to 56.1 nm is accompanied by decreasing the surface resistance from 971 to 226 Ohm / sq, while optical transparency decreases from 93.58 to 76.71 %. Shielding efficiency increases from 2.29 to 6.6 dB, increasing the proportion of absorbed radiation from 34.6 to 51.2 % at a frequency of 18 GHz. This indicates the prospects for the use of films as electromagnetic shielding and anti-icing coatings in the aerospace industry.

Keywords: single-walled carbon nanotubes, thin films, electromagnetic shielding.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОЭКРАНИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ТОНКИХ ПРОЗРАЧНЫХ ПЛЕНОК ОДНОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

А. С. Воронин^{1*}, Ю. В. Фадеев¹, М. М. Симунин^{1,2}, И. В. Подшивалов³, С. В. Хартов¹

¹ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН»
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50

²Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

³Институт физики имени Л. В. Киренского
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50

*E-mail: a.voronin1988@mail.ru

Представлены результаты исследования экранирующих свойств тонких прозрачных пленок одностенных углеродных нанотрубок на гибких подложках из полиэтилентерефталата. Пленки формировались спрей распылением коллоидного раствора одностенных углеродных нанотрубок. Толщина пленок задавалась объемом распыляемого коллоидного раствора и измерялась при помощи просвечивающей электронной микроскопии в режиме cross-section. Морфология и структурное качество пленок были изучены методами электронной микроскопии, методами оптической спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света. Результаты позволяют судить о высоком структурном качестве материала. Согласно данным спектроскопии комбинационного рассеяния, соотношение интенсивностей пиков G/D составляет 23,4, что является свидетельством существенного преобладания углерода, находящегося в состоянии sp^2 гибридизации. Это характер-

но для графитоподобных систем и, в частности, углеродных нанотрубок. Изучены спектральные зависимости коэффициента прохождения и отражения радиоволн в К-диапазоне 18–26,5 ГГц. Доминирующим механизмом экранирования является поглощение излучения. Увеличение толщины пленки с 15,9 до 56,1 нм сопровождается снижением поверхностного сопротивления с 971 до 226 Ом/кв, оптическая прозрачность при этом снижается с 93,58 до 76,71 %. Эффективность экранирования увеличивается с 2,29 до 6,6 дБ, повышая долю поглощенного излучения с 34,6 до 51,2 % на частоте 18 ГГц. Это говорит о перспективах применения пленок в качестве радиоэкранирующих и антиобледенительных покрытий в аэрокосмической отрасли.

Ключевые слова: одностенные углеродные нанотрубки, тонкие пленки, электромагнитное экранирование.

Introduction. Single-walled carbon nanotubes (SWCNTs) are promising for the aerospace industry due to the unique combination of high mechanical strength (Young's modulus \sim 1TPa), high electrical conductivity, as well as low density and, as a consequence, low weight of the finished product. The listed properties imply broad prospects for the use of SWCNTs as a reinforcing material for polymer composites, light and strong electrical cables, and functional layers for transparent electric-heated and electromagnetic shielding structural elements. The function of electromagnetic shielding is of interest, in particular, for solving the problem of protecting information. As far back as the 80s of the 20th century the fundamental possibility of intercepting and decrypting information contained in radiation from a computer monitor was shown. This fact increases the priority of applying various measures to protect a wide variety of electronic objects from unauthorized removal of the information contained in them, or possible external influences. Shielding output devices is the main solution to protecting information. The reality of such a scenario has been experimentally proven. In Russia this channel of information leakage is called SEMRP (Side Electromagnetic Radiation and Pickup). In the USA the standard is called TEMPEST (Transient Electromagnetic Pulse Emanation Standard).

Traditionally thin layers of transparent conducting oxides such as In_2O_3 : Sn [1] and ZnO: Al [2] act as shielding films.

Carbon nanomaterials, such as carbon nanotubes (single-walled [3] and multi-walled), graphene [4; 5], reduced graphene oxide [6], as well as polymers with conjugated bonds [7] are promising in solving this problem. As a result active study of their shielding properties is currently underway.

In [3] the effectiveness of shielding electromagnetic radiation of the HF and microwave range by SWCNT films with a thickness of 10 nm to 10 μm was studied. It was shown that the shielding efficiency of a SWCNT film with a thickness of 100 nm is about 40 dB at a frequency of 10 GHz, however, the optical transparency of such a film is about 50%, which is significantly lower than operational requirements ($>$ 80 %). In the case of a graphene monolayer the shielding efficiency is 2.27 dB with a surface resistance of 635 Ohm / sq and optical transparency of 97.8 % [4]. The graphene monolayer has fairly low shielding efficiency, but due to its high transparency it can be a part of a composite coating, for example in combination with metal grids or nanowires.

The method of forming films of single-walled carbon nanotubes. The paper studies the shielding ability of thin SWCNT films (OCSiAl, Novosibirsk) on polyethylene terephthalate substrates. The application of thin

SWCNT films was carried out by the spray method; a detailed description is given in [8; 9]. The principle is as follows: the compressed air from the compressor is supplied to the nozzle (airbrush) under pressure of 6 atm (0.6 MPa), spraying the SWCNT colloidal dispersion (the preparation procedure is described in detail in [9]) onto heated polyethylene terephthalate substrates (manufactured by Hi-Fi, Japan, thickness 50 μm) – as the main substrate and a base alkaline glass, 1 mm thick for spectroscopic measurements. The substrate temperature is controlled by the heating element and in this work was 120 $^\circ\text{C}$, this is enough for the microdrops of the colloidal solution to evaporate without being able to coalesce on the substrate.

The thickness of the SWCNT films was determined by the volume of the sprayed SWCNTs dispersion; four volumes of SWCNT ink were used in the work: 1, 2, 3, and 4 ml. After spraying the colloidal solution the films were washed with distilled water for one hour, and then dried at 100 $^\circ\text{C}$ for one hour in order to remove residual water and form a coherent film of nanotubes.

Studying the morphology and thickness of SWCNT films by scanning and transmission electron microscopy. The morphology and thickness of SWCNT films was studied by electron microscopy. The study of morphology was carried out using a Hitachi S5500 scanning electron microscope (Center of collective uses FRC KSC SB RAS). Fig. 1, a, b, c show films obtained by spraying 1 and 3 ml of SWCNT dispersion, respectively. It is seen that with an increase in the volume of sprayed dispersion the density of the SWCNT film increases.

The thickness of SWCNT films was measured by transmission electron microscopy (TEM) using a Hitachi HT7700 transmission electron microscope (Center of collective uses FRC KSC SB RAS) in a cross-section mode according to the technique described in [10].

Measuring the SWCNT films average thickness in the cross-section mode made it possible to determine the average film thickness for all volumes of sprayed dispersion. Film thickness for 1; 2; 3 and 4 ml of the dispersion are 15.3; 32.9; 44.9 and 56.1 nm, respectively. According to the straight line tangent, the direct dependence of the film thickness on the sprayed colloid volume can be described by the equation $h = 14,56 \cdot V$, which allows accurate characterizing the parameters of SWCNT films for the selected technological mode.

Investigation of the structural and optoelectronic characteristics of thin SWCNT films. For SWCNT films all spectroscopic studies were carried out on alkaline glass, which excluded the contribution of the substrate to the spectra and thereby made the analysis more objective. The optical transparency of SWCNT films was

studied by optical spectrophotometry using a Shimadzu UV-3600 spectrophotometer in the range 400–2500 nm.

Fig. 2, *a* shows the spectral transmission for an alkaline glass substrate and a 44.5 nm thick SWCNT film. The graph shows three absorption peaks characteristic of SWCNTs, which correspond to electronic transitions between the Van Hove features for semiconductor ($S_{11} \sim 1836$ nm and $S_{22} \sim 1064$ nm) and metal ($M_{11} \sim 786$ nm) SWCNTs [11]; the position of these peaks depends on the SWCNTs diameter, with decrease in diameter all three peaks experience a blue shift.

Fig. 2, *b* shows the dependences of the specific surface resistance and optical transmission at a wavelength of 550 nm on the thickness of the SWCNT film. The sheet resistance of the films is 971; 607; 379 and 226 Ohm / sq, respectively, and the optical transmission minus the reflection from the glass substrate is 93.6; 88.5; 81.9 and 76.7 %, respectively.

The structural quality of SWCNTs can be most fully characterized using Raman spectroscopy. Atomic vibrations in SWCNTs were studied using Raman spectroscopy.

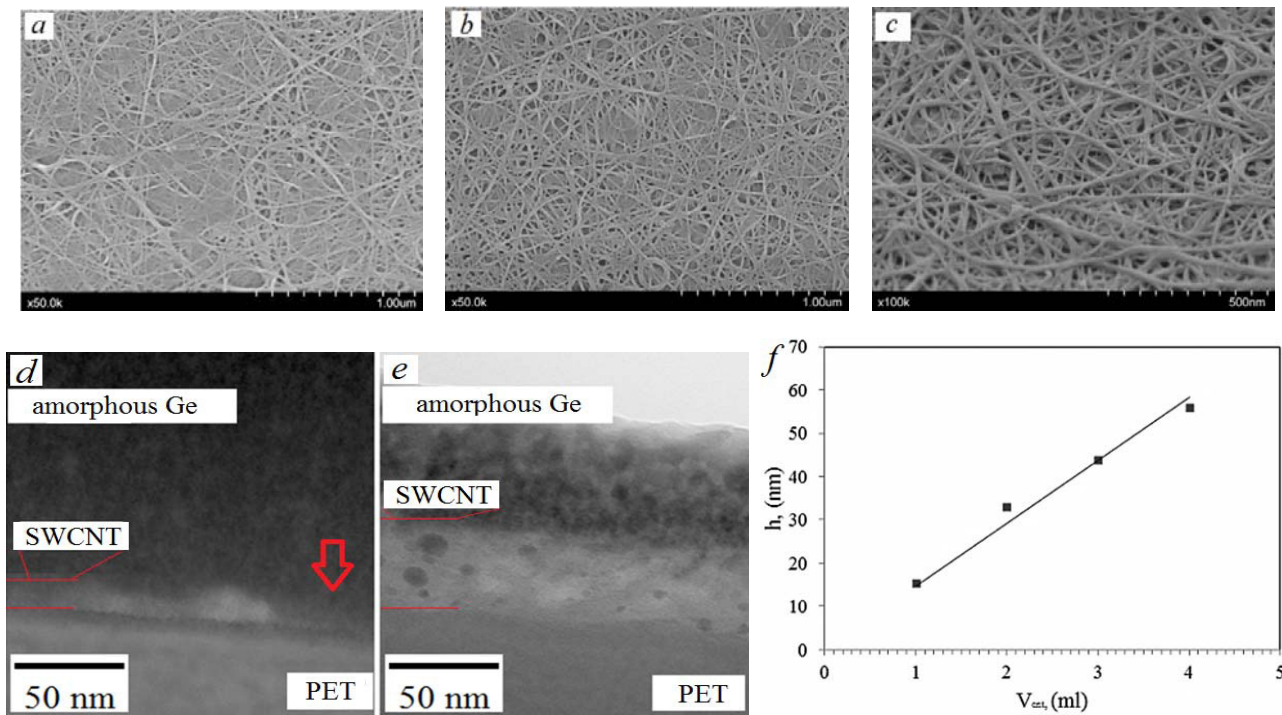


Fig. 1. SEM images of SWCNT films of various thicknesses: 1 ml (*a*) and 3 ml (*b* and *c*) of dispersion; TEM image of SWCNT films of various thicknesses: 1 ml (*d*) and 3 ml (*e*) of dispersion. Dependence of the SWCNT films thickness on the volume of sprayed dispersion (*f*)

Рис. 1. СЭМ изображения пленок ОУНТ различной толщины: 1 мл (*a*) и 3 мл (*b* и *c*) дисперсии; ПЭМ изображение пленок ОУНТ различной толщины: 1 мл (*d*) и 3 мл (*e*) дисперсии. Зависимость толщины пленок ОУНТ от объема распыленной дисперсии (*f*)

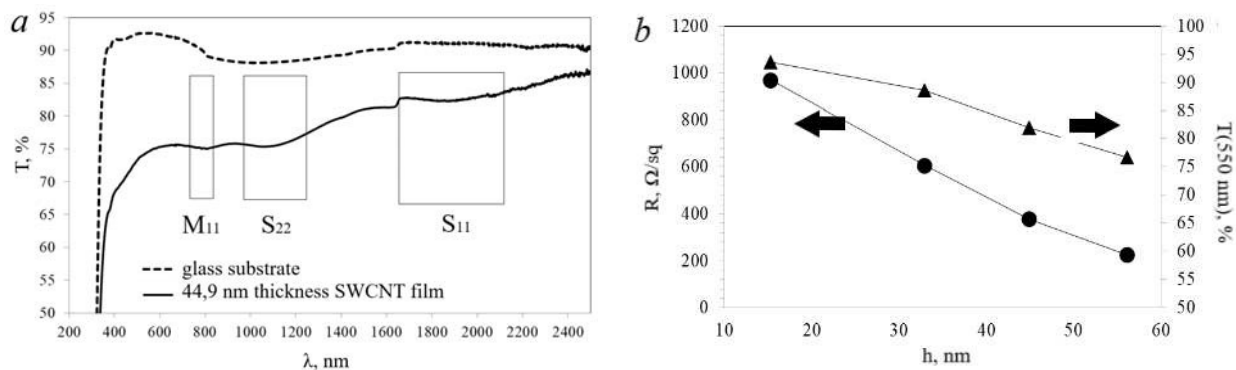


Fig. 2. Transmission of a SWCNT film 44.9 nm thick in the range 400–2500 nm (*a*); dependence of surface resistance and transmission of SWCNT films as a function of film thickness (*b*)

Рис. 2. Пропускание пленки ОУНТ толщиной 44,9 нм в диапазоне 400–2500 нм (*a*); зависимость поверхностного сопротивления и пропускания пленок ОУНТ в зависимости от толщины пленки (*b*)

Fig. 3 shows the Raman spectra for the films with thickness of 15.3 nm and 56.1 nm, obtained using a Horiba Jobin Yvon T64000 Raman spectrometer (Center of collective uses FRC KSC SB RAS).

Three peaks characteristic of SWCNTs can be distinguished in the spectra: the G-line characterizing the vibrations of the system of carbon sp^2 bonds ($\sim 1592.8 \text{ cm}^{-1}$) (graphite-like zone), the 2D line ($\sim 2678.7 \text{ cm}^{-1}$), indicating two-dimensionality of the material, which is the overtone of the D-line (defective zone) ($\sim 1332.5 \text{ cm}^{-1}$). The RBM peak (the breathing mode is a split peak at $\sim 150.6 \text{ cm}^{-1}$ and $\sim 180.29 \text{ cm}^{-1}$) characterizes expansion-compression vibrations relative to the central axis of nanotubes [12]. It is also worth noting that the film thickness does not affect the position of the peaks. The low intensity of the D mode indicates low defectiveness of the nanotube material; the ratio of the G / D peaks intensities is 23.4.

In [9] we calculated the diameter of SWCNTs of this type; it amounted to 1.6–1.8 nm, which correlates with the results of [13].

Investigation of the electromagnetic shielding properties of SWCNT films. The reflection (S_{11}) and transmission (S_{21}) coefficients in the K range (18–26.5 GHz) were measured according to the scheme

shown in fig. 4. Samples of SWCNT films were clamped using threaded connections between two waveguide-coaxial transitions of rectangular cross section with dimensions $5.5 \times 11 \text{ mm}$. The signal was excited and analyzed using the R&S ZVA 50 vector network analyzer. Changing the level of the transmitted and reflected signal allows drawing conclusions about the magnitude of the shielding effect and its mechanism. It is worth noting that the approach involving the use of a waveguide, unlike the method of measurement in free space (using horns), allows estimating the level of reflection of the microwave signal from the sample.

Fig. 5 shows the spectral dependences of the parameters S_{11} and S_{21} measured in dB which are reflection and transmission coefficients, respectively.

Thus, knowing the values of the coefficients S_{21} and S_{11} it is possible to calculate the transmission and reflection coefficients according to the following equations [14]:

$$T = \frac{P_t}{P_i} = 10^{(0.1S_{21})}, \quad (1)$$

$$R = \frac{P_r}{P_i} = 10^{(0.1S_{11})}.$$

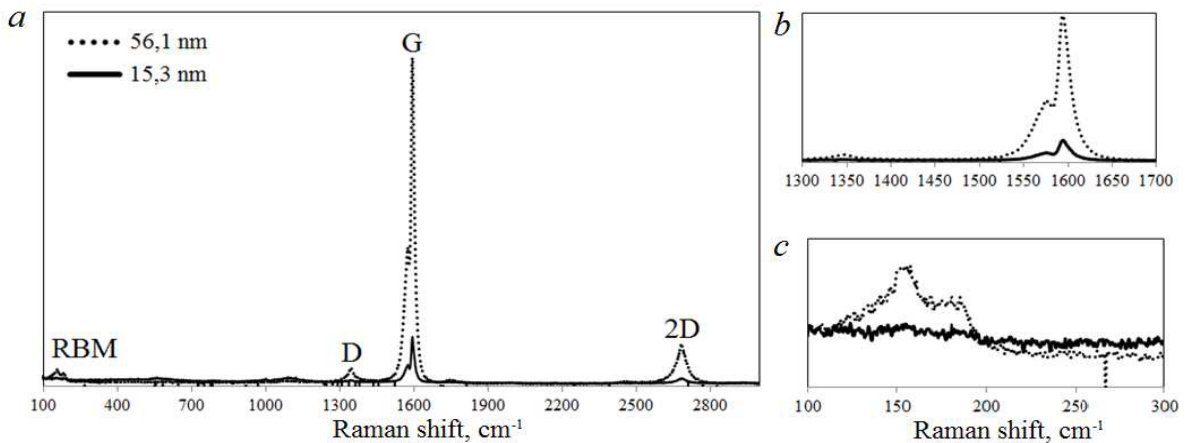


Fig. 3. Raman spectra of SWCNT films with thickness of 15 and 50 nm (a), enlarged fragments of D and G peaks (b) and RBM (radial breathing mode) (c)

Рис. 3. Спектры комбинационного рассеяния пленок ОУНТ толщиной 15 и 50 нм (a), увеличенные фрагменты D и G пиков (b) и дыхательной RBM моды (c)

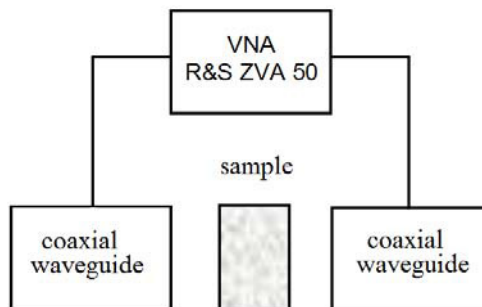
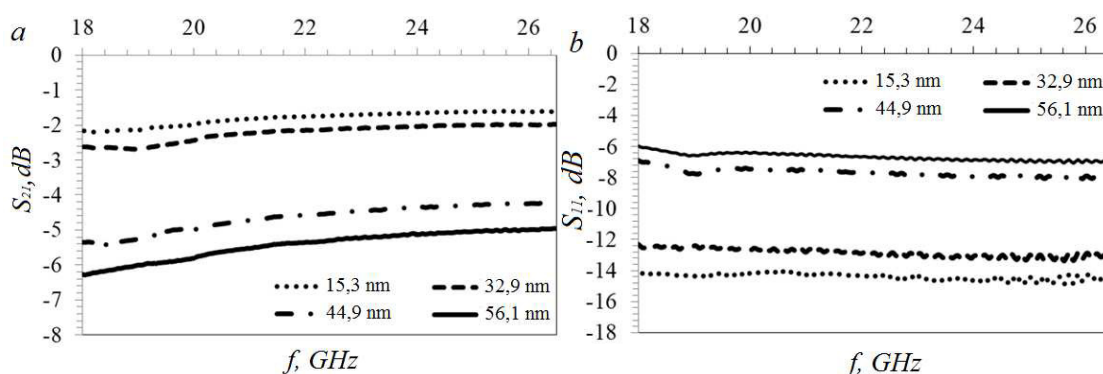


Fig. 4. Schematic representation of a measuring unit

Рис. 4. Схематическое изображение измерительной установки

Fig. 5. Spectral dependences of parameters S_{21} (a) and S_{11} (b) for SWCNT films of various thicknessesРис. 5. Спектральные зависимости параметров S_{21} (a) и S_{11} (b) для пленок ОУНТ различной толщины

On the basis on the fact that the sum of all radiation components is 1, it is possible to calculate the fraction of absorbed radiation according to the following equation:

$$A = 1 - T - R.$$

The dependence of transmission, reflection and absorption of SWCNT films of various thicknesses at the frequency of 18 GHz:

SWCNT film thickness, nm	T (18 GHz), %	R (18 GHz), %	A (18 GHz), %
15.3	60.8	4.1	34.6
32.9	54.8	5.8	39.4
44.9	29.2	20.4	50.4
56.1	23.6	25.2	51.2

The main model describing the relationship between the specific sheet resistances of thin films of non-magnetic materials is the continuous layer model [14]

$$SE(dB) = 20 \lg \left(1 + \frac{Z_0}{2R_s} \right). \quad (2)$$

Fig. 6 shows comparison of the experimentally obtained values of shielding efficiency at a frequency of 18 GHz from the sheet resistance of the coatings, calculated by the equation $SE(dB) = -10 \lg T$ of the surface resistance of SWCNT films at the boundaries of the studied range, and approximation of the experimental points by equation 2.

It can be seen from the graph that the results obtained are in agreement with the model, as a result of which it can be assumed that the shielding efficiency can be increased by reducing the surface resistance of SWCNT films. Single-walled carbon nanotubes can be doped and acquire either a hole [15] (doping with electron acceptors such as: HNO_3 , $FeCl_3$, $HAuCl_4$) or electron [16] conductivity (doping with electron donors: amines, phosphines, etc.). Initially SWCNT films have hole conductivity, as evidenced by the sign of the Seebeck coefficient (+40 mV at room temperature) [9]. As it can be seen from equation 2, lowering the sheet resistance due to doping to the value of 50 Ohm / sq helps to increase the shielding efficiency to the value of 13.5 dB or transmission of not more than 4.5 %, so the remaining 95.5 % of the power will be absorbed in the film and partially reflected back.

This fact indicates the promise of using transparent SWCNT films in solving the problem of shielding microwave electromagnetic radiation.

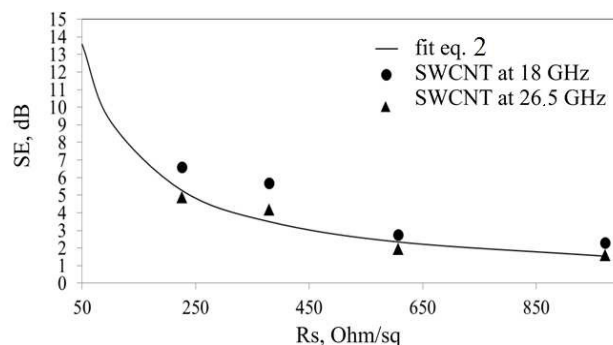


Fig. 6. Shielding efficiency as a function of sheet resistance for SWCNT films at the boundaries of the studied range

Рис. 6. Зависимость эффективности экранирования от величины поверхностного сопротивления для пленок ОУНТ на границах исследуемого диапазона

Conclusion: The electromagnetic shielding properties of thin SWCNT films on flexible PET (polyethylene terephthalate) substrates were studied. The contributions of reflection and absorption are determined. The absorption of radiation is the predominant factor in attenuation of radio emission in the studied K range (18–26.5 GHz). Increasing the film thickness from 15.9 nm to 56.1 nm increases the fraction of absorbed radiation from 34.6 to 51.2 % at the frequency of 18 GHz.

Acknowledgement. The work was supported by 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

- Zhu M., Xiong C., Lee Q. Research on ITO transparent electromagnetic shielding coatings for E-O system. *Proc. of SPIE*. 2009, Vol. 6722, P. 1–7.

2. Choi Y.-J., Gong S. C., Johnson D. C. et al. Characteristics of the electromagnetic interference shielding effectiveness of Al-doped ZnO thin films deposited by atomic layer deposition. *Applied Surface Science*. 2013, Vol. 269, P. 92–97.
3. Xu H., Anlage S. M., Hu L., Gruner G. Microwave shielding of transparent and conducting single-walled carbon nanotube films. *Applied Physics Letters*. 2007, Vol. 90, P. 183119.
4. Hong S. K., Kim K. Y., Kim T. Y. et al. Electromagnetic interference shielding effectiveness of monolayer grapheme. *Nanotechnology*. 2012, Vol. 23, P. 455704.
5. Zhang H.-L., Xia Y., Gai J.-G. Ultrathin Active Layer for Transparent Electromagnetic Shielding Window. *ACS Omega*. 2018, Vol. 3, P. 2765–2772.
6. Electromagnetic Interference (EMI) Transparent Shielding of Reduced Graphene Oxide (RGO) Interleaved Structure Fabricated by Electrophoretic Deposition / S. Kim, J.-S. Oh, M.-G. Kim et al. // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2014, Vol. 620, P. 17647–17653.
7. Kim B. R., Lee H. K., Kim E., Lee S. H. et al. Intrinsic electromagnetic radiation shielding/absorbing characteristics of polyaniline-coated transparent thin films // *Synthetic Metals*. 2010, Vol. 160, P. 1838–1842.
8. Voronin A. S., Simunin M. M., Ivanchenko F. S. et al. Preparation and Investigation of Composite Transparent Electrodes of Poly (3, 4-ethylenedioxythiophene) Polystyrene Sulfonate/Single-Wall Carbon Nanotubes. *Technical Physics Letters*. 2017, Vol. 43, No. 9, P. 783–786.
9. Tambasov I. A., Voronin A. S., Evsevskaya N. P. et al. Structural and Thermoelectric Properties of Optically Transparent Thin Films Based on Single-Walled Carbon Nanotubes. *Physics of the Solid State*. 2018, Vol. 60, No. 12, P. 2649–2655.
10. Volochaev M. N., Komogortsev S. V., Myagkov V. G. et al. Structural and Magnetic Characteristics of Nanogranular Co–Al₂O₃ Single- and Multilayer Films Formed by the Solid-State Synthesis. *Physics of the Solid State*. 2018, Vol. 60, No. 7, P. 1425–1431.
11. Wu Z., Chen Z., Du X., J. M. Logan et al. Transparent, conductive carbon nanotube films. *Science*. 2004, Vol. 305, No. 5688, P. 1273–1276.
12. Dresselhaus M. S., Dresselhaus G., Saito R., Jorio A. Raman spectroscopy of carbon nanotubes. *Phys. Rep.* 2005, Vol. 409, No. 2, P. 47–99.
13. Chortos A., Pochorovski I., Lin P. et al. Universal Selective Dispersion of Semiconducting Carbon Nanotubes from Commercial Sources Using a Supramolecular Polymer. *ACS Nano*. 2017, Vol. 11, P. 5660–5669.
14. Wan Y.-J., Zhu P.-L., Yu S.-H. et al. Graphene paper for exceptional EMI shielding performance using large-sized graphene oxide sheets and doping strategy. *Carbon*. 2017, Vol. 122, P. 74–81.
15. Hecht D. S., Hu L. B., Irvin G. Emerging Transparent Electrodes Based on Thin Films of Carbon Nanotubes, Graphene, and Metallic Nanostructures. *Adv. Mater.* 2011, Vol. 23, P. 1482–1513.
16. Brownlie L., Shapter J. Advances in carbon nanotube n-type doping: Methods, analysis and applications. *Carbon*. 2018, Vol. 126, P. 257–270.

Библиографические ссылки

1. Zhu M., Xiong C., Lee Q. Research on ITO transparent electromagnetic shielding coatings for E-O system // Proc. of SPIE. 2009. Vol. 6722. P. 1–7.
2. Characteristics of the electromagnetic interference shielding effectiveness of Al-doped ZnO thin films deposited by atomic layer deposition / Y.-J. Choi, S. C. Gong, D. C. Johnson et al. // *Applied Surface Science*. 2013. Vol. 269. P. 92–97.
3. Microwave shielding of transparent and conducting single-walled carbon nanotube films / H. Xu, S. M. Anlage, L. Hu, G. Gruner // *Applied Physics Letters*. 2007. Vol. 90. P. 183119.
4. Electromagnetic interference shielding effectiveness of monolayer grapheme / S. K. Hong, K. Y. Kim, T. Y. Kim et al. // *Nanotechnology*. 2012. Vol. 23. P. 455704.
5. Zhang H.-L., Xia Y., Gai J.-G. Ultrathin Active Layer for Transparent Electromagnetic Shielding Window // *ACS Omega*. 2018. Vol. 3. P. 2765–2772.
6. Electromagnetic Interference (EMI) Transparent Shielding of Reduced Graphene Oxide (RGO) Interleaved Structure Fabricated by Electrophoretic Deposition / S. Kim, J.-S. Oh, M.-G. Kim et al. // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2014. Vol. 620. P. 17647–17653.
7. Intrinsic electromagnetic radiation shielding/absorbing characteristics of polyaniline-coated transparent thin films / B. R. Kim, H. K. Lee, E. Kim, S. H. Lee et al. // *Synthetic Metals*. 2010. Vol. 160. P. 1838–1842.
8. Preparation and Investigation of Composite Transparent Electrodes of Poly (3,4-ethylenedioxythiophene) Polystyrene Sulfonate/Single-Wall Carbon Nanotubes / A. S. Voronin, M. M. Simunin, F. S. Ivanchenko et al. // *Technical Physics Letters*. 2017. Vol. 43, № 9. P. 783–786.
9. Структурные и термоэлектрические свойства оптически прозрачных тонких пленок на основе одностенных углеродных нанотрубок / И. А. Тамбасов, А. С. Воронин, Н. П. Евсевская и др. // *Физика твердого тела*. 2018. Т. 60, вып. 12. С. 2456–2462.
10. Структурные и магнитные характеристики однослойных и многослойных наногранулированных пленок Co–Al₂O₃, полученных методом твердофазного синтеза / М. Н. Волочаев, С. В. Комогорцев, В. Г. Мягков и др. // *Физика твердого тела*. 2018. Т. 60, вып. 7. С. 1409–1415.
11. Transparent, conductive carbon nanotube films / Z. Wu, Z. Chen, X. Du et al. // *Science*. 2004. Vol. 305, No. 5688. P. 1273–1276.
12. Raman spectroscopy of carbon nanotubes / M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, R. Saito, A. Jorio // *Phys. Rep.* 2005. Vol. 409, № 2. P. 47–99.
13. Universal Selective Dispersion of Semiconducting Carbon Nanotubes from Commercial Sources Using a Supramolecular Polymer / A. Chortos, I. Pochorovski, P. Lin et al. // *ACS Nano*. 2017. Vol. 11. P. 5660–5669.

14. Graphene paper for exceptional EMI shielding performance using large-sized graphene oxide sheets and doping strategy / Y.-J. Wan, P.-L. Zhu, S.-H. Yu et al. // Carbon. 2017. Vol. 122. P. 74–81.

15. Hecht D. S., Hu L. B., Irvin G. Emerging Transparent Electrodes Based on Thin Films of Carbon Nanotubes, Graphene, and Metallic Nanostructures // Adv. Mater. 2011. Vol. 23. P. 1482–1513.

16. Brownlie L., Shapter J. Advances in carbon nanotube n-type doping: Methods, analysis and applications // Carbon. 2018. Vol. 126. P. 257–270.

© Voronin A. S., Fadeev Yu. V., Simunin M. M., Podshivalov I. V., Khartov S. V., 2019

Voronin Anton Sergeevich – Ph. D., researcher Department of Molecular Electronics; FRC KSC SB RAS. E-mail: a.voronin1988@mail.ru.

Fadeev Yurii Vladimirovich – junior researcher Department of Molecular Electronics; FRC KSC SB RAS.

Simunin Mikhail Maksimovich – Ph. D, researcher Department of Molecular Electronics; FRC KSC SB RAS, Siberian Federal University.

Podshivalov Ivan Valerevich – junior researcher Laboratory of Scientific Instrumentation; L. V. Kirensky Institute of Physics.

Khartov Stanislav Viktorovich – Ph. D, Senior Researcher Department of Molecular Electronics; FRC KSC SB RAS.

Антон Сергеевич Воронин – кандидат технических наук, научный сотрудник отдела молекулярной электроники; ФИЦ КНЦ СО РАН. E-mail: a.voronin1988@mail.ru.

Фадеев Юрий Владимирович – младший научный сотрудник отдела молекулярной электроники; ФИЦ КНЦ СО РАН.

Симунин Михаил Максимович – кандидат технических наук, научный сотрудник отдела молекулярной электроники; ФИЦ КНЦ СО РАН, Сибирский федеральный университет.

Подшивалов Иван Валерьевич – младший научный сотрудник лаборатории научного приборостроения; Институт физики имени Л. В. Киренского.

Хартов Станислав Викторович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела молекулярной электроники; ФИЦ КНЦ СО РАН.

UDC 004.07

Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-485-496

For citation: Sahansky S. P., Yulenkov S. E. Contact algorithm measurement method for current crystals area grown by Czokhralski method. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2019, Vol. 20, No. 4, P. 485–496. Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-485-496

Для цитирования: Саханский С. П., Юленков С. Е. Алгоритм контактного метода измерения текущей площади кристаллов, выращиваемых способом Чохральского // Сибирский журнал науки и технологий. 2019. Т. 20, № 4. С. 485–496. Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-485-496

CONTACT ALGORITHM MEASUREMENT METHOD FOR CURRENT CRYSTALS AREA GROWN BY CZOKHRALSKI METHOD

S. P. Sahansky, S. E. Yulenkov*

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

For crystals grown from the liquid melt according to the Czochralski method when monitoring and controlling the current crystal area based on the contact measurement method, the requirements for improving the accuracy of measuring the crystal area on the cylindrical part of the growth are determined.

To eliminate errors due to the accuracy of stabilization of the melt level in the crucible, an algorithm for the operation of the crystal growing unit is proposed which is performed by the programm using the control system.

The evaluation time of the control signal on the growing crystal cylindrical part is taken as the sampling time of a given number of crucible movement pulses.

The calculation of the control signal starts at the time of the melt level sensor closure, the calculation of the control signal ends at the time of the melt level sensor closure as well, provided that a given number of crucible movement pulses is sampled.

The control signal evaluation time in the previous control cycle is used in the current cycle to calculate the melt level sensor closing and opening pause.

In the control system at the moment of the contact sensor closure a pause of the closed and the same subsequent pause of the open state of the level sensor is held.

During pauses, the status of the contact sensor is not analyzed by the control system and the control of the crucible ascent occurs at a slowed down and accelerated rate of the crucible ascent during “conditionally” closed and “conditionally” open states of the level sensor.

The control system is permanently reset at the end of each control cycle.

The program control system provides the above algorithm for controlling the process of growing crystals from the liquid melt according to the Czochralski method, at the same time the accuracy of determining the current area of the grown crystal is about 1 %.

Keywords: growth, crystals, melt level sensor.

АЛГОРИТМ КОНТАКТНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ ПЛОЩАДИ КРИСТАЛЛОВ, ВЫРАЩИВАЕМЫХ СПОСОБОМ ЧОХРАЛЬСКОГО

С. П. Саханский, С. Е. Юленков*

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

Для кристаллов, выращиваемых из жидкого расплава по способу Чохральского, при контроле и управлении текущей площадью кристалла на основе контактного метода измерения, определены требования для повышения точности измерения площади кристалла на цилиндрической части выращивания.

Для устранения ошибки из-за точности стабилизации уровня расплава в тигле предложен алгоритм работы установки выращивания кристаллов, выполняемый программно с помощью системы управления.

За время оценки сигнала управления на цилиндрической части выращиваемого кристалла принимается время выборки заданного количества импульсов перемещения тигля.

Начинается вычисление сигнала управления в момент замыкания датчика уровня расплава, заканчивается вычисление сигнала управления так же в момент замыкания датчика уровня расплава при условии выборки заданного количества импульсов перемещения тигля.

Время оценки сигнала управления в предыдущем цикле управления используется в текущем цикле для вычисления паузы замыкания и размыкания датчика уровня расплава.

В системе управления в момент замыкания контактного датчика выдерживается пауза замкнутого и последующая пауза разомкнутого состояния датчика уровня.

В моменты пауз состояние контактного датчика системой управления не анализируется и управление подъемом тигля происходит с замедленной и ускоренной скоростью подъема тигля в моменты «условно» замкнутого и «условно» разомкнутого состояний датчика уровня.

Система управления постоянно обнуляется в момент завершения каждого цикла управления.

Программная система управления обеспечивает приведенный выше алгоритм управления процессом выращивания из жидкого расплава кристаллов по способу Чохральского, при этом достигается точность определения текущей площади выращиваемого кристалла порядка 1 %.

Ключевые слова: выращивание, кристаллы, датчик уровня расплава.

Introduction The method for controlling the growing process of a single crystal according to the “Czohralski” method is proposed in the work [1], based on the use of a template simulating a crystal of a given shape as a programmer. The crucible with melt and the container with liquid are placed on the upper cup laboratory scales. In the process of growth the template is immersed in the liquid at the same speed as the crystal is drawn from the melt. The template and crystal are connected by a flexible rod. The equilibrium is maintained if the amount of the solid phase and the liquid displaced by the template per a time unit is the same. In case of imbalance (reduction or increase in the crystal diameter), the error signal of the scales after the optoelectronic converter and amplification is used as a programming one for the heater temperature control with the signal from the thermocouple.

A continuously decreasing level of the melt in the crucible is controlled by a laser meter in the device [2] when drawing a single crystal of a given diameter. The signal from the laser melt level meter is compared with a programmable level change setup unit, and the difference signal after this comparison is used to correct the melt temperature through the heater power regulator and the crystal drawing speed.

Microprocessor control systems for the growth of germanium crystals, developed on the basis of patents [3; 4], were introduced into the semiconductor production of germanium crystals growing (fig. 1), in turn, this development is an analogue of the control systems given in [1; 2].

The work of programmable control systems based on the contact method for measuring the current area of the grown crystals (fig. 1) is as follows: under the control system monitoring, a crystal with d diameter is grown in the chamber with growing rates V_3 and crystal rotation W_3 , while the molten metal located in the crucible with an inner diameter D rotates with an angular velocity W_T with decreasing melt in the crucible.

The signal from the contact sensor is supplied through the smoothing filter C1, R1, R2 and the computer matching unit to decide on the control of the crucible lifting, which is carried out by means of the step motor control unit.

In addition to the crucible lifting speed V_T , the information is generated in the system on the movement of the crucible $X_{\text{тпц}}$ (with discreteness x_T) and information $X_{\text{изп}}$ on the movement of the crystal (with discreteness x_T) using the crucible and seed displacement sensors.

Computer control of the crystal growth rates V_3 , crystal rotation W_3 , crucible rotation W_T is carried out through appropriate drives. The melt temperature control is carried out on the basis of the formation of the temperature T_3 set from the computer to the temperature controller based on the temperature sensor of the heater side surface.

The basic principles of the control system at the contact method of current crystal area measuring. The control of the crystal growth rate $V_3(x)$, the temperature of the heater side surface $T_3(x)$, the rotation speed of the crystal $W_3(x)$ and the crucible $W_T(x)$ is formed on the basis of expressions (1–4):

$$V_3(x) = V_{3\text{п}}(x) + Z \cdot K_V \cdot y, \quad (1)$$

$$T_3(x) = T_{3\text{п}}(x) + Z \cdot A_T \cdot \int y \cdot dx, \quad (2)$$

$$W_3(x) = W_{3\text{п}}(x), \quad (3)$$

$$W_T(x) = W_{T\text{п}}(x), \quad (4)$$

where K_V – the proportional speed regulation coefficient; A_T – the integral coefficient of temperature control; $V_{3\text{п}}(x)$, $W_{3\text{п}}(x)$, $W_{T\text{п}}(x)$, $T_{3\text{п}}(x)$, – program specification of the law of technological parameters change; $V_3(x)$, $W_3(x)$, $W_T(x)$, $T_3(x)$ – general control of technological parameters; Z – the sign of control capture by diameter on the cylindrical part of the crystal; x – the displacement along the axis of the crystal; y – the control signal for the deviation of the current area of the grown crystal from the given.

The process of stabilizing the crystal diameter occurs in the control system in accordance with expressions (1)–(2), when the sign of capturing control by diameter ($Z = 1$) on the cylindrical part of the crystal is included, based on the control signal y . If we specify the geometry of the grown crystal and its axial gradient in the solid part, then it is possible to pre-simulate the setting of the speed and temperature of growth in all sections of the crystal according to the model [5].

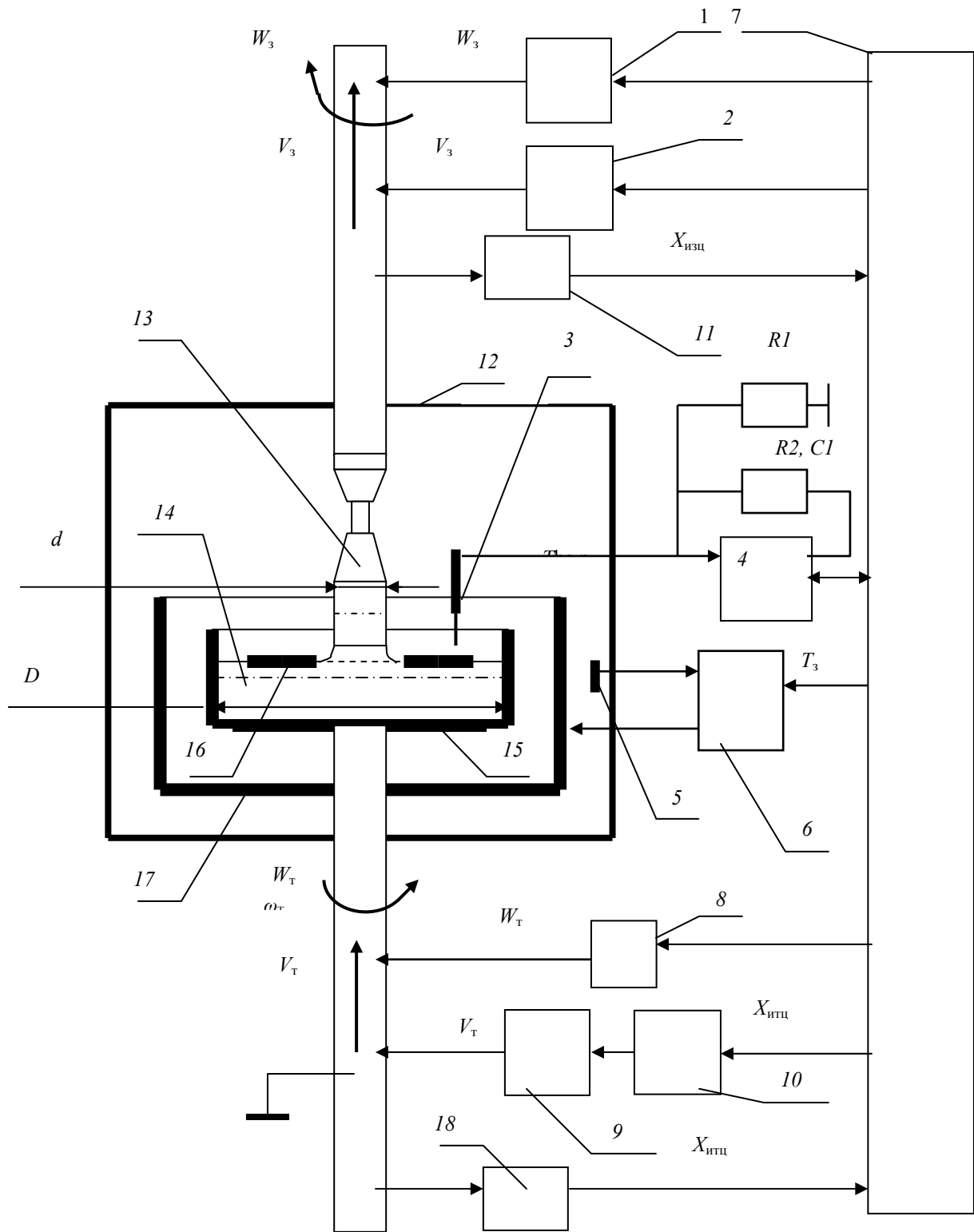


Fig. 1. Control system based on the contact method of measurement:
 1 – seed rotation drive; 2 – seed drive; 3 – contact sensor; 4 – coordination unit with a computer; 5 – temperature sensor;
 6 – temperature regulator; 7 – the computer; 8 – rotational drive of the crucible; 9 – stepper motor; 10 – stepper
 motor control unit; 11 – the sensor of seed movement; 12 – the chamber; 13 – ingot; 14 – melt of metal; 15 – crucible;
 16 – screen; 17 – heater; 18 – crucible displacement sensor

Рис. 1. Система управления на основе контактного метода измерения:
 1 – привод вращения затравки; 2 – привод перемещения затравки; 3 – контактный датчик; 4 – блок согласования
 с ЭВМ; 5 – датчик температуры; 6 – регулятор температуры; 7 – ЭВМ; 8 – привод вращения тигля; 9 – шаговый
 двигатель; 10 – блок управления шаговым двигателем; 11 – датчик перемещения затравки; 12 – камера;
 13 – слиток; 14 – расплав металла; 15 – тигель; 16 – экран; 17 – нагреватель; 18 – датчик перемещения тигля

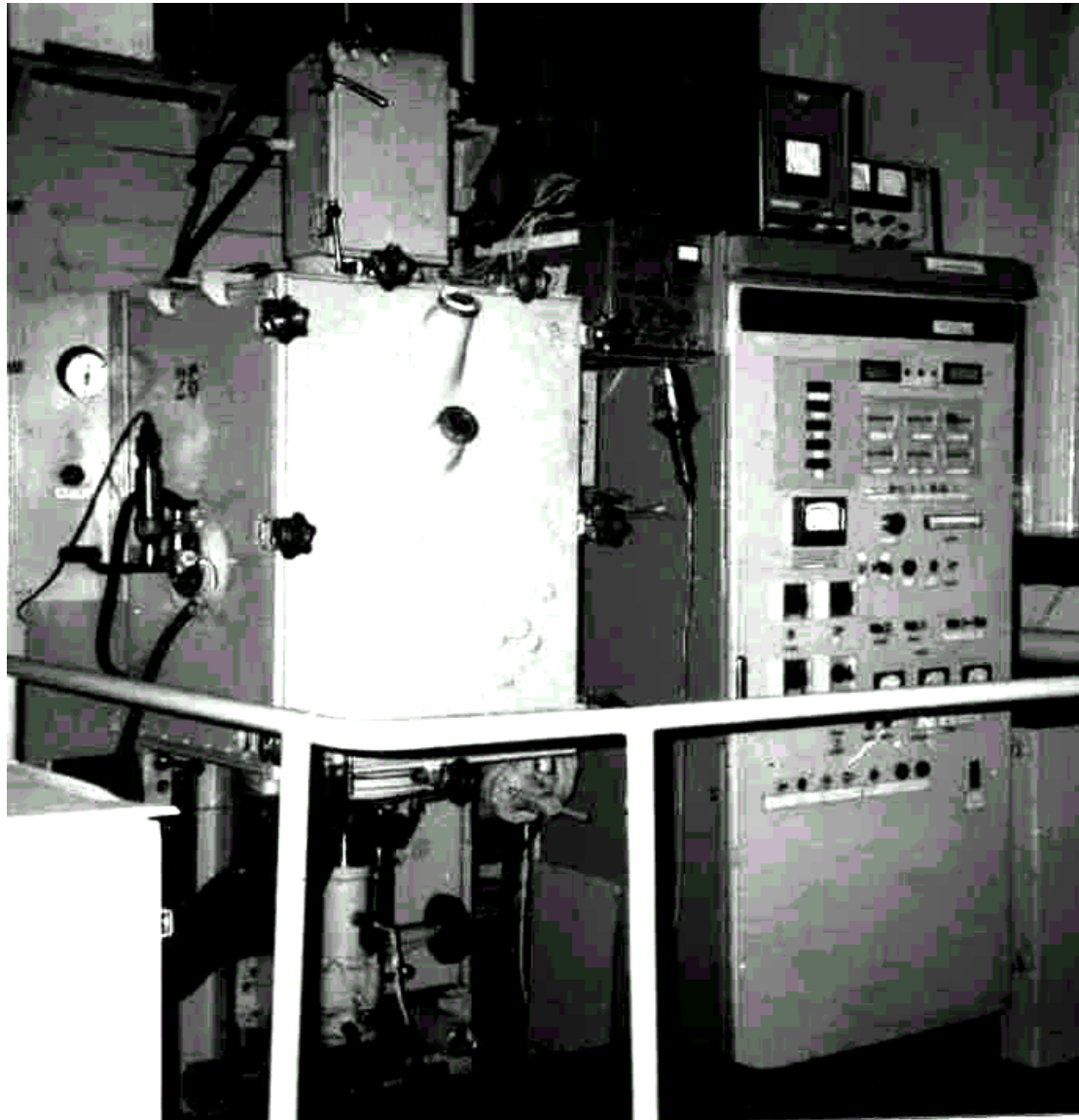


Fig. 2. Microprocessor control system for drawing germanium single crystals

Рис. 2. Микропроцессорная система управления
вытягиванием монокристаллов германия

The design of the programmable automatic control system for germanium crystal drawing is shown in fig. 2–4 show a view of a floating graphite screen with a melt level sensor and a view of a grown crystalline germanium billet with a diameter of 104 mm.

The basis for the contact method for crystal growth control and management on the cylindrical part [6–15] is the current area management (or diameter when round) of the growing crystal according to the control signal y , calculated as a function of the deviation of the current crystal area from the given one, using crystal $X_{\text{ш}}$ and crucible $X_{\text{т}}$ displacements for the period $T_{\text{ш}}$ of the control signal y estimate.

The shape of the grown crystal directly depends on the accuracy of determining the control signal y and the absence of significant interference in the calculated value.

The speed of the melt decrease in the crucible V_p , as well as the accelerated speed of the crucible lifting $V_{\text{т}}$ after opening the contact sensor and the slowed lifting speed of the crucible after closing the contact sensor $V_{\text{т}}/M$ are determined by the expressions (5–9), in which the speed increase coefficients ($C = 4$) and the crucible lifting speed decrease ($M = 4$), which has been applied in growing the cylindrical part of the crystal and provides periodic closure and opening of the contact sensor in the range of melt level change of about 1–2 μm .

When growing the crystal forward and reverse cones, the condition for the complete stop of the crucible rise, when the melt level sensor is closed ($M = \infty$), is used to control the speed of the crucible moving upward.

$$V_p = V_3 \cdot \frac{\rho_T}{\rho_{ж}} \cdot \left[\frac{d}{D} \right]^2, \quad (5)$$

$$V_T = V_{TM} = V_p \cdot \left[\frac{d_{max}}{d} \right]^2 = V_3 \cdot \frac{\rho_T}{\rho_{ж}} \cdot \left[\frac{d_{max}}{D} \right]^2, \quad (6)$$

$$d_{max} = d_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{1-1/C}}, \quad (7)$$

$$V_T = \frac{V_{TM}}{M} = V_p \cdot \left[\frac{d_{min}}{d} \right]^2 = V_3 \cdot \frac{\rho_T}{\rho_{ж}} \cdot \left[\frac{d_{min}}{D} \right]^2, \quad (8)$$

$$d_{min} = d_{max} \cdot \frac{1}{\sqrt{M}}, \quad (9)$$

where V_T – the crucible lifting speed; V_p – the speed of the melt decrease in the crucible; V_3 – the crystal growth speed; d – the current crystal diameter; D – the inner diameter of the crucible; ρ_T – the specific density of solid material; $\rho_{ж}$ – the specific density of liquid material; d_1 – the specified diameter of the grown crystal on the cylindrical part; d_{max} – the maximum permissible diameter of the grown crystal, with which compliance the main condition under which the sensor and screen close after opening is fulfilled; d_{min} – the minimum permissible value of the crystal diameter at which the condition of the screen lagging behind the sensor after its closed state is observed.

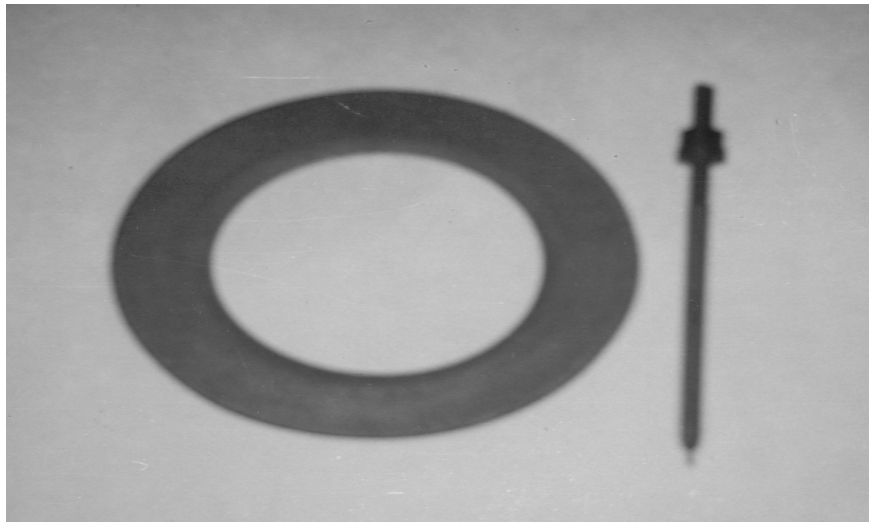


Fig. 3. Floating graphite screen and melt level sensor

Рис. 3. Плавающий графитовый экран и датчик уровня расплава

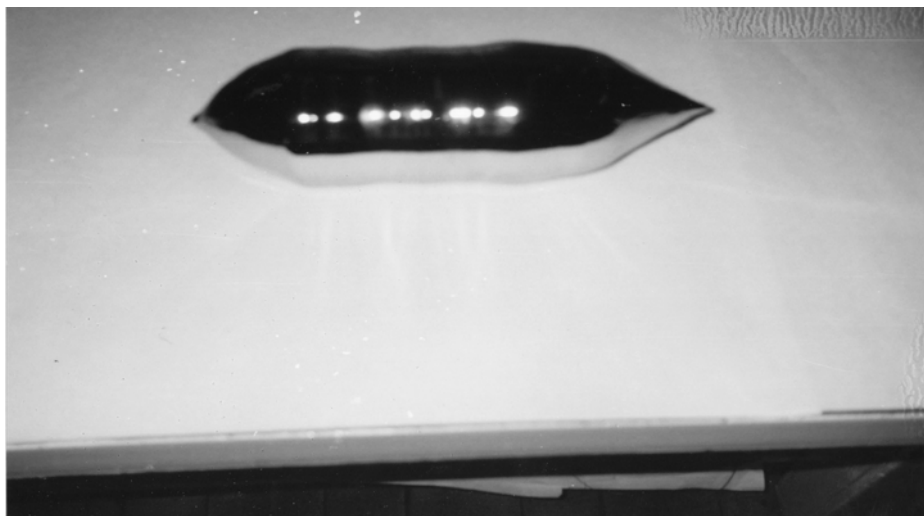


Fig. 4. A germanium billet with a diameter of 104 mm

Рис. 4. Слиток германия диаметром 104 мм

For the contact measurement method the control signal y , the movement value of the seed $X_{3и}$ and the crucible $X_{тн}$ during the evaluation time $T_{и}$ can be represented in the form of expressions (10–14):

$$y = X_{тн} \cdot \frac{K_y}{A \cdot B} - \frac{X_{3и}}{A}, \quad (10)$$

$$K_y = B \cdot \frac{x_T \cdot \rho_{ж}}{x_3 \cdot \rho_T} \cdot \left[\frac{D}{d_1} \right]^2, \quad (11)$$

$$y = \frac{X_{3и}}{A} \cdot \left(\left[\frac{d}{d_1} \right]^2 - 1 \right), \quad (12)$$

$$X_{3и} = X_{изц} \cdot x_3, \quad (13)$$

$$X_{тн} = X_{тц} \cdot x_T, \quad (14)$$

where A, B – scaling coefficients; K_y – the setting of a given diameter (area) of the grown crystal; $X_{изц}$ – the seed movement with the reference discreteness x_3 ; $X_{тц}$ – the crucible movement with reference discreteness x_T ; x_3 – the reference discreteness of the seed movement; x_T – the reference discreteness of the crucible movement.

Expression (12) shows the direct relationship of the control signal y with the deviation of the current crystal area from the given one.

During the evaluation cycle $T_{и}$, the control signal y is calculated in the control system by expression (10), and using the recording in the control system the settings of the diameter K_y , on the cylindrical part of the grown crystal, the growing area is set.

An open step drive with a stepper motor is used as a crucible lifting drive for upward lifting speed control, providing a process of repeatedly changing crucible lifting speed according to the signal from the contact level sensor.

The expressions for the movement pulses of the seed $X_{изц}$, crucible $X_{тц}$ and time $T_{и}$ of the control signal estimate y can be represented in the form of expressions (15–16):

$$X_{изц} = \frac{X_{тц} \cdot K_y}{B}, \quad (15)$$

$$T_{и} = \frac{X_{изц} \cdot x_3}{V_3} = \frac{X_{3и}}{V_3} = \frac{X_{тц} \cdot K_y \cdot x_3}{B \cdot V_3}, \quad (16)$$

where $T_{и}$ – control signal evaluation period (working time of a given number of pulses $X_{тц}$ or $X_{изц}$).

Let us take as the evaluation time $T_{и}$ of the control signal y on the cylindrical part of the grown crystal the sample time of the specified number of pulses movement of the crucible $X_{тн}$ (in the process of melt decrease in the crucible) in accordance with expressions (17–18):

$$X_{тн} = X_{3и} \cdot \frac{\rho_T}{\rho_{ж}} \cdot \left[\frac{d_1}{D} \right]^2, \quad (17)$$

$$T_{и} = \frac{X_{тн}}{V_3} \cdot \left[\frac{D}{d_1} \right]^2, \quad (18)$$

The total movement time t in the process of closing the contact sensor with a slowed down speed and the total movement time with the accelerated speed of the crucible after opening the sensor $t_{д}$, as well as the number of cycles $K_{и}$ for closing and opening the sensor during the evaluation period of the control signal $T_{и}$ can be represented in the form of expressions (19–20):

$$t_{д}(d) = t \cdot \frac{\left[1 - \left(\frac{d_{\min}}{d} \right)^2 \right]}{\left[\left(\frac{d_{\max}}{d} \right)^2 - 1 \right]}, \quad (19)$$

$$K_{и} = \frac{T_{и}}{(t_{д} + t)}, \quad (20)$$

where t – the time of the crucible movement with a slowed-down speed V_{TM}/M after the sensor is closed during the evaluation period of the control signal; $t_{д}$ – the time of the crucible movement with an accelerated speed V_{TM} after opening the sensor during the evaluation period of the control signal; $K_{и}$ – the number of cycles of closing and opening the sensor during the time $T_{и}$.

The accuracy of the contact method for measuring the current area of the grown crystal. In the control system of the germanium drawing unit under consideration, a timing control diagram was applied (fig. 5) when growing the cylindrical part of the crystal, which means that at the moment of contact sensor closure in the control system it is necessary to withstand a program pause τ of the closed and the subsequent pause τ of the open state of the level sensor.

At pauses of τ , the state of the contact sensor is not analyzed by the control system and the crucible lift control is performed with the slow and accelerated crucible lifting speed at the moments of “conditionally” closed and “conditionally” open states of the level sensor.

After holding two pauses, the conditions of the closure of the melt level sensor are analyzed and the drive for moving the crucible up is controlled.

This control increases the noise immunity of the method of calculating the current area on the cylindrical part of the grown crystal due to the lack of system response to the operation of the contact sensor during two pauses.

The opening value of the melt level on the cylindrical part of the grown crystal L_p is set within 1 μm . The pause time τ and the $t_{дм}(d)$ time of the sensor closure (after two pauses) can be represented in the form of expressions (21–22) provided that the melt sensor is opened by the value L_p :

$$\tau = \frac{L_p \cdot T_{и}}{X_{тн} \cdot \left[\left(\frac{d_{\max}}{d_1} \right)^2 - 1 \right]}, \quad (21)$$

$$t_{дм}(d) = \tau \cdot \frac{\left[1 - \left(\frac{d_{\min}}{d} \right)^2 \right]}{\left[\left(\frac{d_{\max}}{d} \right)^2 - 1 \right]} - \tau, \quad (22)$$

where τ – the crucible movement time with a slow speed V_{TM}/M after the sensor closes (when the melt decreases by L_p); $t_{DM}(d)$ – the crucible movement time with accelerated speed V_{TM} after two pauses are held τ until the sensor closes.

The error r in the calculation of the control signal, depending on the accuracy of stabilization of the melt level in the crucible, can be represented in the form

of expression (23), which is graphically presented in fig. 6:

$$r = \frac{x \cdot \rho_{ж}}{x_3 \cdot \rho_{\tau}} \cdot \left[\frac{D}{d_1} \right]^2, \quad (23)$$

where r – an error in the calculation of the control signal for the measurement cycle; x – the accuracy of stabilization of the melt level in the crucible.

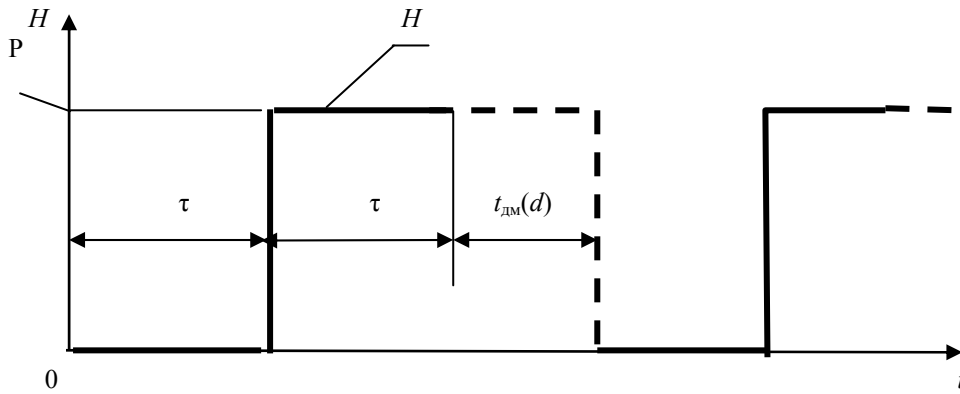


Fig. 5. Timing diagram of the level sensor:
H – operation of the contact level sensor (P – sensor open)

Рис. 5. Временная диаграмма работы датчика уровня:
H – работа контактного датчика уровня (P – датчик разомкнут)

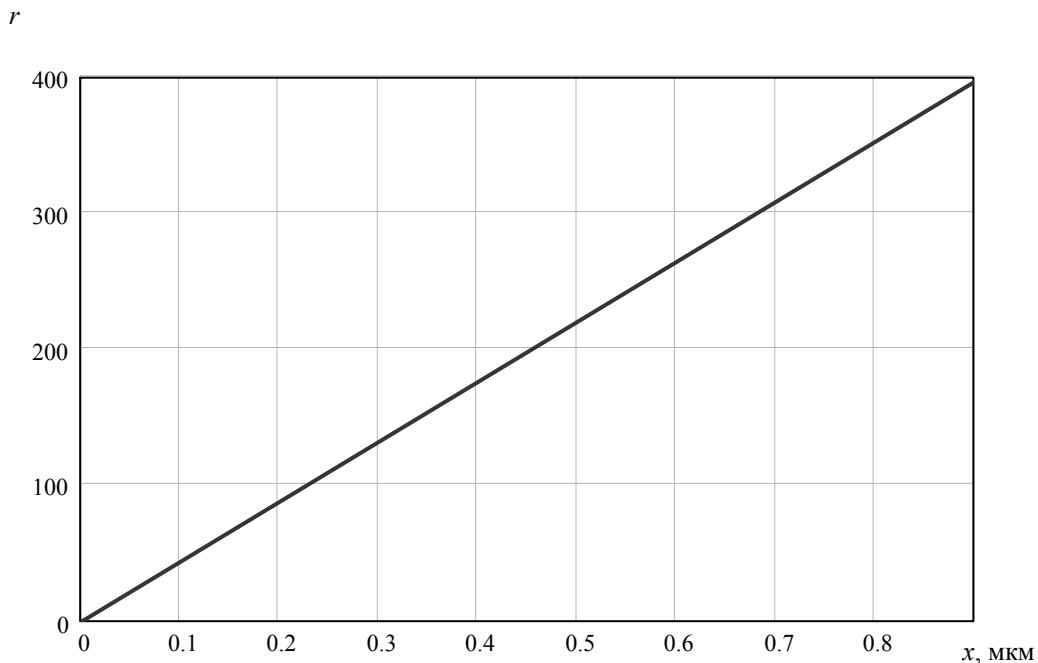
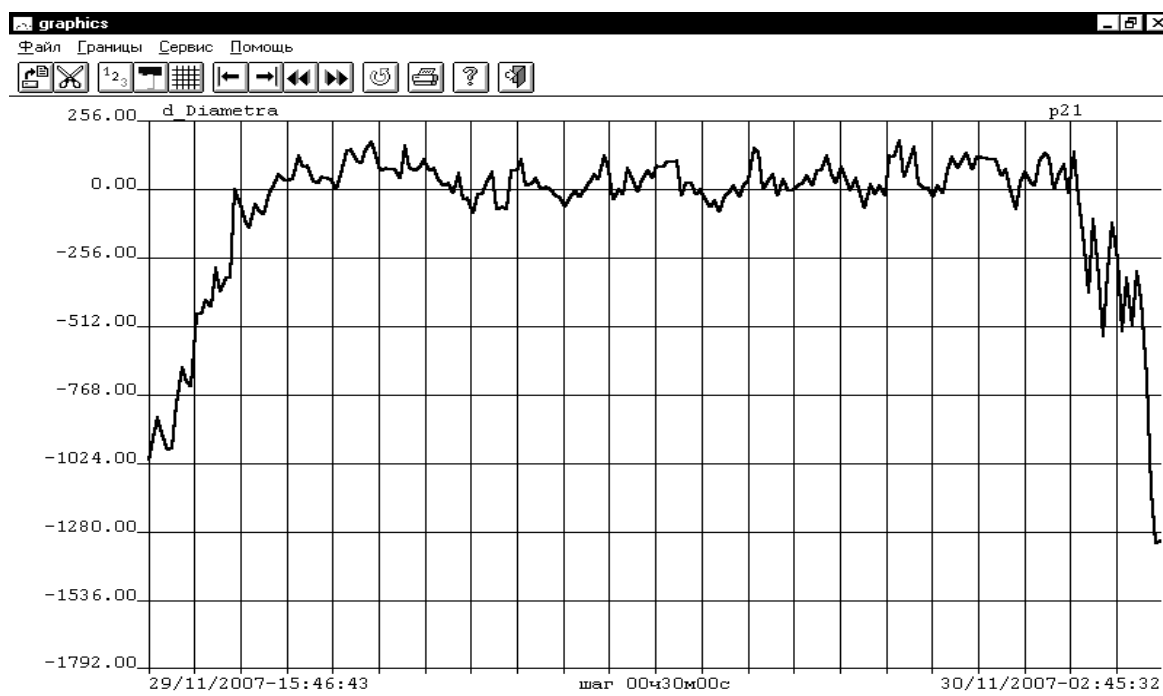


Fig. 6. The error of the control signal r , depending on the accuracy of stabilization of the melt level in the crucible x with: $x_3 = 0,0216 \text{ мкм}$; $d_1 = 100 \text{ мм}$; $D = 300 \text{ мм}$; $A = 1$; $\rho_{\tau} = 5,35 \text{ г/см}^2$; $\rho_{ж} = 5,57 \text{ г/см}^2$

Рис. 6. Погрешность сигнала управления r в зависимости от точности стабилизации уровня расплава в тигле x при: $x_3 = 0,0216 \text{ мкм}$; $d_1 = 100 \text{ мм}$; $D = 300 \text{ мм}$; $A = 1$; $\rho_{\tau} = 5,35 \text{ г/см}^2$; $\rho_{ж} = 5,57 \text{ г/см}^2$

Fig. 7. Control signal change graph y ($d_Diametra$)Рис. 7. График изменения сигнала управления y ($d_Diametra$)

The time dependence of the control signal y during an industrial installation operation is shown in fig. 7.

The algorithm for improving the accuracy of the contact method for measuring the current area of crystals. During the evaluation of the control signal y on the cylindrical part of the grown crystal, the sampling time of a given number of $X_{итцу}$ crucible movement pulses is taken from expression (24) with a sampling discreteness reference x_T , which corresponds to the evaluation time of the control signal $T_{цy}$ in accordance with expression (25). These parameters are calculated in each previous control cycle.

$$X_{итцу} = X_{зц} \cdot \frac{\rho_T}{\rho_ж} \cdot \left[\frac{d_1}{D} \right]^2 \cdot \frac{1}{x_T}, \quad (24)$$

$$T_{цy} = \frac{X_{итцу}}{V_3} \cdot \left[\frac{D}{d_1} \right]^2 \cdot x_T. \quad (25)$$

To eliminate the error due to the stabilization accuracy of the melt level in crucible r , the following program algorithm for the control system operation is proposed:

1. During the evaluation of the control signal y on the grown crystal cylindrical part, the sampling time for a given number of pulses of the crucible $X_{итцу}$ movement is taken according to expression (24) with discreteness reference x_T and the estimation time $T_{цy}$ according to expression (25).

2. The calculation of control signal y starts at the moment of the melt sensor closure, provided that a speci-

fied number of crucible $X_{итцу}$ movement pulses is sampled.

3. The calculation of the control signal y ends at the moment of the melt sensor closure, provided that the specified number of pulses of movement of the crucible $X_{итцу}$ movement is sampled.

4. The $T_{цy}$ evaluation time of the set number of pulses of the crucible $X_{итцу}$ movement in the previous control cycle is used in the current cycle to calculate the pause τ of closure and conditional opening of the melt level sensor according to the expressions (16, 21).

In each control cycle, the stabilization error of the melt level in crucible r is minimized due to its reset during the control cycle start (closure) of the melt level sensor.

The block diagram of the program of the above stated algorithm is shown in fig. 8–11 for diameters $d_1 = 80$ mm; $d_1 = 100$ mm; $d_1 = 120$ mm; and $X_{тц} = 68$ μm ; $X_{тц} = 107$ μm ; $X_{тц} = 154$ μm , respectively (at a given value of the melt level opening $L_p = 1$ μm), an example of calculating the control signal y is given.

Conclusion. For crystals grown from the liquid melt according to the Czochralski method, when monitoring the current crystal area based on the contact method for measuring the current crystal area, the requirements are identified to improve the accuracy of measuring the current crystal area on the cylindrical part of the grown crystal.

To eliminate the error due to the accuracy of stabilization of the melt level in the crucible, a program algorithm for the operation of the crystal growing unit is proposed, in which the time of the control signal y evaluation on the

cylindrical part of the grown crystal is taken as the sampling time of a given number of $X_{итцу}$ crucible movement pulses. The calculation of the evaluation time of the control signal y at the moment of closure of the melt sensor

starts, the calculation of the control signal y at the moment of closure of the melt sensor ends, provided that the specified number of crucible $X_{итцу}$ movement pulses is sampled.

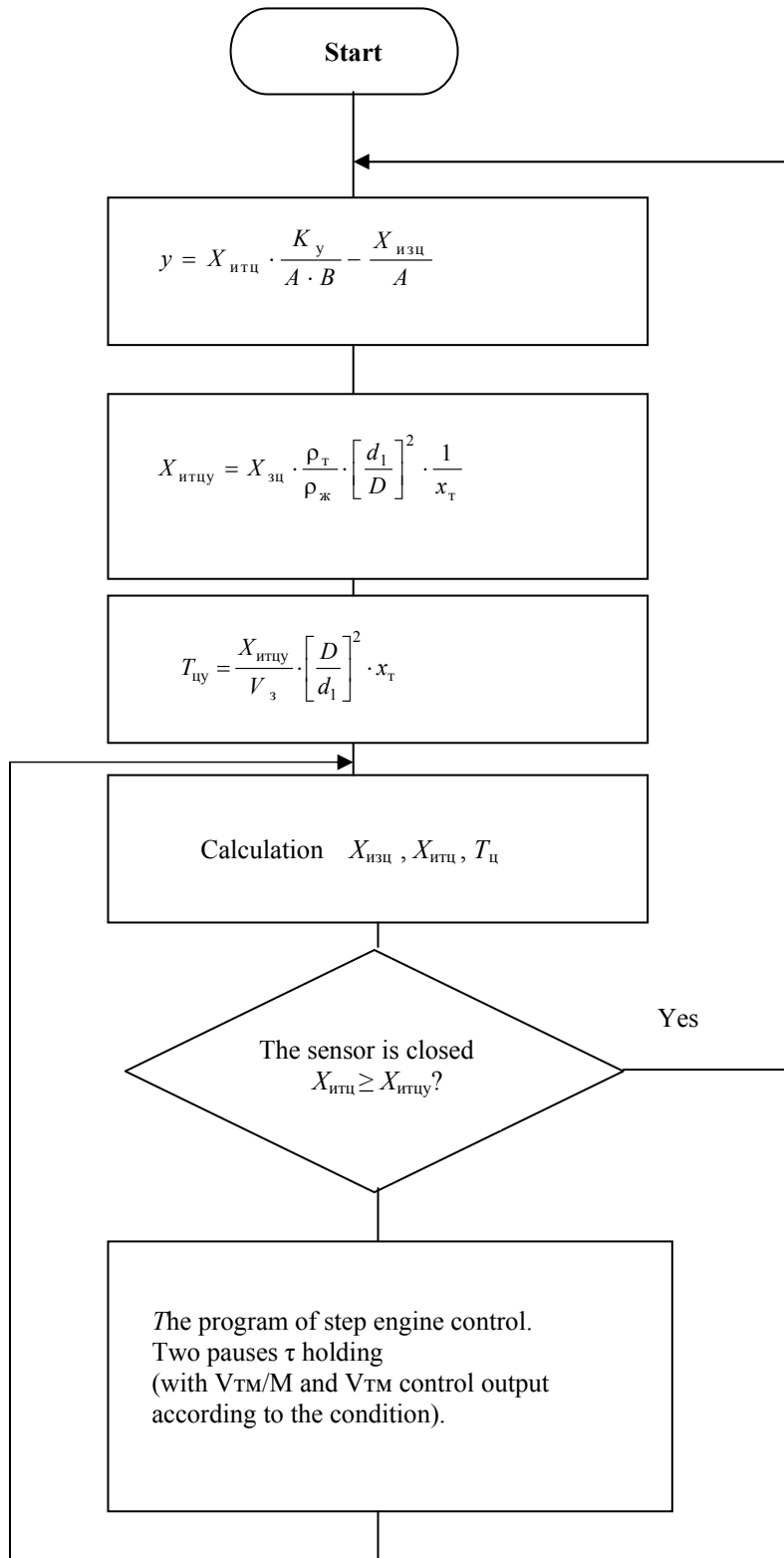


Fig. 8. Block diagram of the program

Рис. 8. Блок-схема программы

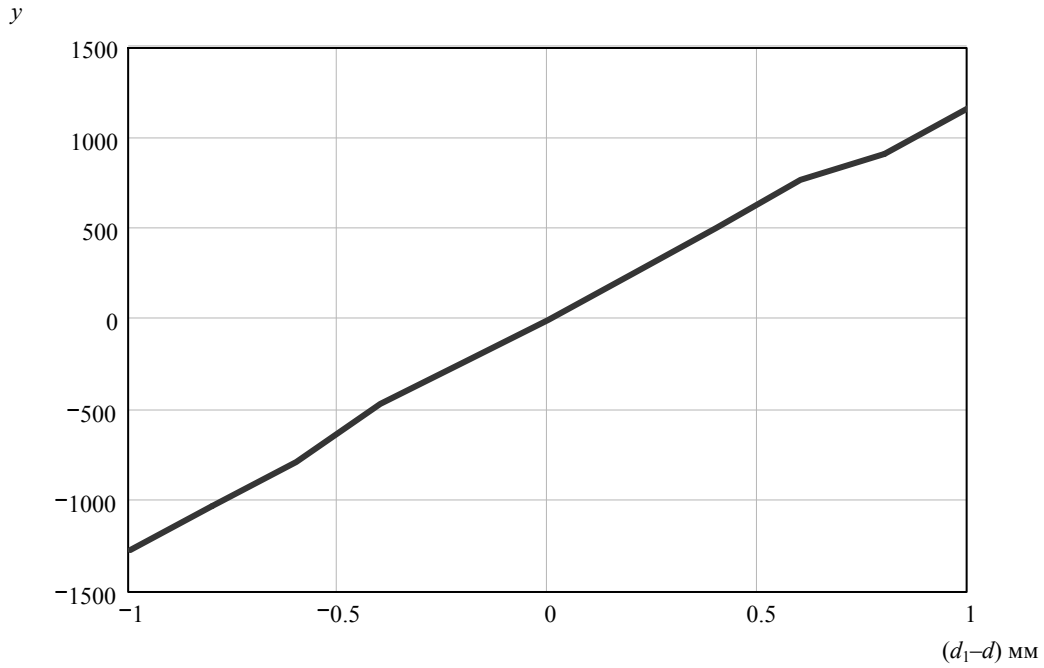


Fig. 9. Schedule of change of control signal y from $(d_1 - d)$ at: $\rho_r = 5.35 \text{ g/cm}^2$; $\rho_{ж} = 5.57 \text{ g/cm}^2$; $x_r = 0.0266 \text{ }\mu\text{m}$; $x_3 = 0.0216 \text{ }\mu\text{m}$; $d_1 = 80 \text{ mm}$; $D = 300 \text{ mm}$; $M = 4$; $C = 4$; $B = 16$; $V_3 = 0.00833 \text{ mm/s}$; $X_{3ц} = 1000 \text{ }\mu\text{m}$; $X_{тц} = 68 \text{ }\mu\text{m}$; $T_{ц} = 120 \text{ s}$; $L_p = 1 \text{ }\mu\text{m}$

Рис. 9. График изменения сигнала управления y от $(d_1 - d)$ при: $\rho_r = 5,35 \text{ г/см}^2$; $\rho_{ж} = 5,57 \text{ г/см}^2$; $x_r = 0,0266 \text{ мкм}$; $x_3 = 0,0216 \text{ мкм}$; $d_1 = 80 \text{ мм}$; $D = 300 \text{ мм}$; $M = 4$; $C = 4$; $B = 16$; $V_3 = 0,00833 \text{ мм/с}$; $X_{3ц} = 1000 \text{ мкм}$; $X_{тц} = 68 \text{ мкм}$; $T_{ц} = 120 \text{ с}$; $L_p = 1 \text{ мкм}$

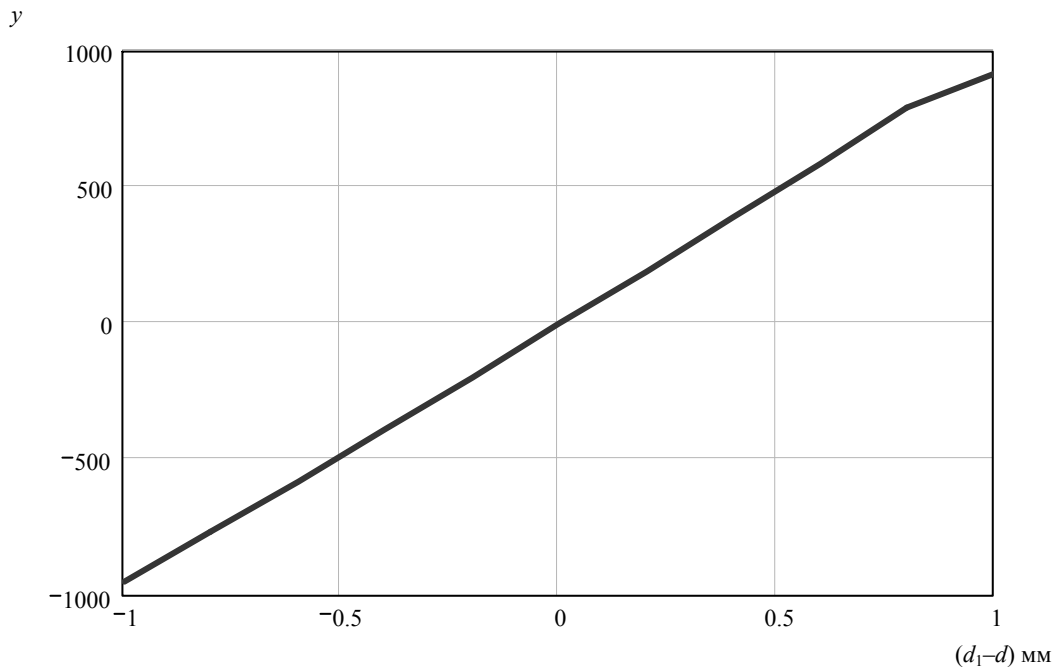


Fig. 10. Schedule of change of control signal y from $(d_1 - d)$ at: $\rho_r = 5.35 \text{ g/cm}^2$; $\rho_{ж} = 5.57 \text{ g/cm}^2$; $x_r = 0.0266 \text{ }\mu\text{m}$; $x_3 = 0.0216 \text{ }\mu\text{m}$; $d_1 = 100 \text{ mm}$; $D = 300 \text{ mm}$; $M = 4$; $C = 4$; $B = 16$; $V_3 = 0.00833 \text{ mm/s}$; $X_{3ц} = 1000 \text{ }\mu\text{m}$; $X_{тц} = 107 \text{ }\mu\text{m}$; $T_{ц} = 120 \text{ s}$; $L_p = 1 \text{ }\mu\text{m}$

Рис. 10. График изменения сигнала управления y от $(d_1 - d)$ при: $\rho_r = 5,35 \text{ г/см}^2$; $\rho_{ж} = 5,57 \text{ г/см}^2$; $x_r = 0,0266 \text{ мкм}$; $x_3 = 0,0216 \text{ мкм}$; $d_1 = 100 \text{ мм}$; $D = 300 \text{ мм}$; $M = 4$; $C = 4$; $B = 16$; $V_3 = 0,00833 \text{ мм/с}$; $X_{3ц} = 1000 \text{ мкм}$; $X_{тц} = 107 \text{ мкм}$; $T_{ц} = 120 \text{ с}$; $L_p = 1 \text{ мкм}$

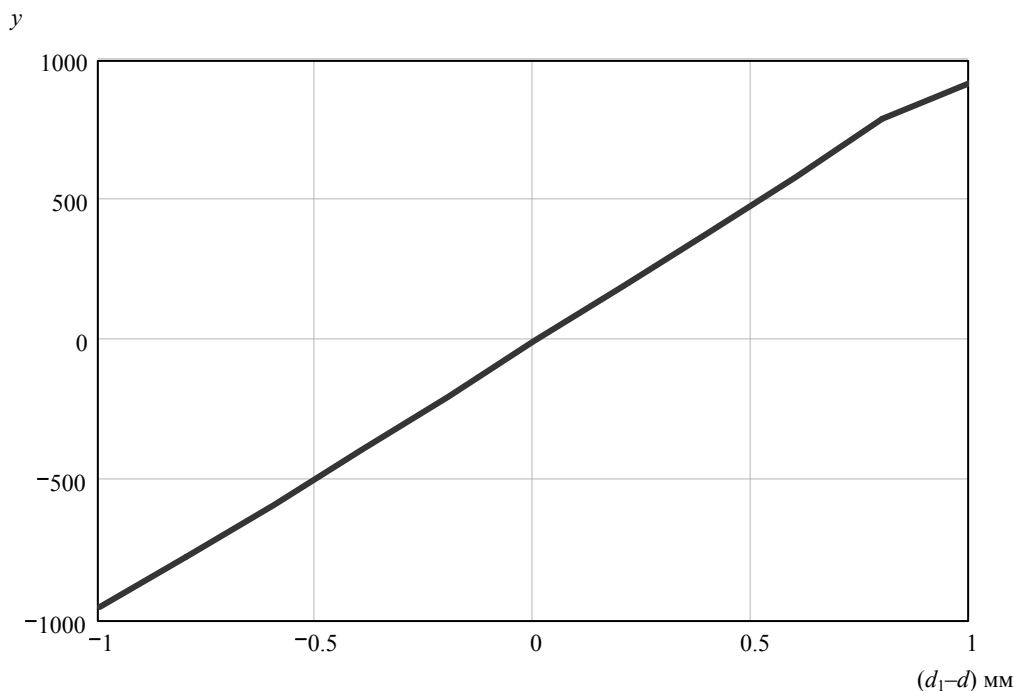


Fig. 11. Schedule of change of control signal y from (d_1-d) at: $\rho_r = 5.35 \text{ g/cm}^2$; $\rho_{\text{ж}} = 5.57 \text{ g/cm}^2$; $x_r = 0.0266 \text{ }\mu\text{m}$; $x_3 = 0.0216 \text{ }\mu\text{m}$; $d_1 = 120 \text{ mm}$; $D = 300 \text{ mm}$; $M = 4$; $C = 4$; $B = 16$; $V_3 = 0.00833 \text{ mm/s}$; $X_{\text{эл}} = 1000 \text{ }\mu\text{m}$; $X_{\text{тл}} = 154 \text{ }\mu\text{m}$; $T_{\text{ц}} = 120 \text{ s}$; $L_p = 1 \text{ }\mu\text{m}$

Рис. 11. График изменения сигнала управления y от (d_1-d) при: $\rho_r = 5,35 \text{ г/см}^2$; $\rho_{\text{ж}} = 5,57 \text{ г/см}^2$; $x_r = 0,0266 \text{ мкм}$; $x_3 = 0,0216 \text{ мкм}$; $d_1 = 120 \text{ мм}$; $D = 300 \text{ мм}$; $M = 4$; $C = 4$; $B = 16$; $V_3 = 0,00833 \text{ мм/с}$; $X_{\text{эл}} = 1000 \text{ мкм}$; $X_{\text{тл}} = 154 \text{ мкм}$; $T_{\text{ц}} = 120 \text{ с}$; $L_p = 1 \text{ мкм}$

The evaluation time $T_{\text{ц}}$ of the control signal y in the previous control cycle is used in the current cycle to calculate the melt level sensor closing and opening pause. In the control system, at the moment the contact sensor closure, a pause of the closed and the same pause of the subsequent open state of the level sensor is held.

At pauses, the state of the contact sensor is not analyzed by the control system and the control of the crucible lift occurs with a slow and accelerated crucible lifting speed at “conditionally” closed and “conditionally” open states of the level sensor.

The control system is reset at each moment of the control cycle completion, provided that the melt level sensor is closed.

All this ensures the accuracy of determining the current area of the grown crystal of about 1% on the cylindrical part of the grown crystal in the automatic control system.

References

- Schmidt F., Voszka R. Phantom controlled automatic Czochralski growth apparatus. *Crystal Research and Technology*. 1981, Vol. 10, No. 11, P. 127–128.
- Pat. 2337169. Federal Republic of Germany, ICI B01 J17/18-1974.
- Sahansky S. P., Podkopaev O. I., Petrik V. F. *Sposob upravleniya protsessom vyrashchivaniya monokristallov germaniya iz rasplava i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [A method for controlling the process of growing single crystals of germanium from the melt, and

a device for its implementation]. Patent RF, no. 2128250, 1997.

- Sahansky S. P., Podkopaev O. I., Petrik V. F., Laptenok V. D. *Sposob upravleniya protsessom vyrashchivaniya monokristallov germaniya iz rasplava i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [A method for controlling the process of growing single crystals of germanium from the melt, and a device for its implementation]. Patent RF, no. 2184803, 1999.

- Sakhanskiy S. P. [Controlling the shape of semiconductor crystals when grown according to the Czochralski method]. *J. Sib. Fed. Univ. Eng., Technol.* 2014, Vol. 7, No. 1, P. 20–31.

- Sakhanskiy S. P. [Basic mathematical relationships of the contact method for controlling the growth of single crystals by the Czochralski method]. *Vestnik SibGAU*. 2005, No. 7, P. 85–88 (In Russ.).

- Sakhanskiy S. P. [Determination of the correction value of the control signal by diameter, from the change in the height of the column of the meniscus of the crystal, with the contact method for controlling the growth of single crystals by the Czochralski method]. *Vestnik SibGAU*. 2005, No. 7, P. 89–90 (In Russ.).

- Sakhanskiy S. P. [Determination of the magnitude of the melt fluctuation and sensitivity with a contact method for controlling the growth of single crystals by the Czochralski method]. *Vestnik SibGAU*. 2005, Vol. 1, No. 8, P. 103–104 (In Russ.).

- Sakhanskiy S. P. [The error in the contact method for measuring the current area of the grown germanium

single crystal]. *Pribory i sistemy. Upravlenie. Kontrol'. Diagnostika*. 2009, No. 2, P. 43–46 (In Russ.).

10. Sakhanskiy S. P. [Measurement of the area of a single crystal in the system for automatic control of germanium germination.]. *Mekhatronika. Avtomatizatsiya. Upravlenie*. 2008, No. 8, P. 44–48 (In Russ.).

11. Sakhanskiy S. P. [Plant for growing germanium single crystals on the basis of the contact method of measurement]. *Bulletin of the Samara State University. acad. S. P. Korolev*. 2008, Iss. 2, P. 100–105 (In Russ.).

12. Sakhanskiy S. P. [Measurement and control of the crystal area on a germanium stretch unit]. *Vestnik SibGAU*. 2008, Vol. 1, No. 18, P. 148–150 (In Russ.).

13. Sakhanskiy S. P. *Upravlenie protsessom vyrashchivaniya monokristallov germaniya: monografiya*. [Management process of growing single crystals of germanium: monograph]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2008, 104 p.

14. Sakhanskiy S. P. [Measurement of the area of crystals grown from a liquid melt by the Czochralski method, based on the control of the conditions for closing the contact melt level sensor]. *J. Sib. Fed. Univ. Eng., Technol.* 2015, Vol. 7, No. 8, P. 835–850.

15. Sakhanskiy S. P., Yulenkov S. E. [Improving the accuracy of the contact method for measuring the current area of crystals grown by the Czochralski method]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 3, P. 550–561.

Библиографические ссылки

1. Schmidt F., Voszka R. Phantom controlled automatic Czochralski growth apparatus // *Crystal Research and Technology*. 1981. Vol. 10, № 11. P. 127–128.

2. Пат. № 2337169. Федеративная Республика Германия, МКИ В01 J17/18. 1974.

3. Пат. 2128250. Российская Федерация, МПК С30 В15/20, 15/22, 15/26. Способ управления процессом выращивания монокристаллов германия из расплава и устройство для его осуществления / С. П. Саханский, О. И. Подкопаев, В. Ф. Петрик ; заявл. 16.01.97 ; опубл. 27.03.99, Бюл. № 9.

4. Пат. 2184803. Российская Федерация, МПК С30 В15/20, 15/22, 15/12 29/08. Способ управления процессом выращивания монокристаллов германия из расплава и устройство для его осуществления / С. П. Саханский, О. И. Подкопаев, В. Ф. Петрик, В. Д. Лаптенков ; заявл. 12.11.99 ; опубл. 10.07.02, Бюл. № 19.

5. Саханский С. П. Управление формой полупроводниковых кристаллов при выращивании по способу Чохральского // *Журнал Сибирского федерального*

университета. Техника и технологии. 2014. № 7(1). С. 20–31.

6. Саханский С. П. Основные математические соотношения контактного метода управления выращиванием монокристаллов по способу Чохральского // *Вестник СибГАУ*. 2005. Вып. 7. С. 85–88.

7. Саханский С. П., Лаптенков В. Д. Определение величины коррекции сигнала управления по диаметру, от изменения высоты столбика мениска кристалла, при контактном методе управления выращиванием монокристаллов способом Чохральского // *Вестник СибГАУ*. 2005. Вып. 7. С. 89–90.

8. Саханский С. П. Определение величины колебания расплава и чувствительности при контактном методе управления выращиванием монокристаллов по способу Чохральского // *Вестник СибГАУ*. 2006. Вып. 1(8). С. 103–104.

9. Саханский С. П. Погрешность контактного метода измерения текущей площади выращиваемого монокристалла германия // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. 2009. № 2. С. 43–46.

10. Саханский С. П. Измерение площади монокристалла в системе автоматического управления выращиванием германия // *Мехатроника. Автоматизация. Управление*. 2008. № 8. С. 44–48.

11. Саханский С. П. Установка выращивания монокристаллов германия на основе контактного метода измерения // *Вестник Самарского гос. ун-та им. акад. С. П. Королева*. 2008. Вып. 2. С. 100–105.

12. Саханский С. П. Измерение и управление площадью кристалла на установке вытягивания германия // *Вестник СибГАУ*. 2008. Вып. 1(18). С. 148–150.

13. Саханский, С. П. Управление процессом выращивания монокристаллов германия : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2008. 104 с.

14. Саханский С. П. Измерение площади кристаллов, выращиваемых из жидкого расплава по способу Чохральского, на основе управления условиями замыкания контактного датчика уровня расплава // *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2015. № 7(8). С. 835–850.

15. Саханский С. П., Юленков С. Е. Повышение точности контактного метода измерения текущей площади кристаллов, выращиваемых способом Чохральского // *Сибирский журнал науки и технологий*. 2018. Т. 19, №. 3. С. 550–561.

© **Sahansky S. P.**, Yulenkov S. E., 2019

Sahansky Sergei Pavlovich – Dr. Sc., Professor; Reshetnev Siberian University of Science and Technology.

Yulenkov Svyatoslav Evgenievich – PhD student; Reshetnev Siberian University of Science and Technology. E-mail: yulenkov_se@sibsau.ru.

Саханский Сергей Павлович – доктор технических наук; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева.

Юленков Святослав Евгеньевич – аспирант; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: yulenkov_se@sibsau.ru.

UDC 628.16.087

Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-497-501

For citation: Shestakov I. Y., Vasilyeva Y. A. Water cleaning from metal ions by electrochemical treatment by using the diaphragm using of a diagram electrolyzer for cleaning sewage from hexavalent chromium. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2019, Vol. 20, No. 4, P. 497–501. Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-497-501

Для цитирования: Шестаков И. Я., Васильева Е. А. Использование диафрагменного электролизёра для очистки сточных вод от шестивалентного хрома // Сибирский журнал науки и технологий. 2019. Т. 20, № 4. С. 497–501. Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-497-501

WATER CLEANING FROM METAL IONS BY ELECTROCHEMICAL TREATMENT BY USING THE DIAPHRAGM USING OF A DIAGRAM ELECTROLYZER FOR CLEANING SEWAGE FROM HEXAVALENT CHROMIUM

I. Y. Shestakov¹, Y. A. Vasilyeva²

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

²JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”
52, Lenin St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
E-mail: yakovlevish@mail.ru

In the production of space rocket technology, electrochemical processes are used, as a result there is pollution of sewage by metal ions. The strict requirements of environmental authorities do not allow sewage, containing metal ions with concentration exceeding the maximum permissible values, to be discharged directly into reservoir or sewers. The greatest difficulties are caused by the purification of water from hexavalent chromium.

The proposed methods for purifying from hexavalent chromium, electrocoagulation method, galvanocoagulation method, sorption methods, combined methods, have some disadvantages, such as: significant energy consumption, significant consumption of soluble metal anodes, passivation of the anodes, need for large excesses of reagent (iron salts), large amounts of precipitate and the complexity of its dehydration, high cost and scarcity of sorbents, high consumption of reagents for the regeneration of sorbents, and others.

This work shows equipment for experiments, including a diaphragm electrolyzer with a coaxial arrangement of electrodes. Formulas for calculating the chromium ions flux due to migration and diffusion are presented. The difference between the calculated amperage from the practical one is 25 %, and the theoretical degree of purification from the real one is 4 %, which confirms the effectiveness of the proposed cleaning method.

The concentration of chromium anions was determined by atomic absorption spectroscopy. The degree of purification of water from chromium ranged from 84 to 96 %. The highest degree of purification (96 %) was obtained with an electrolysis duration of 29 minutes.

Keywords: electroplatings wastes, hexavalent chromium, diaphragm electrolyzer, electrochemical effect, direct current.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИАФРАГМЕННОГО ЭЛЕКТРОЛИЗЁРА ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ШЕСТИВАЛЕНТНОГО ХРОМА

И. Я. Шестаков¹, Е. А. Васильева²

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

²АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: yakovlevish@mail.ru

В производстве ракетно-космической техники применяются электрохимические процессы, в результате которых происходит загрязнение сточных вод ионами металлов. Строгие требования органов охраны окружающей среды не позволяют сбрасывать непосредственно в водоемы или канализацию сточные воды, содержащие ионы металлов, концентрация которых превышает предельно допустимые значения. Наибольшие трудности вызывает очистка воды от шестивалентного хрома.

Предлагаемые методы очистки от хрома шестивалентного – метод электрокоагуляции, метод гальванокоагуляции, сорбционные методы, комбинированные методы – имеют недостатки, такие как значительный расход электроэнергии, металлических растворимых анодов, пассивация анодов, необходимость больших

избытков реагента (солей железа), большие количества осадка и сложность его обезвреживания, дороговизна и дефицит сорбентов, большой расход реагентов для регенерации сорбентов и др.

В работе показано оборудование для проведения опытов, включающее диафрагменный электролизёр с коаксиальным расположением электродов. Представлены формулы для расчёта потока ионов хрома под действием миграции и диффузии. Отличие расчётной силы тока от практической составляет 25 %, теоретической степени очистки от реальной – 4 %, что подтверждает эффективность предложенного способа очистки.

Концентрацию ионов хрома определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии. Степень очистки воды от хрома составила от 84 до 96 %. Наибольшая степень очистки (96 %) получена при продолжительности электролиза 29 мин.

Ключевые слова: гальваносток, шестивалентный хром, диафрагменный электролизёр, электрохимическое воздействие, постоянный ток.

Introduction. Due to the constantly increasing requirements for standards for the concentration of harmful substances (in particular, for substances of the first hazard class – hexavalent chromium) in industrial effluents (in particular, in electroplatings wastes), interest in various cleaning methods has always been relevant.

In the production of aircraft parts, galvanic technologies are used, as a result of which electroplatings wastes of electroplating shop contaminated with metal ions are formed. The requirements of environmental authorities do not allow direct discharge into reservoirs or sewers of electroplatings wastes containing high concentration of chromium, for example, in the form of chromic acid, metal chromates, etc. In addition, chromium is an expensive metal and its extraction from chromium-containing electroplatings wastes is also desirable from an economic point of view. For a long time there is a need for an economical and efficient way to remove chromium from industrial wastewater and its subsequent regeneration [1–7].

Currently, there are a large number of ways to purify industrial water from chromium – mechanical, chemical, electrical, physical, biological, combined, etc. The proposed methods for purifying hexavalent chromium – electrocoagulation method, galvanocoagulation method, sorption methods, combined methods have their drawbacks, such as: high power consumption, significant consumption of soluble metal anodes, passivation of the anodes, the need to use a reagent (iron salts), the formation of a large amount of precipitate and the complexity of its subsequent dehydration, the high cost and scarcity of sorbents, the use of reagents for the regeneration of sorbents, and others [8; 9]. SibSAU staff have developed a combined method of purifying water from anions and cations, including hexavalent chromium [10; 11]. However, the proposed method requires prolonged water precipitation (8–10 hours), which is not always possible under production conditions. Therefore, the development of an effective method of purifying water from hexavalent chromium is an urgent problem.

Diaphragm electrolyzers are used to change the active reaction and redox potential of the medium [12]. In this work, it is noted that when using a diaphragm electrolyzer due to the migration of hexavalent chromium ions from the cathode chambers, their concentration in catholyte decreases. However, this phenomenon has not been investigated with the aim of using chromium ions to purify water.

Work Description. Fig. 1 shows the experimental setup with the help of which water was purified from hexavalent chromium.

The experimental procedure was similar to that described in [13]. The difference is that the number of holes in a small tank (3) is increased and the water of the electroplating shop taken from the bath with rinsing water following the chromium bath with chromium-containing solution in the manufacture (coating) of aircraft parts was cleaned.

Based on the calculations given in article [13], the electrolysis time is 29 minutes. In this case, the degree of purification should be equal to 100 %.

The degree of purification was calculated by the formula

$$Y = \left(\frac{C_o - C_k}{C_o} \right) 100,$$

where C_o , C_k – initial and final concentration of the removed metal ion, mg/l;

$$Y = \left(\frac{7.0 - 0.29}{7.0} \right) 100 \% = 96 \%$$

where C_o $[\text{CrO}_4]^{2-} = 7.0$ mg/l; C_k $[\text{CrO}_4]^{2-} = 0.29$ mg/l.

The results of the experiments are presented in fig. 2.

Thus, the discrepancy with the estimated degree of purification is 4 %.

To confirm the correctness of the selected calculation method described in [13], it is necessary to compare the values of the calculated amperage (theoretical) I_{calc} and average, measured in the process of electrolysis (practical) $I_{\text{exp.medium}}$.

It is known that the flow of dissolved particles in the electrolyzer consists of three terms [14; 15]:

$$N_i = -Z_i \cdot U_i \cdot F \cdot C_i \cdot \nabla \Phi - D_i \cdot \nabla C_i + C_i \cdot v,$$

flow migration diffusion convection

where N_i – component i flow, mol/(cm² s); Z_i – ion charge in proton charge units; U_i – component mobility i , cm²mol/(J s); F – Faraday constant, C/mol; C_i – concentration of component i , mol/cm³; $\nabla \Phi$ – voltage between electrodes, V; D_i – diffusion coefficient, cm²/s; ∇C_i – concentration gradient, mol/cm³.

We neglect the third term since the electrolysis mode is stationary and, accordingly, the convective component is negligible.

After data substitution, the migration flow will be equal to:

$$-Z_i \cdot U_i \cdot F \cdot C_i \cdot \nabla \Phi = 7.655 \cdot 10^{-10} \frac{\text{mol}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}.$$

The diffusion component is determined:

$$D_i \cdot \nabla C_i = 26.77 \cdot 10^{-11} \frac{\text{mol}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}.$$



Fig. 1. Experimental setup:

- 1 – fluoroplastic tank; 2 – cathode (stainless steel 12X18H10T);
- 3 – fluoroplastic glass (small tank) with holes; 4 – tarpaulin diaphragm;
- 5 – graphite anode; 6 – DC source; 7 – multimeter

Рис. 1. Экспериментальная установка:

- 1 – ёмкость из фторопласта; 2 – катод (нержавеющая сталь 12X18H10T);
- 3 – фторопластовый стакан (малая ёмкость) с отверстиями; 4 – диафрагма из брезентовой ткани; 5 – анод из графита; 6 – источник постоянного тока; 7 – мультиметр

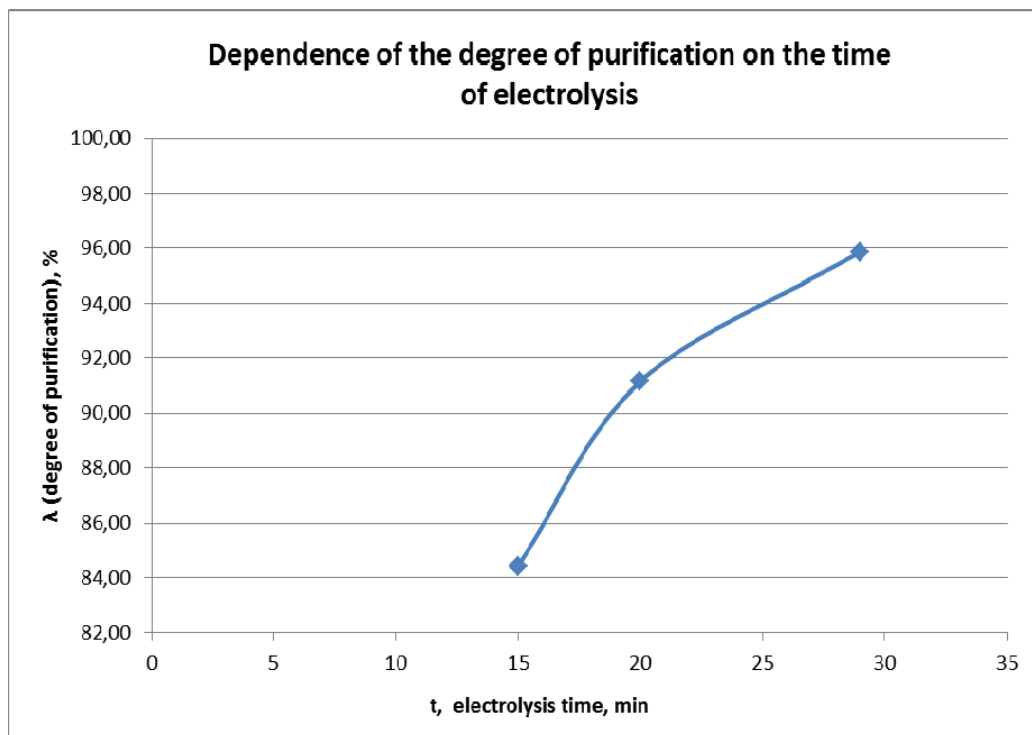


Fig. 2. Dependence of the degree of purification on the time of electrolysis

Рис. 2. Зависимость степени очистки от времени проведения электролиза

Thus, the flux of chromium ions will be equal to:

$$N_i = 10.3 \cdot 10^{-10} \frac{\text{mol}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}.$$

The amperage will be:

$$I_{\text{calc}} = N_i \cdot F \cdot S = 993\,950 \cdot 10^{-10} \frac{\text{A}}{\text{cm}^2} \cdot 323.106 \text{ cm}^2 = \\ = 3.2 \cdot 10^{-2} \text{ A} = 0.032 \text{ A},$$

where N_i – component i flow, mol/(cm²·s); F – Faraday constant, C/mol; S – surface area of the cathode (anode) involved in electrolysis, cm².

The average value of amperage during electrolysis in 29 minutes made up: $I_{\text{exp,medium}} = 0.043 \text{ A}$.

Conclusion. The highest degree of purification (96 %) was obtained with an electrolysis duration of 29 minutes. The process was carried out at a voltage of 50 V.

The difference between the calculated amperage from the practical one is about 25 %, and the theoretical degree of purification from the real one is 4 %, which confirms the effectiveness of the proposed cleaning method and the correct calculation method.

Further experiments are required, followed by practical testing under industrial conditions with an increased rate of electrochemical reactions in order to reduce electrolysis time.

References

1. Khalemskiy A. M. [Toxic industrial sewage treatment of chrome compounds, arsenic, and organic substances by electrocoagulation and ferrate methods]. *Ekologiya proizvodstva. Metallurgiya i mashinostroenie*. 2006, No. 3(4), P. 15 (In Russ.).

2. Zvyagintseva A. V., Boldyreva O. N. [Sewage neutralization of galvanizing room is one of environmental safety methods]. *Mashinostroitel'*. 2003, No. 2, P. 48–52 (In Russ.).

3. Skovronek E. [Sewage treatment in galvanotechnics]. *Galvanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*. 2002, Vol. 10, No. 4, P. 55–61.

4. Verbol' S. V., Zapariy M. M., Kozlov V. V. [Method of galvanic sewage treatment]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2001, P. 7–8.

5. Stuart F. E. Electronic water purification progress report on the electronic coagulator – a new device which gives promise of unusually speedy effective results. *Water Sewage*. 1946, No. 84, P. 24–26.

6. Bonilla C. F. Possibilities of the electronic coagulator for water treatment. *Water Sewage*. 1947, No. 85, P. 21–45.

7. Chen G. Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*. 2004, No. 38, P. 11–41.

8. Yakovlev S. V., Krasnoborod'ko I. G., Rogov V. M. *Tekhnologiya elektrokhimicheskoy ochistki vody* [Technology of water electrochemical purification]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1987, P. 312.

9. Rogov V. M., Filipchuk V. L. *Elektrokhimicheskaya tekhnologiya izmeneniya svoystv vody* [Electrochemical technology of change in water properties]. L'vov, Vishcha shkola Publ., 1989, P. 128.

10. Shestakov I. Ya., Raeva O. V. *Sposob ochistki vody i vodnykh rastvorov ot anionov i kationov* [Water and water solutions treatment of anions and cations]. Patent RF, No. 2519383, 2014.

11. Shestakov I. Ya., Raeva O. V. [Water treatment of metal ions by AC electrochemical action during air barbotage and follow coagulation and sedimentation]. *Vestnik SibGAU*. 2014, No. 2(54), P. 148–154.

12. Pas'ko O. A., Semenov A. V., Smirnov G. V., Smirnov D. G. *Bytovoy diafragmennyy elektrolizer* [Common diaphragm electrolyzer]. Patent RF, No. 2344996, 2006.

13. Dobosh D. *Elektrokhimicheskie konstanty* [Electrochemical constants]. Moscow, Mir Publ., 1980, P. 365.

14. Shestakov I. Ya., Vasilyeva E. A., Remizov I. A. [Water purification from chromium ions in a diaphragm electrolyzer]. *Vestnik SibGAU*. 2016, Vol. 17, No. 2, P. 498–501 (In Russ.).

15. Newman J. *Elektrokhimicheskie sistemy* [Electrochemical systems]. Moscow, Mir Publ., 1977, P. 245–249.

Библиографические ссылки

1. Халемский А. М. Очистка токсичных промстоков от соединений хрома, мышьяка и органических веществ электрокоагуляционным и ферратным способами // Экология производства. Metallurgiya i mashinostroenie. 2006. № 3(4). С. 15.

2. Звягинцева А. В., Болдырева О. Н. Нейтрализация сточных вод гальванического цеха – одно из направлений обеспечения экологической безопасности // Машиностроитель. 2003. № 2. С. 48–52.

3. Скворнек Е. Обработка сточных вод в гальванотехнике // Гальванотехника и обработка поверхности. 2002. Т. 10, № 4. С. 55–61.

4. Верболь С. В., Запарий М. М., Козлов В. В. Способ очистки гальваностоков // Экология и промышленность России. 2001. С. 7–8.

5. Stuart F. E. Electronic water purification progress report on the electronic coagulator – a new device which gives promise of unusually speedy effective results // Water Sewage. 1946. No. 84. P. 24–26.

6. C. F. Bonilla, Possibilities of the electronic coagulator for water treatment // Water Sewage. 1947. No. 85. P. 21–45.

7. Chen G. Electrochemical technologies in wastewater treatment // Separation and Purification Technology. 2004. No. 38. P. 11–41.

8. Яковлев С. В., Краснобородько И. Г., Рогов В. М. Технология электрохимической очистки воды. Л. : Стройиздат, 1987. 312 с.

9. Рогов В. М., Филипчук В. Л. Электрохимическая технология изменения свойств воды. Львов : Вища школа, 1989. 128 с.

10. Пат. № 2519383 Российская Федерация. Способ очистки воды и водных растворов от анионов и катионов / И. Я. Шестаков, О. В. Раева ; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16. 3 с.

11. Шестаков И. Я., Раева О. В. Очистка воды от ионов металлов электрохимическим воздействием переменным током при барботировании воздухом

с последующей коагуляцией и отстаиванием // Вестник СибГАУ. 2014. № 2(54). С. 148–154.

12. Пат. Российская Федерация, № 2344996, С 02 F 1/46. Бытовой диафрагменный электролизер / О. А. Пасько, А. В. Семенов, Г. В. Смирнов, Д. Г. Смирнов ; опубл. 01.2006, Бюл. № 4. 8 с.

13. Шестаков И. Я., Васильева Е. А., Ремизов И. А. Очистка воды от ионов хрома в диафрагменном элек-

тролизёре // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17, № 2. С. 498–501.

14. Добош Д. Электрохимические константы. Справочник для электрохимиков. М. : Мир, 1980. 365 с.

15. Ньюмен Дж. Электрохимические системы. М. : Мир, 1977. С. 245–249.

© Shestakov I. Y., Vasilyeva Y. A., 2019

Shestakov Ivan Yakovlevich – Dr. Sc., professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: yakovlevish@mail.ru.

Vasilyeva Evgeniya Alexandrovna – process engineer; JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: evgen_vasilyeva@mail.ru.

Шестаков Иван Яковлевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электронной техники и телекоммуникаций; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: yakovlevish@mail.ru.

Васильева Евгения Александровна – инженер-технолог; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: evgen_vasilyeva@mail.ru.
