

ISSN 2712-8970



СИБИРСКИЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

SIBERIAN AEROSPACE JOURNAL

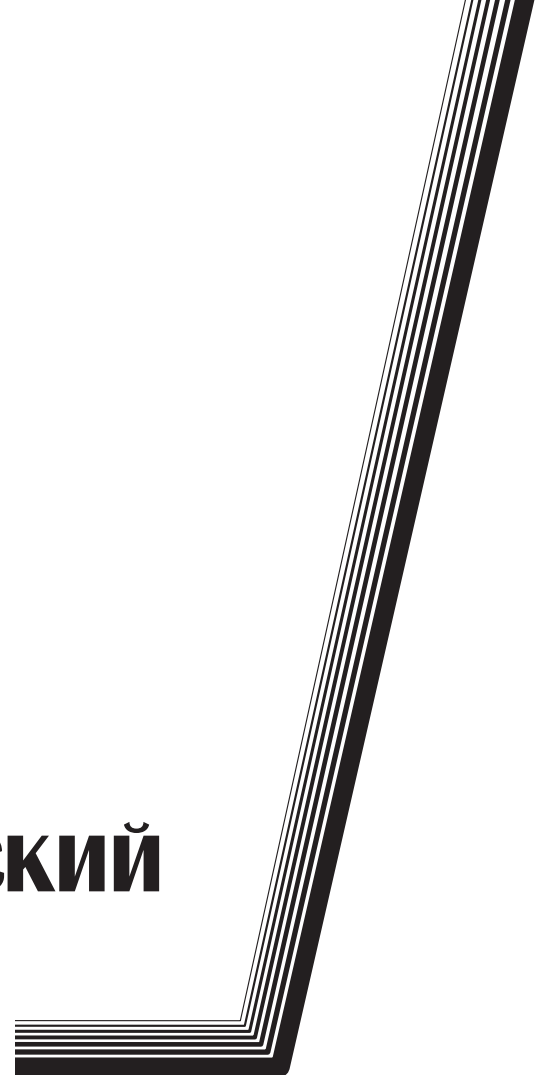
**Том
Vol. 22, № 4**

КРАСНОЯРСК 2021

СИБИРСКИЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том 22, № 4

Красноярск 2021



СИБИРСКИЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том 22, № 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 AEROSPACE JOURNAL

Vol. 22, 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)

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

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

EDITORIAL COUNCIL

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

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

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

Kalvoda L., Cand.Sc.-Ing., Associate Professor
(Prague, Czech Republic)

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

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

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

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

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

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

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

Pawera R., Associate Professor (Bratislava, Slovakia)

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

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

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

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

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

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

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

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ

«Сибирский аэрокосмический журнал» является научным, производственно-практическим рецензируемым изданием. Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-80539 от 01.03.2021 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

ISSN 2712-8970

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, конструкция 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 (физико-математические науки).

Издается с 2000 года. 2000 – «Вестник Сибирской аэрокосмической академии имени академика М. Ф. Решетнева» (Вестник САА); 2002 – «Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева» (Вестник СибГАУ); 2017 – «Сибирский журнал науки и технологий» (СибЖНТ); с 01.03.2021 – «Сибирский аэрокосмический журнал» (САЖ).

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 аэрокосмический журнал» 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. Тел. (391) 290-42-31. E-mail: vestnik@sibsau.ru

Редактор Н. Н. ГОЛОСКОКОВА

Ответственный редактор английского текста

М. В. САВЕЛЬЕВА

Оригинал-макет и верстка Л. В. ЗВОНАРЕВОЙ

Подписано в печать 20.12.2021. Формат 70×108/16.

Бумага офсетная. Печать плоская. Усл. печ. л. 20,0.

Уч.-изд. л. 17,0. Тираж 100 экз. Заказ 3154. С 358/21.

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: 17.01.2022. Свободная цена

INFORMATION FOR AUTHORS AND SUBSCRIBERS

Siberian Aerospace Journal 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 77-80539, dated 01 March 2021, given by Federal Supervision Agency for Information Technology, Communications and Mass Media. ISSN 2712-8970.

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. 2000 – Vestnik Sibirskoy aerokosmicheskoy akademii imeni akademika M. F. Reshetneva (Vestnik SAA); 2002 – Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M. F. Reshetneva (Vestnik SibGAU); 2017 – Siberian Journal of Science and Technology (SZHT); from 01.03.2021 – Siberian Aerospace Journal (SAJ).

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 (Physical and Mathematical Sciences).

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 Aerospace Journal* 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. (391) 290-42-31; e-mail: vestnik@sibsau.ru

Editor N. N. GOLOSOKOVA

Executive editor (English Language) M. V. SAVELYEVA

Layout original L. V. ZVONAREVA

Signed (for printing): 20.12.2021. Format 70×108/16.

Offset Paper. Print flat. 20,0. Published sheets 17,0.

100 copies. Order 3154. С 358/21.

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: 17.01.2022. Free price

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел 1. ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Адрианов А. Л., Сизаско В. О некорректном представлении ударного процесса на ударных полях в вязком теплопроводном газе	558
Егорычев Г. П., Ширяева Т. А., Шлепкин А. К., Филиппов К. А., Пашковская О. В. О выборе орбит для космических аппаратов	568
Кабанов С. А., Митин Ф. В. Решение задачи фильтрации при оптимальной настройке радиоотражающего сетеполотна трансформируемого рефлектора	577
Картамышев А. С., Черныш Б. А., Мурыгин А. В. Формирование многомерных данных в информационной финансово-экономической системе на предприятии госкорпорации «Роскосмос»	589
Ликсонова Д. И., Раскина А. В. Непараметрические алгоритмы идентификации и управления для Т-процессов	600
Максютин А. С., Мурыгин А. В., Ивленков Д. В., Дымов Д. В. Разработка рабочего места и алгоритмов тестирования бортового оборудования SPACEWIRE	613
Матвеев А. Д. Применение фиктивных дискретных моделей с переменными характерными размерами в расчетах на прочность композитных тел	624

Раздел 2. АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Гусев Е. В., Родченко В. В. Разработка модели выявления неисправностей в процессе проведения технического обслуживания систем летательных аппаратов	638
Кабанов С. А., Кабанов Д. С., Никулин Е. Н., Митин Ф. В. Оптимальное управление разведением спицы трансформируемого рефлектора при наличии возмущений	649
Торгашин А. С., Жуйков Д. А., Назаров В. П., Бегишев А. М., Власенко А. В. Сравнительный анализ верифицированного численного моделирования кавитации на основе модели Рэлея – Плессета к насосам жидкостного ракетного двигателя	660
Шевчук А. А. Альтернативный метод имитации солнечного излучения для термовакuumных испытаний космических аппаратов	672

Раздел 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

Ереско С. П., Иванов Ю. Ф., Петрикова Е. А., Тересов А. Д., Клопотов А. А. Формирование структуры, механических и трибологических свойств высокохромистой стали электронно-ионно-плазменным азотированием	688
Калашников А. С., Руденко М. С., Кучеренко А. Д., Гирн А. В., Михеев А. Е. Метод автоматизации перемещения плазмотрона шестиосным роботом-манипулятором	700
Шабанова К. А., Логинов Ю. Ю., Буханов Е. Р., Волочаев М. Н., Пятина С. А. Влияние структуры хлоропластов на плотность фотонных состояний и эффективность преобразования солнечной энергии	708

CONTENTS

Part 1. INFORMATICS, COMPUTER TECHNOLOGY AND MANAGEMENT

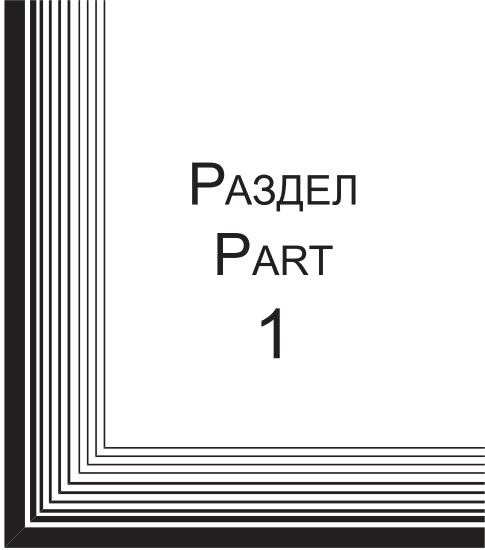
Adrianov A. L., Sizasko V. About incorrect representation of the shock process on shock polars in a viscous heat-conducting gas	558
Egorythev G. P., Shiryayeva T. A., Shlepkov A. K., Filippov K. A., Pashkovskaya O. V. On the choice of orbits for spacecrafts	568
Kabanov S. A., Mitin F. V. Solution of the filtration problem with the optimal adjustment of the radio-reflecting net of a transformable reflector	577
Kartamyshev A. S., Chernysh B. A., Murygin A. V. Method for forming multi-dimensional data in the information financial and economic system at the enterprise of state space corporation "Roscosmos"	589
Liksonova D. I., Raskina A. V. Non-parametric identification and control algorithms for T-processes	600
Maksyutin A. S., Myrugin A. V., Ivlenkov D. V., Dymov D. V. Development of workspace and algorithms for testing SpaceWire onboard equipment	613
Matveev A. D. Application of fictitious discrete models with variable characteristic dimensions in calculations for the strength of composite bodies	624

Part 2. AVIATION AND SPACECRAFT ENGINEERING


Gusev E. V., Rodchenko V. V. Development of a model for detecting malfunctions during the maintenance of aircraft units and systems	638
Kabanov S. A., Kabanov D. S., Nikulin E. N., Mitin F. V. Optimal control of deployment of the spoke of a transformable reflector in the presence of disturbance	649
Torgashin A. S., Zhujkov D. A., Nazarov V. P., Begishev A. M., Vlasenko A. V. Comparative analysis of verified numerical simulation of cavitation based on the Rayleigh – Plesset model for liquid propellant rocket engine pumps	660
Shevchuk A. A. Alternative method of solar simulation for thermal vacuum tests of spacecraft	672

Part 3. TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIAL SCIENCE

Eresko S. P., Ivanov Yu. F., Petrikova Ye. A., Teresov A. D., Klopotov A. A. Formation of the structure, mechanical and tribological properties of high chrome steel by electronic-ion-plasma nitrogen	688
Kalashnikov A. S., Rudenko M. S., Kucherenko A. D., Girn A. V., Mikheev A. E. The method of the automation of the plasmotron movement by six-axis robotic manipulator	700
Shabanova K. A., Loginov Y. Y., Bukhanov E. R., Volochaev M. N., Pyatina S. A. The chloroplast structure influence on photon states density and efficiency of solar energy conversion	708



РАЗДЕЛ
PART
1



ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPUTER TECHNOLOGY
AND MANAGEMENT



УДК 532.593, 533.6.011.72

Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-558-567

Для цитирования: Адрианов А. Л., Сизаско В. О некорректном представлении ударного процесса на ударных полях в вязком теплопроводном газе // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 4. С. 558–567. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-558-567.

For citation: Adrianov A. L., Sizasko V. About incorrect representation of the shock process on shock polars in a viscous heat-conducting gas. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 4, P. 558–567. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-558-567.

О некорректном представлении ударного процесса на ударных полях в вязком теплопроводном газе

А. Л. Адрианов^{1,2}, В. Сизаско²

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

²Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: adrian58al@gmail.com

Рассматриваются ударные газодинамические процессы, нашедшие широкое применение в ракетно-космической технике при конструировании и оптимизации устройств, энергетических установок. Производится анализ известных точных и асимптотических соотношений/условий на ударной волне, в частности – обобщенных дифференциальных соотношений (ОДС) на криволинейном косом скачке уплотнения для модели вязкого теплопроводного газа при больших числах Рейнольдса. Показаны преимущества использования дискретно-аналитического подхода, например: 1) возможность максимально использовать гладкость ударного газодинамического образования (скачка) в касательном направлении; 2) строить эффективные вычислительные алгоритмы, лишённые негативного действия аппроксимационной/искусственной вязкости на схематизированном разрыве. Параллельно рассмотрен весьма распространённый графический способ отображения результатов газодинамических расчетов на плоскость ударных поляр, предложенный Буземаном, и объёмный (3D) полярOID, предложенный В. Н. Усковым. Сам математический аппарат ударных поляр построен на точных соотношениях типа Ренкина – Гюгонио и неплохо зарекомендовал себя даже при моделировании течений вязкого теплопроводного газа. Однако в многочисленных литературных источниках присутствуют результаты (ударные решения) как физического, так и вычислительного экспериментов, которые не отображаются строго на ударных полях. В настоящей работе показано, что в редких случаях данный и весьма распространённый способ такого отображения может быть и некорректным. Доказано, что основными причинами такого дефекта является совместное действие трех основных факторов: неравномерность течения перед ударным образованием, краевой эффект за ним, действие внешнего фактора вязкости и механизма теплопроводности.

Ключевые слова: ударный газодинамический процесс, газодинамический разрыв, обобщенные дифференциальные соотношения на скачке уплотнения, ударные поляра и полярOID.

About incorrect representation of the shock process on shock polars in a viscous heat-conducting gas

A. L. Adrianov^{1,2}, V. Sizasko²

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

²Siberian Federal university
79, Svobodnyy prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
E-mail: adrian58al@gmail.com

The shock gas-dynamic processes, which have found wide application in rocket and space technology in the design and optimization of devices and power plants, were considered. An analysis of the known exact and asymptotic relations/conditions on the shock wave were carried out, in particular, generalized differential relations (GDR) on a curvilinear oblique shock wave for a model of a viscous heat-conducting gas at large Reynolds numbers. The advantages of using the discrete-analytical approach were shown, for example: 1) the ability to make the most of smoothness of the shock gas-dynamic formation (jump) in the tangential direction; 2) build efficient computational algorithms devoid of the negative action of approximation/artificial viscosity on a schematized discontinuity. At the same time, a very widespread graphical method for displaying the results of gas-dynamic calculations on the plane of shock polars, proposed by Busemann, and a volumetric (3D) polaroid, proposed by V. N. Uskov, was reviewed. The mathematical method of shock polars was built on exact relations of the Rankine – Hugoniot type and was proven itself quite well even in the simulation of viscous heat-conducting gas flows. However, in numerous literary sources there are assisting results (shock solutions) of both physical and computational experiments, which are not strictly reflecting in shock polars. In this abstract, it was shown that in rare cases this and a very widespread way of such a mapping may be incorrect. It was proved that the main reasons for such a defect are the combined action of three main factors: non-uniformity of the flow before the shock formation, the edge effect behind it, the action of the external viscosity factor and the mechanism of heat conductivity.

Keywords: shock gasdynamic process, gasdynamic discontinuity, generalized differential relations at the compression jump, shock polar and polaroid.

Введение

Ударные газодинамические процессы [1] нашли широкое применение в ракетно-космической технике при конструировании и оптимизации устройств, энергетических установок, в современных технологиях и даже медицине. Само «ударное образование» (тонкий ударный слой) при его корректной идеализации (выделении или схематизации ударной волны, скачка уплотнения (СУ)) можно считать разрывным, что позволило применить аналитический аппарат для связи газодинамических параметров по обе стороны такого «разрыва» [2–13]. Более того, если имеет место дополнительный запас гладкости в касательном к СУ направлении, то удаётся аналитически связать не только сами параметры, но и частные производные от них по обе стороны СУ. Такая связь для модели идеального газа в виде дифференциальных условий динамической совместности на СУ дана в [8] В. Н. Усковым. В [10; 11] дан их обобщённый аналог – обобщенные дифференциальные соотношения на СУ (ОДС) для модели вязкого теплопроводного газа при больших числах Рейнольдса (Re_∞). Математический аппарат в виде ОДС позволяет произвести редукцию от уравнений Навье – Стокса вязкого теплопроводного газа (УНСВТ) к системе ОДУ в плане постановки вязкой задачи проникновения СУ в сдвиговый слой. В процессе математического моделирования на основе ОДС удаётся в рамках единого вычислительного алгоритма проходить «насквозь» от газодинамической до диффузионной стадии эволюции СУ в сдвиговом слое, задаваясь при этом различными краевыми

эффектами (КЭ), а с другой – значительно экономить вычислительный ресурс: счет на ПЭВМ вместо многих часов (УНСВТ) занимает секунды. Однако самое важное в том, что в такой постановке задачи сохраняется естественный (тем более, при учете фактора вязкости и механизма теплопроводности (фактора ВТ)) порядок гладкости решения в касательном к СУ направлении, что и явилось основным мотивом для применения дискретно-аналитического подхода [11].

Буземан в своей работе заложил основу графических методов решения задач об интерференции газодинамических разрывов с помощью ударных поляр (УП) [13], связывающих интенсивность косых СУ с углом разворота потока на них. Такие поляры называют в его честь полярами Буземана, а за их характерный вид – сердцевидными кривыми, а также изомахами, так как каждая ударная поляра строится для конкретного числа Маха набегающего потока. В задачах интерференции газодинамических разрывов, когда одним из элементов той или иной конфигурации может быть волна разрежения, вместо УП чаще используется термин «ударно-волновая поляра» (УВП) [8–11].

Цель настоящей работы – исследование корректности (правильности) применения аппарата УВП для представления отдельных вязких ударных решений. Частично такое исследование на плоскости УВП было проведено в [11]. В настоящей работе отображение таких решений осуществляется, в том числе, и на объемный (3D) аналог УВП – ударно-волновой поляроид. Следует отметить, что проблемы такого некорректного представления/отображения получаемых решений могут иметь место только в редких случаях, поскольку сам математический аппарат УВП построен на точных соотношениях типа Ренкина – Гюгонио и неплохо зарекомендовал себя даже при моделировании течений вязкого теплопроводного газа. Эти редкие, но важные случаи могут наблюдаться при совместном действии следующих трёх факторов: 1) неравномерность невозмущенного течения перед СУ; 2) КЭ за ним, формируемый догоняющими возмущениями; 3) фактор ВТ.

1. Классические и неклассические модели ударного перехода

Известно, что само ударное образование, при его правильной идеализации (схематизации) [1–13], позволяет приближенно заменить его математической поверхностью разрыва первого рода, когда основные газодинамические переменные терпят конечный разрыв. В стационарных задачах вместо подвижных ударных волн (УВ) [1; 7; 12] рассматриваются СУ, хотя и движущуюся с постоянной скоростью УВ также можно рассматривать как СУ в подвижной системе координат. Соотношения, связывающие величины по обе стороны УВ, носят название соотношений Ренкина – Гюгонио, а подобные соотношения на СУ – соотношений на косом скачке уплотнения, включая и прямой СУ. В обоих случаях можно говорить обобщенно о соотношениях типа Ренкина – Гюгонио. Эти соотношения образуют однопараметрическое семейство формул, т. е. при известных параметрах до разрыва, достаточно задать один параметр за ним, чтобы определить (не всегда однозначно!) все связи величин по обе стороны СУ или УВ. В последнем случае в качестве такого параметра часто выступает скорость самой УВ. Эти соотношения имеют и более полные реализации, а именно:

1) продолжение их в виде дифференциальных условий динамической совместности (ДУДС [8; 10; 11], В. Н. Усков);

2) ОДС [10; 11] – обобщение ДУДС на случай действия внешнего (по обе стороны разрыва) фактора ВТ при использовании модели вязкого теплопроводного газа (УНСВТ) при больших числах Рейнольдса;

3) применительно к нестационарным газодинамическим течениям дифференциальные соотношения (как и ДУДС в невязком приближении), выполняющиеся на фронте движущейся с ускорением криволинейной УВ, получены в [12].

Не умаляя общности, рассмотрим обычные, т. е. без учёта внешнего фактора ВТ, соотношения на косом скачке уплотнения, которые вытекают из интегральных законов сохранения на разрыве

$$[\rho v_n] = \rho v_n - \hat{\rho} \hat{v}_n = 0, \quad [p + \rho v_n^2] = 0, \quad [\rho v_n v_\tau] = 0, \quad \left[h + \frac{v_n^2}{2} \right] = 0 \quad (1)$$

и могут быть записаны в известных различных формах, поэтому не приводятся. В (1) ρ – плотность; p – давление; v_n и v_τ – нормальная и касательная составляющие скорости к поверхности разрыва; h – энтальпия (теплосодержание) $h = \gamma/(\gamma - 1)p/\rho$; $\gamma = c_p/c_v$ – показатель изэнтропы.

Универсальность, а поэтому и частая применимость нелинейных, но несложных соотношений/условий на косом СУ можно объяснить следующим:

1) даже в случае сложной пространственной (3D) конфигурации СУ, газодинамический процесс рассматривается локально исключительно в двумерном пространстве (2D) – плоскости, образованной вектором нормали к гладкой поверхности скачка и вектором скорости набегающего сверхзвукового потока (число Маха – $M > 1$);

2) в самих соотношениях не присутствует в явном виде диссипативный механизм, но его работа внутри СУ внешне отражается, в частности, в производстве/возрастании энтропии. Разрывы полной энтальпии и касательной к СУ компоненты скорости отсутствуют: $[h + (v_n^2 + v_\tau^2)/2] = 0$, $[v_\tau] = 0$, но так обстоит дело только в случае обычных соотношений.

При использовании модели (уравнений УНСВТ) вязкого теплопроводного газа, имеется возможность обобщить обычные соотношения на косом СУ добавлением действия малого внешнего фактора ВТ [10; 11]. В таких обобщённых соотношениях появляются дополнительные слагаемые с малым параметром ($1/Re_\infty$) при производных от газодинамических величин. Однако и в этом случае, если градиенты этих величин по обе стороны разрыва отсутствуют, имеет место полная выполнимость обычных соотношений на косом СУ независимо от числа Рейнольдса, что положительно сказывается на точности описания ударного газодинамического процесса и соответственно частой применимости данных соотношений.

Буземан в своей работе [13] заложил основу графических методов решения задач об интерференции газодинамических разрывов с помощью ударных поляр, связывающих интенсивность косых СУ с углом разворота потока на них. Рассмотрим, как выглядит регулярное и нерегулярное (маховское) отражение косого СУ от стенки в физической плоскости и плоскости ударных поляр.

На рис. 1 показаны виды отражения УВ (СУ). Поляры построены в координатах $(\beta, \Lambda = \ln(J))$, где β – угол преломления/разворота вектора скорости на СУ, а $J = \hat{p}/p$ – его интенсивность (отношение давления за СУ к давлению до него). Поляры строятся по конкретному числу Маха и показателю изэнтропы $\gamma = c_p/c_v$. Здесь β_1 – угол разворота потока на входящем/падающем скачке, β_2 – аналогичный угол на отраженном скачке, β_3 – угол разворота на главном скачке при нерегулярном отражении, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – входящий, отраженный и главный скачок (ножка Маха), соответственно. Если отражение регулярное, то выпущенная из точки 1 вторичная поляра (строится по числу Маха за входящим скачком) должна пересекать координатную ось в точке 2. Тогда суммарный угол разворота $\beta_1 + \beta_2 = 0$, а суммарная степень сжатия потока будет $\Lambda_1 + \Lambda_2$. Если отражение нерегулярное, то образуется та или иная тройная конфигурация ударных волн [8; 9], аналогичный расчёт которой основывается на равенстве давлений и наклонов векторов скорости на исходящем из тройной точки тангенциальном разрыве \hat{t} (штрихпунктир на рис. 1, б).

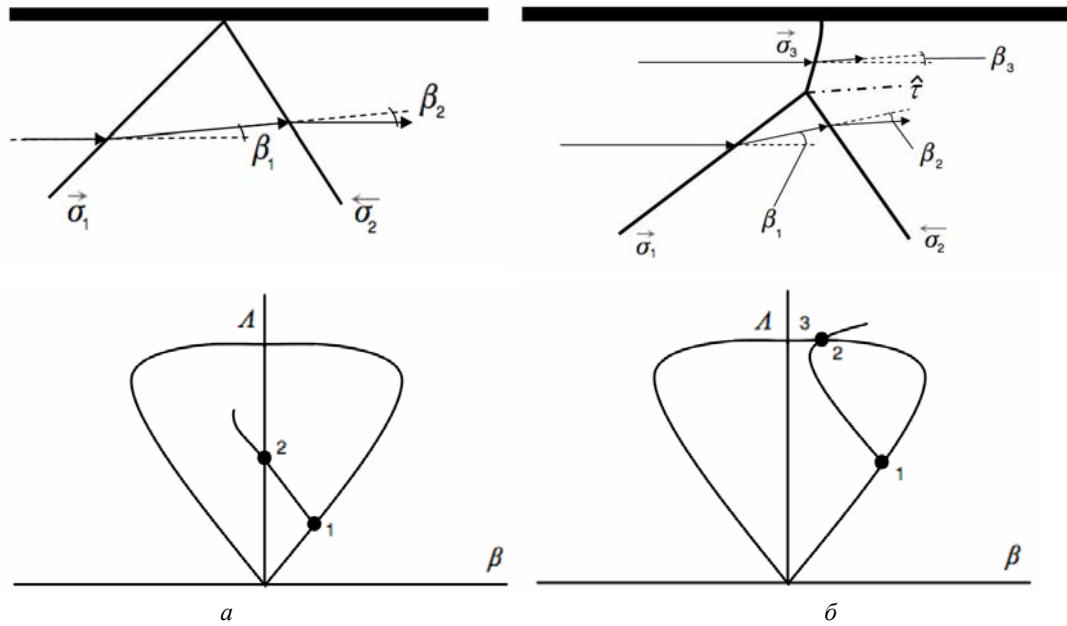


Рис. 1. Регулярное (а) и нерегулярное (б) отражение косога скачка от стенки

Fig. 1. Regular (a) and irregular (b) reflection of an oblique shock from the wall

Зависимость $\beta(J)$ в плоскости поляра, вытекающая из обычных соотношений на косом СУ, даётся следующим образом:

$$\operatorname{tg} \beta = \pm \sqrt{\frac{J_m - J}{J + \varepsilon} \frac{(1 - \varepsilon)(J - 1)}{(J_m + \varepsilon) - (1 - \varepsilon)(J - 1)}}$$

где $J_m = (1 + \varepsilon)M^2 - \varepsilon$ – максимальная интенсивность СУ (прямой СУ), $\varepsilon = (\gamma - 1) / (\gamma + 1)$. Соответственно для вторичной поляры требуется брать число Маха за первичным СУ.

Наиболее полно теоретический анализ всевозможных взаимодействий/интерференций стационарных газодинамических разрывов рассмотрен в [8; 9]; при этом способ отображения результатов физического или численного эксперимента на плоскость поляра не вызывает особых нареканий (см. выше). Вместе с тем, в многочисленных современных работах расчётного характера часто присутствуют отдельные точки (решения), которые почему-то (?) не попадают строго на ударные поляры. Разберёмся в этом вопросе.

2. Проникновение скачка в сдвиговый слой и отображение процесса на ударных полярах и поляроиде

Рассмотрим взаимодействие косога СУ с тонким сдвиговым слоем (слоем) в невязкой (вихревой) и вязкой постановке (подробно в [10; 11]), которое схематично показано на рис. 2. В качестве слоя использовалась сверхзвуковая часть пограничного слоя. Тонкий слой на момент взаимодействия его с СУ считаем сформировавшимся, поэтому локально в зоне взаимодействия влиянием вязких сил можно уже пренебречь и использовать для расчёта взаимодействия обычные соотношения на косом СУ, точнее их дифференциальное продолжение – ДУДС (см. выше), поскольку проходящий в слой СУ гладкий и криволинейный. Так выглядит невязкая или вихревая постановка задачи. Однако можно учесть действие внешнего фактора ВТ и производить расчёт на основе универсальных ОДС (см. выше), из которых автоматически при отключенном факторе ВТ следуют ДУДС. Заметим, что ОДС реализованы в рамках дискретно-аналитического подхода [11], с помощью которого и выполнялись настоящие расчёты. Существенно, что в данном подходе принципиально отсутствуют (!) такие негативные эффекты как

схемная или искусственная вязкость, а также эффекты, вызванные работой, так называемых лимитеров (монотонизирующих ограничителей) [14].

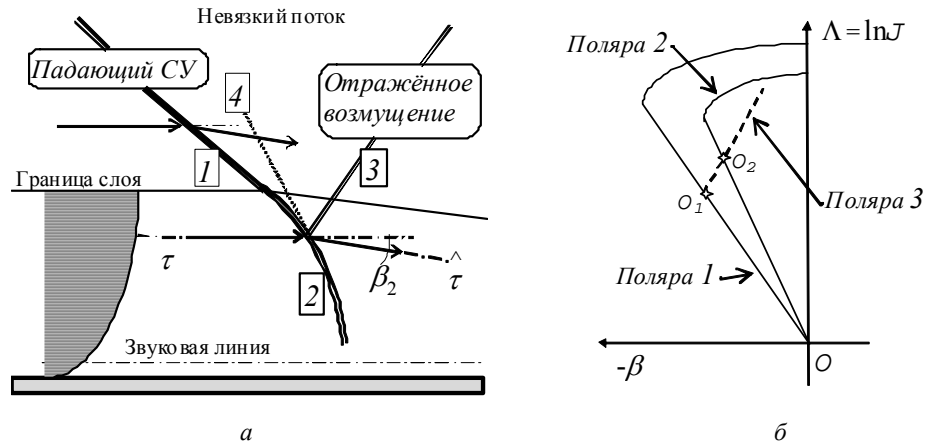


Рис. 2. Схема взаимодействия скачка уплотнения со сдвиговым слоем:
 а – физическая плоскость; б – плоскость поляра

Fig. 2. Scheme of interaction of a shock wave (SW) with a shear layer:
 а – physical plane; б – polar plane

На рис. 2, а 1–3 – основные элементы рефракции скачка, 4 – догоняющие возмущения, несущие КЭ, а τ и $\hat{\tau}$ – одна и та же линия тока до и за СУ соответственно, являющаяся вырожденным тангенциальным разрывом: его интенсивность обратно пропорциональна количеству разбиений непрерывного профиля скорости. Тоже можно сказать и об отраженном возмущении (рис. 2, а 3). Слой был предварительно рассчитан на основе УНСВТ, а далее затабулирован [11] с помощью гладких интерполянтов, так что основные параметры внутри него обладали гладкостью вплоть до вторых производных.

При известной текущей интенсивности СУ J в любой точке слоя процесс проникновения СУ в него с большей степенью схематизации можно отобразить на плоскость УВП (рис. 2, б). Для этого удобно представить этот непрерывный процесс дискретным. Поляры 1 и 2 соответствуют двум соседним линиям тока в невозмущенном течении (рис. 2, а) с малым различием (в силу непрерывности заданного профиля) чисел Маха, а линейный аналог вторичной поляры 3 отвечает линии тока за падающим СУ (соответствует числу Маха \hat{M}).

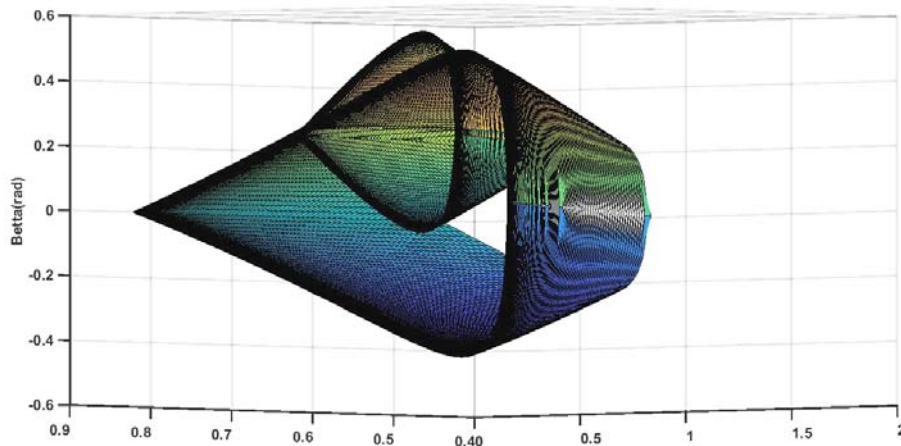


Рис. 3. Ударно-волновой поляроид

Fig. 3. Shock-wave polaroid

Процесс проникновения СУ в слой можно отобразить на объёмном ударном-волновом поле (термин В. Н. Ускова, зафиксированный в [11]) – 3D-аналоге УВП (см. рис. 3). Заметим, что необходимости в отрисовке вторичных поляр в рассматриваемой задаче нет: желательно лишь указывать направление соответствующей ветви как на схематичном рис. 2, б.

В расчёте [11] на внешней линии тока в невозмущенном потоке (см. рис. 2, а): $\rho_\infty = 1,18$; $W_\infty = 0,95$ (полная безразмерная скорость); $M_\infty = 2,275$, а за СУ $\hat{M} = 1,759$ и с каждой линией значения убывают; $Re_x = 1,6 \cdot 10^3$, $Pr = 1$ (важно только для вязкой постановки). КЭ за СУ был ослабляющим.

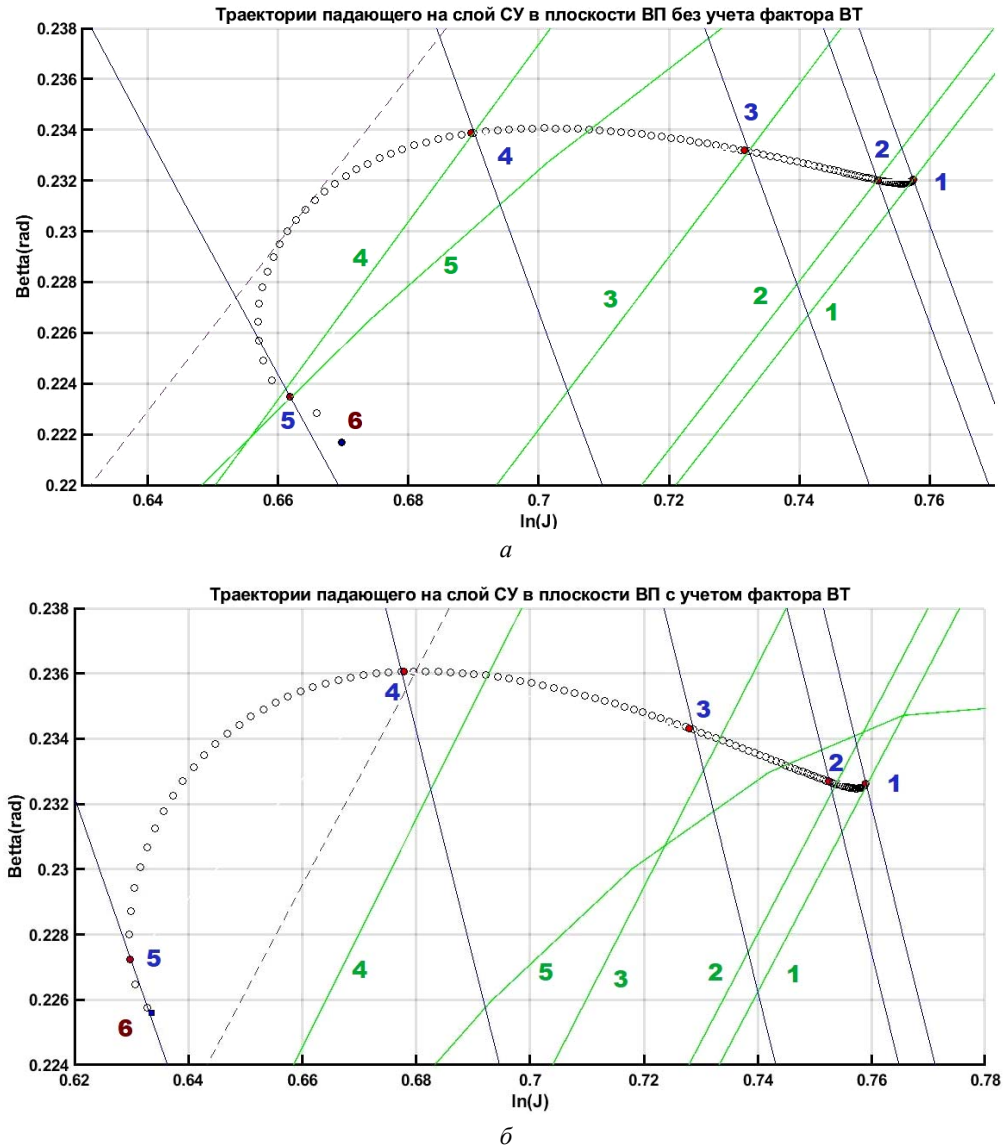


Рис. 4. Трек СУ:

a – без учета фактора ВТ; b – с учетом фактора ВТ. 1–5 – основные УП и точки траектории, соответствующие пересекаемым в физическом пространстве линиям тока; 6 – последняя точка траектории СУ; пунктир – огибающая всех УП. Основные УП показаны зелеными линиями, поперек идущими линеаризованным УВП

Fig. 4. SW track:

a – excluding VHC (Viscosity and Heat Conducting) factor; b – considering VHC factor. 1–5 – main SP (Shock Polar) and trajectory points corresponding to streamlines intersected in physical space; 6 – the last point of the trajectory of the SW (Shock Wave); dotted line – envelope of all SP. The main SP are shown with green lines running across the linearized SWP

Проанализируем различие невязких и вязких (с учётом фактора ВТ) решений в задаче проникновения СУ в сдвиговый слой на плоскости УВП и поляроиде (рис. 4).

На рис. 4 показаны траектории падающего на слой СУ в плоскости УВП в полулогарифмических координатах без учета фактора ВТ (рис. 4, а) и с учетом данного фактора (рис. 4, б). Отдельные выделенные точки траектории, соответствующие пяти пересекаемым СУ выбранным линиям тока, как и фрагменты основных УП для соответствующих чисел Маха, пронумерованы. Пунктиром показан фрагмент огибающей всех УП, для которой аналитическая зависимость получена В. Н. Усковым [8]. В вязком случае выделенные точки на траекториях (треках) СУ уже не совпадают с соответствующими УП (их номерами), и такое рассогласование накапливается по мере проникновения СУ в градиентную часть слоя; трек СУ проходит насквозь через огибающую УП (!). Обычные соотношения на косом СУ в этом случае строго не выполняются (!) и, как следствие, аппарат УВП оказывается менее пригодным. Действие фактора ВТ приводит к более резкому снижению интенсивности СУ чем то, что имеет место только под действием ослабляющего его КЭ.

На рис. 5 оба – невязкое и вязкое решения показаны в виде траекторий (треков) на поверхности основного (первичного) поляроида. Видим, что вязкое решение (красный трек) отслаивается от данного поляроида, что свидетельствует о плохой выполнимости обычных условий на косом СУ и, соответственно, к не вполне корректному использованию поляр или поляроида при отображении результатов вычислений.

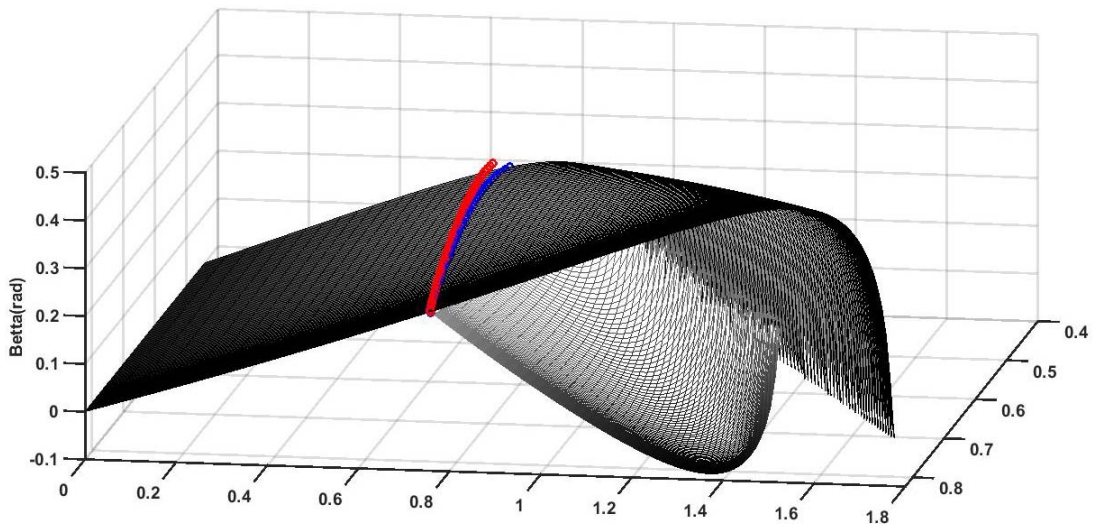


Рис. 5. Отображение траектории падающего на слой СУ на поверхность поляроида. Синий цвет – без учета фактора ВТ. Красный цвет – с учетом фактора ВТ

Fig. 5. Displaying of the trajectory incident on a layer SW on the polaroid surface. Blue color – excluding VHC factor. Red color - taking into account the VHC factor

Заключение

Показано, что в редких случаях при одновременном действии нескольких факторов: неравномерности течения перед СУ, краевого эффекта и действующего фактора ВТ – весьма распространённый способ отображения решения на плоскость ударно-волновых поляр или объёмный (3D) поляроид может быть и некорректным. Таким образом, доказано, что при использовании даже «идеальных» (отсутствуют: схемная/искусственная вязкость, лимитеры) вычислительных методик данное явление может иметь место.

Библиографические ссылки

1. Гриффитс У. Ударные волны // Современная гидродинамика. Успехи и проблемы / под ред. Дж. Бэтчелора и Г. Моффата. М. : Мир, 1984. 501 с.
2. Курант Р., Фридрихс К. Сверхзвуковые течения и ударные волны. М. : Изд-во ин. лит., 1950. 426 с.
3. Черный Г. Г. Течения газа с большой сверхзвуковой скоростью. М. : Гос. изд-во физ.-матем. лит., 1959. 220 с.
4. Бай Ши-и. Введение в теорию течения сжимаемой жидкости. М. : Изд-во ин. лит., 1962. 411 с.
5. Полачек Х., Зигер Р. И. Взаимодействие ударных волн // Основы газовой динамики / под ред. Г. Эммонса. М. : Изд-во ин. лит., 1963. С. 446–489.
6. Хейз У. Д. Основы теории газодинамических разрывов // Основы газовой динамики / под ред. Г. Эммонса. М. : Изд-во иностр. лит., 1963. 702 с.
7. Баженова Т. В., Гвоздева Л. Г. Нестационарные взаимодействия ударных волн. М. : Наука, 1977. 274 с.
8. Адрианов А. Л., Усков В. Н., Старых А. Л. Интерференция стационарных газодинамических разрывов. Новосибирск : Наука, 1995. 180 с.
9. Усков В. Н., Чернышов М. В. Экстремальные ударно-волновые системы в задачах внешней аэродинамики // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 1. С. 15–31.
10. Адрианов А. Л. Обобщенные дифференциальные соотношения на скачке уплотнения // Вопр. атомной науки и техники. Сер. Матем. моделирование физ. процессов. 2009. Вып. 4. С. 22–30.
11. Адрианов А. Л. Математическое моделирование ударных течений идеального и вязкого теплопроводного газа на основе дискретно-аналитического подхода : монография. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2016. 216 с.
12. Русанов В. В. Производные газодинамических функций за искривленной ударной волной. М., 1973. (Препринт АН СССР / ИПМ им. М. В. Келдыша; № 18).
13. Буземан А. Годографический метод газовой динамики // ZAMM. 1937. № 17(2). С. 73–79.
14. Емельянов В. Н. Разностные схемы в задачах газовой динамики на неструктурированных сетках / под ред. проф. В. Н. Емельянова, д.ф.-м.н. К. Н. Волкова. М. : Физматлит, 2014. 416 с.

References

1. Griffiths W. [Shock waves]. *Modern hydrodynamics. Successes and problems*. Ed. J. Batchelor and G. Moffat. Moscow, Mir Publ., 1984, 501 p.
2. Courant R., Friedrichs K. *Sverkhzvukovye techeniya i udarnye volny* [Supersonic flows and shock waves]. Moscow, Izd-vo in. lit. Publ., 1950, 426 p.
3. Cherny G. G. *Techeniya gaza s bol'shoy sverkhzvukovoy skorost'yu* [Gas flows with high supersonic speed]. Moscow, Gos. izd-vo fiz.-matem. lit. Publ., 1959, 220 p.
4. Bai Shi-i. *Vvedenie v teoriyu techeniya szhimaemoy zhidkosti* [Introduction to the theory of compressible liquid flow]. Moscow, Izd-vo in. lit. Publ., 1962, 411 p.
5. Polachek H., Sieger R. I. [Interaction of shock waves]. *Osnovy gazovoy dinamiki*. Ed. G. Emmons. Moscow, Izd-vo in. lit. Publ., 1963, P. 446–489.
6. Hayes W. D. [Fundamentals of the theory of gas-dynamic discontinuities]. *Osnovy gazovoy dinamiki*. Ed. G. Emmons. Moscow, Izd-vo inostr. lit. Publ., 1963, 702 p.
7. Bazhenova T. V., Gvozdeva L. G. *Nestatsionarnye vzaimodeystviya udarnykh voln* [Nonstationary interactions of shock waves]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 274 p.

8. Adrianov A. L., Uskov V. N., Starykh A. L. *Interferentsiya statsionarnykh gazodinamicheskikh razryvov* [Interference of stationary gas dynamic breaks]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1995, 180 p.
9. Uskov V. N., Chernyshov M. V. [Extreme shock-wave systems in problems of external aerodynamics]. *Teplofizika i aeromekhanika*. 2014, Vol. 21, No. 1, P. 15–31 (In Russ.).
10. Adrianov A. L. [Generalized differential relations on the shock wave]. *Vopr. atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Matem. modelirovanie fiz. protsessov*. 2009, Is. 4, P. 22–30 (In Russ.).
11. Adrianov A. L. *Matematicheskoe modelirovanie udarnykh techeniy ideal'nogo i vyazkogo teploprovodnogo gaza na osnove diskretno-analiticheskogo podkhoda* [Mathematical modeling of shock flows of ideal and viscous heat-conducting gas on the basis of a discrete-analytical approach]. Krasnoyarsk, Sib. Feder. un-ty Publ., 2016, 216 p.
12. Rusanov V. V. Derivatives of gas-dynamic functions behind a curved shock wave. M., 1973. (Preprint of the USSR Academy of Sciences / Keldysh M. V. Institute of Applied Mathematics; No. 18).
13. Busemann A. [Hodographic method of gas dynamics]. *ZAMM*. 1937, No. 17 (2), P. 73–79.
14. Emelyanov V. N. Difference schemes in problems of gas dynamics on unstructured grids. Ed. by Prof. V. N. Emelyanov, Dr. phys.-math. sciences K. N. Volkova. Moscow, Fizmatlit Publ., 2014. 416 p.

© Адрианов А. Л., Сизаско В., 2021

Адрианов Александр Леонидович – доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры летательных аппаратов, Институт космической техники, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева; профессор кафедры математического моделирования и процессов управления, Институт математики и фундаментальной информатики, Сибирский федеральный университет. E-mail: adrian58al@gmail.com.

Сизаско Всеволод – аспирант; Сибирский федеральный университет.

Adrianov Alexander Leonidovich – Dr. Sc., Associate Professor, Professor of the Department of Aircraft; Institute of Space Technology; Reshetnev Siberian State University, Professor of the Department of Mathematical Modeling and Processes of controlling; Institute of Mathematics and Fundamental Informatics, Siberian Federal University. E-mail: adrian58al@gmail.com.

Sizasko Vsevolod – post-graduate student; Siberian Federal University.

УДК 519.21

Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-568-576

Для цитирования: О выборе орбит для космических аппаратов / П. Егорычев, Т. А. Ширяева, А. К. Шлепки и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 4. С. 568–576. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-568-576.

For citation: Egorythev G. P., Shiryayeva T. A., Shlepkin A. K., Filippov K. A., Pashkovskaya O. V. On the choice of orbits for spacecrafts. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 4, P. 568–576. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-568-576.

О выборе орбит для космических аппаратов

Г. П. Егорычев¹, Т. А. Ширяева², А. К. Шлепки^{3*},
К. А. Филиппов², О. В. Пашковская³

¹Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, просп. Свободный, 70

²Красноярский государственный аграрный университет
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, просп. Мира, 90

³Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: ak_kgau@mail.ru

Рассматривается задача распределения заданного числа космических аппаратов по некоторому структурированному множеству орбит, состоящему из $n = p^k$ орбит. Решение данной задачи дано при условии, что множество возможных орбит для космических аппаратов совпадает с количеством космических аппаратов. Дополнительно предполагается, что данное множество разбито на непересекающиеся подмножества орбит, причем количество орбит в указанных подмножествах одинаково. В рассматриваемой ситуации оно равно некоторому простому числу p . В настоящее время используется несколько орбит для размещения на них спутников в зависимости от решаемых ими задач. Геостационарная орбита используется для прямого телевидения. Низкие спутниковые орбиты используются для связи между спутниковыми телефонами. Свои орбиты существуют для спутников систем навигации GPS, Navstar, ГЛОНАСС, военных спутников, спутников для различных научных исследований. Естественно, что в этих условиях возникает задача структурирования множества орбит при некоторых ограничениях на нахождение космического аппарата на заданных орбитах в зависимости от назначения космического аппарата. Рассмотрен вопрос сложности вычисления количества орбит при данных ограничениях.

Ключевые слова: спутник, орбита, подстановка.

On the choice of orbits for spacecrafts

G. P. Egorythev¹, T. A. Shiryayeva², A. K. Shlepkin^{3*},
K. A. Filippov², O. V. Pashkovskaya³

¹Siberian Federal University
70, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation

²Krasnoyarsk State Agrarian University

90, Mira Av., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation

³Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: ak_kgau@mail.ru

The problem of distribution of a given number of spacecrafts over a certain structured set of orbits consisting of $n = p^k$ orbits is considered. The solution to this problem is given under the condition that the set of possible orbits for spacecraft coincides with the number of spacecrafts. In addition, it is assumed that the given set is divided into disjoint subsets of orbits, and the number of orbits in the indicated subset is the same. In the situation under consideration, it is equal to some prime number p . Currently, several orbits are used to place satellites on them, depending on the tasks they solve. Geostationary orbit is used for live TV broadcasting. Low satellite orbits are used for communication between satellite phones. Their own orbits exist for satellites of navigation systems GPS, Navstar, GLONASS, military satellites, satellites for various scientific research. Naturally, under these conditions, the problem arises of structuring a set of orbits with some restrictions on the location of the spacecraft in given orbits, depending on the purpose of the spacecraft. The problem of the complexity of calculating the number of orbits under these constraints is considered.

Keywords: satellite, orbit, substitution.

Введение

Продолжены исследования, начатые в [1] и посвященные решению задачи о выборе наиболее благоприятных орбит для космических аппаратов того или иного класса, а также задача распределения заданного количества спутников по заданному множеству орбит при существующих запретах на нахождение спутника на некоторых орбитах. В статье приведено решение данной задачи при следующих условиях: число спутников n совпадает с числом возможных орбит нахождения на них спутников; каждому спутнику запрещено находиться ровно на одной орбите; два спутника не могут находиться на одной орбите; количество орбит разбивается на непересекающиеся блоки определенной конфигурации ($n = p^k$). Приводится формула позволяющая вычислить число возможных комбинаций для распределений спутников по таким орбитам.

Постановка задачи, определения, обозначения

Математическая модель задачи. Под подстановкой будем понимать взаимно однозначное отображение, записанное в виде таблицы размерности $2 \times n$:

$$g = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ i_1 & i_2 & \dots & i_n \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Подстановка называется регулярной, если $k \neq i_k$, т. е.

$$i_1 \neq 1, i_2 \neq 2, \dots, i_n \neq n. \quad (2)$$

Напомним, что под порядком подстановки в теоретико-групповом смысле понимается такое минимально возможное натуральное число m , что

$$g^m = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ i_1 & i_2 & \dots & i_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ i_1 & i_2 & \dots & i_n \end{pmatrix} \cdot \dots \cdot \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ i_1 & i_2 & \dots & i_n \end{pmatrix}}_{m \text{ раз}} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ 1 & 2 & \dots & n \end{pmatrix} = e$$

– единичная подстановка. При этом произведение подстановок – это последовательное выполнение отображений-множителей. В данной работе мы будем рассматривать случай $n = p^k$, где p – простое число. Будет рассмотрена задача перечисления всех регулярных подстановок степени n , имеющих порядок p . Под циклической формой записи подстановки g , степени n и имеющей порядок p будем понимать следующее:

$$g = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ i_1 & i_2 & \dots & i_n \end{pmatrix} = \left(i_1^{(1)} \dots i_p^{(1)} \right) \cdot \dots \cdot \left(i_{n-p+1}^{(p^{k-1})} \dots i_n^{(p^{k-1})} \right). \quad (3)$$

Приведенные выше понятия из теории подстановок можно найти в [2]. Таким образом, каждому варианту расположения спутников на орбитах, указанному выше, будет соответствовать в точности одна регулярная подстановка вида (3). Дополнительно приведена оценка сложности вычисления числа указанных орбит.

Основные результаты

Число регулярных подстановок степени $n = p^k$ и имеющих порядок p будем обозначать через $R(n, p, k)$.

Теорема 1.

$$R(n, p, k) = \frac{(p^k)!}{p^{p^{k-1}} \cdot (p^{k-1})!}. \quad (4)$$

Доказательство. Число возможных комбинаций для первого цикла $(i_1^{(1)} \dots i_p^{(1)})$ равно

$$p^k \cdot (p^k - 1) \cdot \dots \cdot (p^k - p + 1).$$

С учетом того, что цикл при «круговом» сдвиге элементов не меняется как подстановка, имеем:

$$\frac{p^k \cdot (p^k - 1) \cdot \dots \cdot (p^k - p + 1)}{p}.$$

Число возможных комбинаций для второго цикла $(i_1^{(2)} \dots i_p^{(2)})$ равно

$$(p^k - p) \cdot (p^k - (p + 1)) \cdot \dots \cdot (p^k - (2p - 1)).$$

С учетом того, что цикл при «круговом» сдвиге элементов не меняется, как подстановка, имеем

$$\frac{(p^k - p) \cdot (p^k - (p + 1)) \cdot \dots \cdot (p^k - (2p - 1))}{p}.$$

Действуя подобным образом для последнего цикла с номером (p^{k-1}) , получаем

$$\frac{(p^k - (p^k - p)) \cdot (p^k - (p^k - (p - 1))) \cdot \dots \cdot (p^k - (p^k - (p - (p - 1))))}{p}.$$

Произведение числа комбинаций для всех циклов есть

$$\begin{aligned} & \frac{p^k \cdot (p^k - 1) \cdot \dots \cdot (p^k - p + 1)}{p} \times \\ & \times \frac{(p^k - p) \cdot (p^k - (p + 1)) \cdot \dots \cdot (p^k - (2p - 1))}{p} \cdot \dots \times \\ & \times \frac{(p^k - (p^k - p)) \cdot (p^k - (p^k - (p - 1))) \cdot \dots \cdot (p^k - (p^k - (p - (p - 1))))}{p} = \\ & = \frac{p^k!}{p^{(p^{k-1})}}. \end{aligned}$$

Для завершения доказательства достаточно разделить указанную величину на $p^{k-1}!$. Получаем

$$R(n, p, k) = \frac{p^k!}{p^{\binom{p^{k-1}}{p}} \cdot p^{k-1}!}.$$

Теорема доказана.

Оценка сложности оптимального алгоритма для вычисления числа $R(n, p, k)$

Приведём несколько полезных свойства чисел $R(n, p, k)$, из которых наибольшую важность представляет второе из них, где приведена оценка сложности оптимального алгоритма для вычисления числа $R(n, p, k)$.

Определение. Пусть $A(n), B(n)$ – числовые функции, зависящие от натурального n . Выражение $A(n) \sim B(n)$ означает, что $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{A(n)}{B(n)} = 1$.

Теорема 2. При $n \rightarrow \infty$

$$R(n, p, k) \sim p^{\frac{1}{2}} \left(p^k / e \right)^{p^{k-1}(p-1)}. \tag{5}$$

Доказательство. Ввиду классической асимптотической формулы Стирлинга для факториала $n!$ при $n \rightarrow \infty$: $n! \sim \sqrt{2\pi n} \cdot (n/e)^n$ получаем:

$$\begin{aligned} R(n, p, k) &= \frac{p^k!}{p^{\binom{p^{k-1}}{p}} \cdot p^{k-1}!} = \frac{\sqrt{2\pi p^k} \left(\frac{p^k}{e} \right)^{p^k}}{p^{p^{k-1}} \sqrt{2\pi p^{k-1}} \left(\frac{p^{k-1}}{e} \right)^{p^{k-1}}} = \\ &= \frac{\sqrt{p^k} \left(\frac{p^k}{e} \right)^{p^k}}{p^{p^{k-1}} \sqrt{p^{k-1}} \left(\frac{p^{k-1}}{e} \right)^{p^{k-1}}} = \frac{p^{\frac{k}{2}} \left(\frac{p^k}{e} \right)^{p^k}}{p^{p^{k-1}} p^{\frac{k-1}{2}} \left(\frac{p^{k-1}}{e} \right)^{p^{k-1}}} = \\ &= \frac{p^{\frac{k}{2}} \left(\frac{p^k}{e} \right)^{p^k}}{p^{p^{k-1}} p^{\frac{k-1}{2}} \left(\frac{p^{k-1}}{e} \right)^{p^{k-1}}} = \frac{p^{\frac{1}{2}} \left(\frac{p^k}{e} \right)^{p^k}}{p^{p^{k-1}} \left(\frac{p^{k-1}}{e} \right)^{p^{k-1}}} = \\ &= \frac{p^{\frac{1}{2}} \left(\frac{p^{k-1}}{e} \right)^{p^k} p^{p^k}}{p^{p^{k-1}} \left(\frac{p^{k-1}}{e} \right)^{p^{k-1}}} = \frac{p^{\frac{1}{2}} \left(\frac{p^{k-1}}{e} \right)^{p^k} p^{p^k}}{p^{p^{k-1}} \left(\frac{p^{k-1}}{e} \right)^{p^{k-1}}} = \frac{p^{\frac{1}{2}} \left(\frac{p^{k-1}}{e} \right)^{p^k - p^{k-1}}}{p^{p^{k-1}} \left(\frac{p^{k-1}}{e} \right)^{p^{k-1}}} \cdot p^{p^k} = \\ &= p^{\frac{1}{2}} \left(\frac{p^{k-1}}{e} \right)^{p^k - p^{k-1}} \cdot p^{p^k - p^{k-1}} = p^{\frac{1}{2}} \left(\frac{p^k}{e} \right)^{p^{k-1}(p-1)}. \end{aligned}$$

Теорема доказана.

Формула (5) показывает, что число $R(n, p, k)$ с ростом k растёт очень быстро, как $O\left(\left(\frac{p}{e}\right)^{(p-1)p^{k-1}}\right)$. Вместе с тем В. В. Кочергин в 1994 г. в [3] привёл оптимальный алгоритм,

позволяющий находить значение 2^n (исходя из 2) за

$$O(\log n) \tag{6}$$

арифметических операций умножения. В свою очередь Р. В. Borwein в 1985 г. в [4] привёл быстрый алгоритм для вычисления факториала $n!$, сложность которого равна

$$O\left(n(\log n(\log(\log n)))^2\right) \tag{7}$$

(см. также [5; 6]). Оценки сложности (6) и (7) применительно к формуле (4) для числа $R(n, p, k)$, содержащей два факториала $(p^k)!$ и $(p^{k-1})!$, дают следующий результат.

Теорема 3. Быстрые алгоритмы Кочергина и Borwein при $n = p^k$ и $n = p^{k-1}$ соответственно, порождают оптимальный алгоритм для вычисления числа $R(n, p, k)$, сложность которого равна

$$O\left(p^k \cdot (\log p^k \cdot \log(\log p^k))^2\right). \tag{8}$$

Производящие функции различного типа, как и интегральные представления функций одного и нескольких комплексных переменных, являются основными инструментами современного перечислительного комбинаторного анализа [7–15]. Используя следующие хорошо известные интегральные формулы для факториала $n!$ и $1/n!$, например [6],

$$n! = \int_0^\infty s^n e^{-s} ds, \tag{9}$$

$$\frac{1}{n!} = \frac{1}{2\pi i} \int_{|x|=\gamma} e^x x^{-n-1} dx, \quad 0 < \gamma < \infty, \tag{10}$$

мы получаем

Теорема 4. Число $R(n, p, k)$ имеет следующее интегральное представление:

$$R(n, p, k) = \int_0^\infty s^n e^{-s} ds \cdot \frac{1}{2\pi i} \int_{|x|=\gamma} e^x x^{-n-1} dx, \quad 0 < \gamma < \infty. \tag{11}$$

Заключительные выкладки мы проведём с помощью метода коэффициентов Егорычева интегрального представления и вычисления комбинаторных сумм [14; 15].

Определение. Введём в рассмотрение интегралы вида

$$H_p(\delta) = \int_0^\infty e^{-s+\delta s^p} ds, \tag{12}$$

где p – простое число; δ – действительное число, не зависящее от s .

Пусть $S(z)$ – производящая функция степенного типа для последовательности $R(n, p, k)$, $k = 1, 2, \dots$,

$$S(z) = \sum_{k=1}^{\infty} R(n, p, k) z^n = \sum_{k=1}^{\infty} R(n, p, k) z^{p^k}.$$

Теорема 5 (интегральное представление для функции $S(z)$). Производящая функция $S(z)$ допускает следующее представление:

$$S(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{|t|=u} \int_0^{\infty} e^{-s+tz^p s^p} t^{-1} A(t, k) ds dt, \quad (13)$$

где функция (ряд) $A(t, k)$ – ядро интегрального представления функции $S(z)$ имеет следующий вид:

$$A(t, k) = \sum_{k=1}^{\infty} (pt)^{-p^{k-1}}, |pt| > 1 \text{ при любом } p \quad (14)$$

или с учетом (12)

$$S(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{|t|=u} t^{-1} H_p(tz^p) A(t, k) dt. \quad (15)$$

Доказательство. Используя формулу (11) для чисел $R(n, p, k)$, имеем

$$\begin{aligned} S(z) &= \sum_{k=1}^{\infty} R(n, p, k) z^{p^k} = \\ &= \frac{1}{p^{p^{k-1}}} \sum_{k=1}^{\infty} z^{p^k} \cdot \int_0^{\infty} s^{p^k} e^{-s} ds \cdot \frac{1}{2\pi i} \int_{|x|=\gamma} e^x x^{-1-p^{k-1}} dx = \\ &= \frac{1}{p^{p^{k-1}}} \sum_{k=1}^{\infty} \left(z^{p^{k-1}} \right)^p \cdot \int_0^{\infty} \left(s^{p^{k-1}} \right)^p e^{-s} ds \cdot \frac{1}{2\pi i} \int_{|x|=\gamma} e^x x^{-1-p^{k-1}} dx = \\ &= \frac{1}{p^{p^{k-1}}} \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} \left(z^m \right)^p \cdot \int_0^{\infty} \left(s^m \right)^p e^{-s} ds \cdot \frac{1}{2\pi i} \int_{|x|=\gamma} e^x x^{-1-p^{k-1}} dx \cdot \delta(m - p^{k-1}) \right\}. \end{aligned} \quad (16)$$

Здесь $\delta(m - p^{k-1})$ – дельта-функция:

$$\delta(m - p^{k-1}) = \frac{1}{2\pi i} \int_{|t|=u} e^{-1+m-p^{k-1}t} dt, \quad (0 < u < \infty).$$

Тогда формула (16) примет вид

$$\frac{1}{p^{p^{k-1}}} \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} \left(z^m \right)^p \cdot \int_0^{\infty} \left(s^p \right)^m e^{-s} ds \cdot \frac{1}{2\pi i} \int_{|x|=\gamma} e^x x^{-m-1} dx \cdot \frac{1}{2\pi i} \int_{|t|=u} e^{m-p^{k-1}t} dt \right\} =$$

(перегруппировка членов в последней сумме с выделением в квадратных скобках тех из них, которые содержат индекс m)

$$= \frac{1}{p^{p^{k-1}}} \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{2\pi i} \int_{|t|=u} \int_0^{\infty} \left[\sum_{m=0}^{\infty} \left(tz^p s^p \right)^m \cdot \frac{1}{2\pi i} \int_{|x|=\gamma} e^x x^{-m-1} dx \right] \cdot e^{-s} t^{-1-p^{k-1}} ds dt \right\} =$$

(суммирование в квадратных скобках по индексу m , правило подстановки, замена $x = tz^p s^p$)

$$= \frac{1}{p^{p^{k-1}}} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2\pi i} \int_{|t|=u} \int_0^{\infty} e^{tz^p s^p} e^{-s} t^{-1-p^{k-1}} ds dt =$$

(занесение знака суммы за знак интеграла). При этом, поскольку выбор параметра u ничем не ограничен, $0 < u < \infty$, то мы выбираем $u > 1/2$, чтобы неравенство $|pt| > 1$ выполнялось при любом простом p ,

$$= \frac{1}{2\pi i} \int_{|t|=u} \int_0^{\infty} e^{-s+tz^p s^p} t^{-1} \left(\sum_{k=1}^{\infty} (pt)^{-p^{k-1}} \right) ds dt,$$

что завершает доказательство теоремы 5.

Заключение

Таким образом, решена задача распределения спутников по заданному множеству орбит при определенных условиях: количество всевозможных комбинаций определяется числом регулярных подстановок $R(n, p, k)$. Приведена оценка сложности оптимального алгоритма для вычисления этого числа.

Заметим, что преобразование (16) несколько парадоксально, поскольку вводит дополнительную сумму по индексу m и тем самым на порядок усложняет исходное выражение. Однако это преобразование совместно с введением дельта-функции позволило получить для числа $R(n, p, k)$ интегральное представление нового типа. Отметим также, что преобразование (16) встретилось в практике метода коэффициентов впервые, что предоставляет новые возможности для эффективного применения этого метода.

В связи с вышеизложенным имеет смысл постановка следующей проблемы: изучить свойства (новой) специальной функции $H_p(\delta) = \int_0^{\infty} e^{-s+\delta s^p} ds$ – части ядра интегрального представления (15) производящей функции $S(z)$.

Библиографические ссылки

1. О распределении космических аппаратов по заданному числу орбит / Г. П. Егорычев, Т. А. Ширяева, А. К. Шлепкин и др. // Сибирский журнал науки и технологий. 2020. Т. 21, № 2. С. 170–175. Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-2-170-175.
2. Глухов М. М., Елизаров В. П., Нечаев А. А. Алгебра. СПб. : Лань, 2015. 606 с.
3. Kochergin V. V. About complexity of computation one-terms of powers // Discrete Analysis, IM SO RAN. 1994. Vol. 27. P. 84–107.
4. Borwein P. B. On the Complexity of Calculating Factorials // Journal of Algorithms. 1985. Vol. 6. P. 376–380.
5. Boiten E. A. Factorisation of the factorials an example of inverting the flow of computation // Periodica Polytechnica, Ser. EL. ENG. 1991. Vol. 35, № 2. P. 77–99.
6. Ficret Cihan, Fatix Audin, Advan Fatih A Kocamaz. A new method for fast computation of factorials of numbers // Balcan Journal of Mathematics. 2013. P. 16–27.
7. Стенли Р. Перечислительная комбинаторика / пер. с англ. М. : Мир, 1990. 440 с.
8. Kuzmin O. V. Introduction to combinatorial methods of discrete mathematics. Irkutsk: ISU Publishing House, 2012. 113 p.
9. Aigner M. Combinatorial theory. Springer-Verlag, New York, 1979.
10. Touchard J. Sur un problème de permutations / ed. C. R. Acad. Sci. Paris. 1934.
11. Kaplansky I. Solution of the “problème des ménages” // Bull. Amer. Math. Soc. 1943. Vol. 49. P. 784–785.
12. Riordan J. An introduction to combinatorial analysis. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1982. 288 p.

13. Minc H. Permanents // *Encyclopedia of Mathematics and Its Applications*. 1978. Vol. 6.
14. Egorychev G. P. Integral Representation and the Computation of Combinatorial Sums // *Math. Monographs*. Vol. 59. Novosibirsk, Nauka, 1984. 300 p.
15. Егорычев Г. П. Дискретная математика. Перманенты. Красноярск : Изд-во СФУ, 2007. 272 с.

References

1. Egorychev G. P., Shiryayeva T. A., Shlepkin A. K. et al. [On the distribution of spacecraft over a given number of orbits]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2020, Vol. 21, No. 2, P. 170–175. Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-2-170-175.
2. Glukhov M. M., Elizarov V. P., Nechaev A. A. *Algebra* [Algebra]. Sankt-Peterburg, Lan' Publ., 2015, 606 p.
3. Kochergin V. V. About complexity of computation one-terms of powers. *Discrete Analysis*. 1994. Vol. 27, P. 84–107.
4. Borwein P. B. On the Complexity of Calculating Factorials. *Journal of Algorithms*. 1985, Vol. 6, P. 376–380.
5. Boiten E. A. Factorisation of the factorials an example of inverting the flow of computation. *Periodica Polytechnica*. 1991, Vol. 35, No. 2, P. 77–99.
6. Ficret Cihan, Fatix Audin, Advan Fatih A Kocamaz. A new method for fast computation of factorials of numbers. *Balkan Journal of Mathematics*. 2013, P. 16–27.
7. Stanley R. P. Enumerative combinatorics. Cambridge University Press, 1999, 595 p.
8. Kuzmin O. V. Introduction to combinatorial methods of discrete mathematics. Irkutsk, ISU Publishing House, 2012, 113 p.
9. Aigner M. Combinatorial theory. Springer-Verlag, New York, 1979.
10. Touchard J. Sur unproble'me de permutations, ed. C. R. Acad. Sci. Paris, 1934.
11. Kaplansky I. Solution of the "proble'me des me'nages". *Bull. Amer. Math. Soc.* 1943, Vol. 49, P. 784–785.
12. Riordan J. An introductions to combinatorial analysis. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1982, 288 p.
13. Minc H. Permanents. *Encyclopedia of Mathematics and Its Applications*. 1978, Vol. 6.
14. Egorychev G. P. Integral Representation and the Computation of Combinatorial Sums // *Math. Monographs*. Vol. 59, Novosibirsk, Nauka, 1984, 300 p.
15. Egorychev G. P. *Diskretnaya matematika. Permanenty* [Discrete Math. Permanent]. Krasnoyarsk, Izd-vo SFU Publ., 2007, 272 p.

© Егорычев Г. П., Ширяева Т. А., Шлепкин А. К.,
Филиппов К. А., Пашковская О. В., 2021

Егорычев Георгий Петрович – доктор физико-математических наук, профессор; Сибирский федеральный университет.

Ширяева Тамара Алексеевна – кандидат физико-математических наук, доцент; Красноярский государственный аграрный университет. E-mail: tas_sfu@mail.ru.

Шлепкин Анатолий Константинович – доктор физико-математических наук, профессор; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: ak_kgau@mail.ru.

Филиппов Константин Анатольевич – доктор физико-математических наук, доцент; Красноярский государственный аграрный университет. E-mail: filippov_kostya@mail.ru.

Пашковская Ольга Владимировна – кандидат физико-математических наук, доцент; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: pashkovskaya@sibsau.ru.

Egorythev Georgiy Petrovich – D. Sc., Professor, Siberian Federal University.

Shiryaeva Tamara Alekseevna – Cand. Sc., associate Professor; Krasnoyarsk State Agrarian University. E-mail: tas_sfu@mail.ru.

Shlepkov Anatoliy Konstantinovich – D. Sc., Professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: ak_kgau@mail.ru.

Filippov Konstantin Anatol'vich – D. Sc., Professor; Krasnoyarsk State Agrarian University. E-mail: filippov_kostya@mail.ru.

Pashkovskaya Olga Vladimirovna – Cand. Sc., associate Professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: pashkovskaya@sibsau.ru.

УДК 517.977.5-629.783

Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-577-588

Для цитирования: Кабанов С. А., Митин Ф. В. Решение задачи фильтрации при оптимальной настройке радиоотражающего сетеполотна трансформируемого рефлектора // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 4. С. 577–588. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-577-588.

For citation: Kabanov S. A., Mitin F. V. Solution of the filtration problem with the optimal adjustment of the radio-reflecting net of a transformable reflector. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 4, P. 577–588. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-577-588.

Решение задачи фильтрации при оптимальной настройке радиоотражающего сетеполотна трансформируемого рефлектора*

С. А. Кабанов, Ф. В. Митин¹

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова»
Российская Федерация, 199005, г. Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., 1
¹E-mail: fedor28@list.ru

В данной работе рассматривается решение задачи фильтрации с применением фильтра Калмана при оптимальной настройке радиоотражающего сетеполотна. Рассмотрен крупногабаритный трансформируемый рефлектор космического базирования. В процессе выведения данной конструкции на заданную орбиту возможен уход реальной формы радиоотражающего сетеполотна от желаемой. Для обеспечения поточечной настройки активной части сетеполотна применяется тросо-вантовая система. Узловые точки радиоотражающей поверхности связаны с тыльной стороной сетеполотна через ванты. В них встроены актюаторы, позволяющие изменять длину вант. В качестве исполнительного органа выбран пьезоактюатор. Путем поточечной настройки пьезоактюаторов происходит натяжение сетеполотна до необходимой формы. Это позволяет обеспечивать качественную диаграмму направленности и высокий уровень сигнала при приёме-передаче данных. Приведены конкретные значения возмущающих воздействий. Для измерения напряжения питания на пьезоактюаторе и длины ванты применяются преобразователь напряжения и лазерный сканер. Определены возможные отклонения от расчётного начального положения. В соответствии с принципом разделения сперва решается задача оценивания, затем задача управления. Задача оценивания решается с использованием фильтра Калмана. Задача управления – с использованием алгоритма оптимального управления по иерархии целевых критериев. Представлены результаты численного моделирования. Показано успешное решение поставленной задачи при вариативных значениях шумов измерений и возмущающих воздействий. Приведено сравнение с траекториями, полученными с использованием различных алгоритмов оптимального управления.

Ключевые слова: алгоритм последовательной оптимизации, крупногабаритный трансформируемый рефлектор, радиоотражающее сетеполотно, пьезоактюатор, математическая модель, моделирование.

* Исследование выполнено в организации БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (доп. соглашение от 09.06.2020 № 075-03-2020-045/2 на выполнение базовой части государственного задания «Разработка фундаментальных основ создания и управления группировками высокоскоростных беспилотных аппаратов космического и воздушного базирования и группами робототехнических комплексов наземного базирования»).

The work was carried out in BSTU “VOENMEH” named after D. F. Ustinov with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (government contract agreement No 075-03-2020-045/2 of 09.06.2020).

Solution of the filtration problem with the optimal adjustment of the radio-reflecting net of a transformable reflector

S. A. Kabanov, F. V. Mitin¹

Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D. F. Ustinov
1, 1 Krasnoarmeyskaya St., St. Petersburg, 199005, Russian Federation

¹E-mail: fedor28@list.ru

In this paper, we consider the solution of the filtering problem using the Kalman filter with the optimal tuning of the radio-reflecting net. A large-sized transformable space-based reflector is considered. In the process of placing in orbit this structure, it is possible that the real form of the radio-reflecting net can deviate the desired one. To ensure point-to-point adjustment of the active part of the mesh, a cable-cable system is used. The nodal points of the radio-reflecting surface are connected to the back side of the net through cables. They have built-in actuators that allow you to change the length of the cables. A piezo actuator was selected as a control device. By point-by-point adjustment of the piezo actuators, the net is stretched to the required shape. This allows you to provide a high-quality radiation pattern and a high signal level when receiving and transmitting data. Specific values of the disturbing influences are given. To measure the supply voltage on the piezo actuator and the cable length, a voltage converter and a laser scanner are used. Possible deviations from the calculated initial position are determined. In accordance with the principle of separation, the estimation problem is solved first, then the control problem. The estimation problem is solved using the Kalman filter. The control problem is solved using the optimal control algorithm according to the hierarchy of target criteria. The results of numerical simulation are presented. The successful solution of the problem is shown with variable values of measurement noise and disturbing influences. Comparison with trajectories obtained using various optimal control algorithms is given.

Keywords: sequential optimization algorithm, large-sized transformable reflector, radio-reflective net, piezo actuator, mathematical model, modeling.

Введение

В настоящее время спутники связи активно используются для решения широкого круга задач [1; 2]. Одним из конструктивных способов реализации таких спутников является создание крупногабаритных космических рефлекторов [3–5]. Ведутся активные разработки в этой области. Данные конструкции позволяют работать одновременно в нескольких частотах, обладают большой областью засвечивания [6–9].

Рассмотрим реализацию крупногабаритной космической конструкции с применением вантовой системы для создания необходимой формы радиоотражающей поверхности рефлектора (рис. 1) [10–14]. Крупногабаритный трансформируемый рефлектор (КТР) состоит из космического аппарата (КА) 1. К нему прикреплены разворачиваемые элементы, такие как солнечные батареи 2, облучающая система 3. Для обеспечения заданной диаграммы направленности штанга 4 выдвигает рефлектор 5 на необходимое фокусное расстояние. Отражающей поверхностью является сетеполотно 6.

Для эффективного использования спутников связи необходимо поддержание точной формы радиоотражающего сетеполотна 6. Это позволяет обеспечивать качественную диаграмму направленности и высокий уровень сигнала при приеме-передаче данных [15; 16].

Ввиду эксплуатации оборудования в космическом пространстве возникают периодические возмущающие воздействия на конструкцию рефлектора. Такие возмущения вызваны изменением температурного режима, наличием радиации, солнечного ветра [17; 18]. В процессе получения сведения о состоянии формы радиоотражающей поверхности необходимо учитывать влия-

ние шумов измерений. Ввиду ограниченности запасов энергии на рефлекторе важным является минимизация энергетических затрат.

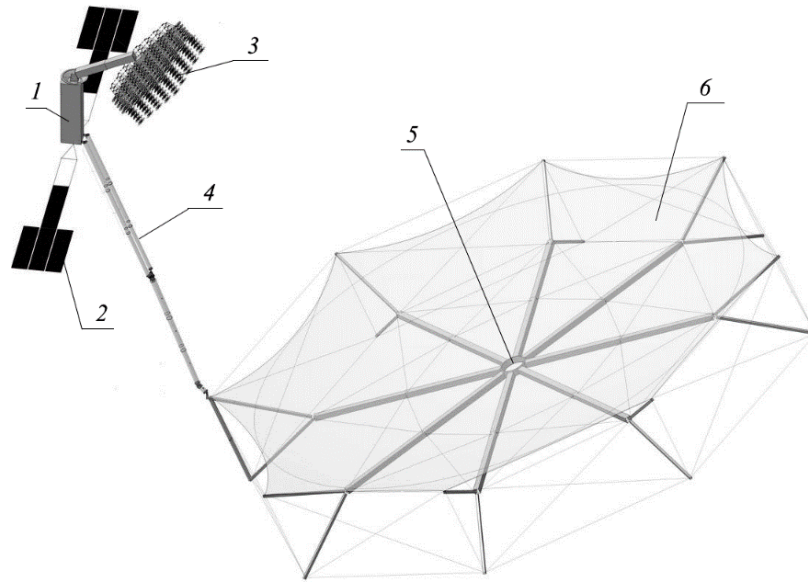


Рис. 1. Конструкция крупногабаритного трансформируемого рефлектора

Fig. 1. The design of the LTR (Large-sized transformable reflector)

Таким образом, необходимо осуществить точечную поднастройку сетеполотна при минимизации энергетических затрат, учитывая влияние шумов измерения и внешних возмущающих воздействий.

Математическое описание задачи

На рис. 2 представлена одна спица КТР в сечении, где 1 – спица, 2 и 3 – внешняя и задняя сетка, 4 – ванты, в которых установлены актюаторы. Необходимо, изменяя длину вант 4 с помощью актюаторов 5, задать желаемую форму радиоотражающего сетеполотна 2, обеспечив тем самым требуемую диаграмму направленности. В качестве актюаторов рассматривался пьезопривод. Желаемая форма задаётся в наземных условиях. В процессе доставки КТР на заданную орбиту и при раскрытии конструкции может происходить незначительное смещение реальной формы от желаемой. После развёртывания происходит сверка контрольных точек и на актюаторы 5 передаётся управляющее воздействие для изменения длины ванты 4.

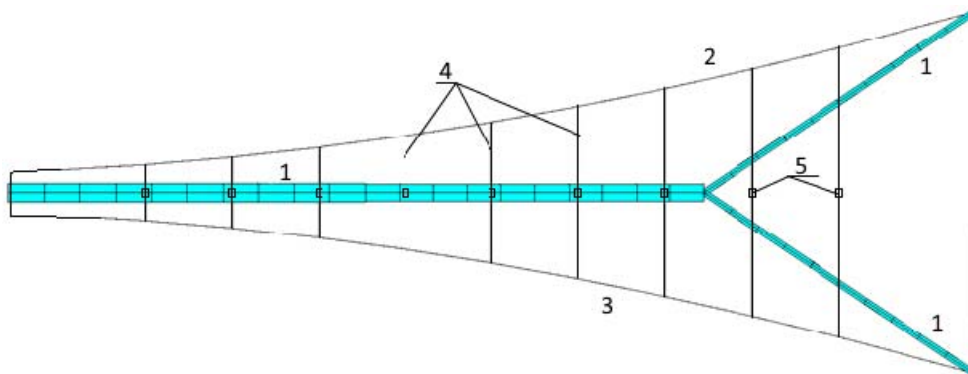


Рис. 2. Спица в сечении

Fig. 2. The spoke in cross section

В качестве актюатора для управления настройкой радиоотражающего сетеполотна выбран пьезоактюатор типа АПМ [19] с перемещением $l_{\max} = 10$ мм при допуске перемещения ± 15 %. Для измерения напряжения на входе пьезоактюатора взят преобразователь напряжения измерительный ПИН-50-У-4/20-ДХ [19] с основной приведенной погрешностью не более 1,5 %. Для измерения изменения длины ванты используется лазерный сканер RangeVision Standard Plus [21] с точностью $\pm 0,03$ мм.

Система дифференциальных уравнений, описывающих пьезоэлемент с исполнительным органом на основании выводов А. А. Никольского [22], имеет вид $\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}(\mathbf{X}, u, t) + \xi_x$, где $\mathbf{X} = (l \ V \ U_3)^T$ – вектор состояния, $\xi_x = [\xi_{x1} \ \xi_{x2} \ \xi_{x3}]^T$ – шум с интенсивностью $\mathbf{B}_x = \text{diag}(B_{x1}, B_{x2}, B_{x3})$. Или в поэлементном виде

$$\begin{aligned} \dot{l} &= V + \xi_{x1}, \\ \dot{V} &= \frac{NK_0 U_3 + F_c - K_y l - K_d V}{m_\Sigma} + \xi_{x2}, \\ \dot{U}_3 &= \frac{e_3}{C_0 R_{\text{вт}} K_d} - \frac{U_3}{C_0 R_{\text{вт}} K_d} - \frac{K_{\text{п}} V}{C_0 K_d} + \xi_{x3}, \end{aligned} \quad (1)$$

где l – изменение длины (ход) актюатора; V – скорость выдвигания актюатора; N – количество элементов; K_0 – коэффициент обратного пьезоэффекта; U_3 – электрическое напряжение, приложенное к электродам актюатора; F_c – статическое усилие; K_y – коэффициент упругости; K_d – коэффициент внутреннего демпфирования; e_3 – напряжение от источника электродвижущей силы; C_0 – ёмкость; $R_{\text{вт}}$ – внутреннее сопротивление; $K_{\text{п}}$ – коэффициент прямого пьезоэффекта; m_Σ – суммарная масса, состоящая из массы самого пьезоактюатора и перемещаемой массы.

Общепринятая на практике постановка задачи совмещенного синтеза оптимального управления линейными системами опирается на теорему разделения. Согласно этой теореме, оптимальная система управления состоит из оптимального фильтра, формирующего оценки вектора состояния системы, и оптимального регулятора, определяющего управление уже в детерминированной постановке при предположении, что вектор состояния известен точно [23–25]. В данной статье для построения управления применяется фильтр Калмана и алгоритм последовательной оптимизации [26].

Измерению доступны длина выдвигания и напряжение на пьезоактюаторе. Уравнение наблюдения рассмотрим в виде

$$\mathbf{z} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \xi_z, \quad (2)$$

где $\mathbf{z} = [z_1 \ z_2]^T$, $\mathbf{H} = [1 \ 0 \ 1]^T$, $\xi_z = [\xi_{z1} \ \xi_{z2}]^T$ – случайные процессы типа белого шума с интенсивностью $\mathbf{B}_z = \text{diag}(B_{z1}, B_{z2})$.

Оптимальную оценку можно получить с помощью фильтра Калмана

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{l}}{dt} &= \hat{V} + R_{11} B_{z1}^{-1} (z_1 - \hat{l}) + R_{13} B_{z2}^{-1} (z_2 - \hat{U}_3), \\ \frac{d\hat{V}}{dt} &= \frac{NK_0 \hat{U}_3 + F_c - K_y \hat{l} - K_d \hat{V}}{m_\Sigma} + R_{21} B_{z1}^{-1} (z_1 - \hat{l}) + R_{23} B_{z2}^{-1} (z_2 - \hat{U}_3), \\ \frac{d\hat{U}_3}{dt} &= \frac{e_3}{C_0 R_{\text{вт}} K_d} - \frac{\hat{U}_3}{C_0 R_{\text{вт}} K_d} - \frac{K_{\text{п}} \hat{V}}{C_0 K_d} + R_{31} B_{z1}^{-1} (z_1 - \hat{l}) + R_{33} B_{z2}^{-1} (z_2 - \hat{U}_3). \end{aligned}$$

$$\dot{\mathbf{R}} = \mathbf{A}\mathbf{R} + \mathbf{R}\mathbf{A}^T - \mathbf{R}\mathbf{H}^T \mathbf{B}_z^{-1} \mathbf{H}\mathbf{R} + \mathbf{B}_x, \quad \mathbf{R}(t_0) = \mathbf{R}_0,$$

где

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{K_y}{m_\Sigma} & -\frac{K_d}{m_\Sigma} & \frac{NK_0}{m_\Sigma} \\ 0 & -\frac{K_\Pi}{C_0 K_d} & -\frac{1}{C_0 R_{\text{вт}} K_d} \end{bmatrix}, \quad R_{nn}(t_0) = 9\sigma_{xn}^2,$$

остальные элементы матрицы начальных ковариаций ошибок оценивания принимались равными нулю.

Постановка задачи управления

Для решения задачи управления применяется алгоритм оптимального управления по иерархии целевых критериев [26]. Помимо выполнения терминальных условий необходимо уменьшить энергетические затраты. Для случая управления пьезоактюатором – это мощность, выделяемая на пьезоактюаторе в процессе управления.

Управление вычисляется в виде $u = u_1 + u_2$, где u_1 и u_2 минимизируют критерии качества J_1 и J_2 соответственно

$$J_1 = \mathbf{V}_{f1}(\mathbf{X}, t_f),$$

$$J_2 = \mathbf{V}_{f2}(\mathbf{X}, t_f) + \int_{t_0}^{t_f} [f_0(\mathbf{X}, t) + 0,5(u^2 + u_0^2)^2 k_2^{-2}] dt,$$

где $V_{f1} = 0,5\beta_1[V(t_f) - V_f]^2$, $V_{f2} = 0,5\Delta\mathbf{X}_f^T \boldsymbol{\rho}_k \Delta\mathbf{X}_f$, $f_0 = 0,5\beta_2[l(t) - l_f]^2 + 0,5\beta_3 P_3(t)$; $\boldsymbol{\rho}_k = \text{diag}(\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4)$, $\beta_1, \beta_2, \beta_3, k_2$ – заданные коэффициенты; $\Delta\mathbf{X}_f = \mathbf{X}(t_f) - \mathbf{X}_f$, $\mathbf{X}_f = (l_f V_f U_{3f})^T$ – заданное конечное значение вектора \mathbf{X} в (1), $P_3 = U_\Pi \cdot I = (e_s - U_s)^2 / R_{\text{вт}}$ – электрическая мощность; U_Π – полное приложенное напряжение; I – ток. Подробно решение задачи управления в детерминированной постановке рассмотрено в работе [22].

Для оценки влияния возмущений на систему необходимо определить величины внешних возмущений и шумов измерений. Помимо внешних возмущений может наблюдаться изменение начального и конечного состояния, вызванное воздействиями на конструкцию при доставке рефлектора на орбиту.

Примем, что отфильтрованный шум измерений не превосходит ошибок измерительных датчиков. Внешние возмущения (влияние нагрузки, температуры окружающей среды, солнечное давление, радиация и т. п.) оказывают воздействие на весь вектор переменных состояния. Как правило, внешние возмущения случайны, некоррелированы и распределены равномерно в заданном диапазоне. В космическом пространстве внешнее влияние, оказываемое на рефлектор, является достаточно длительным и медленно нарастающим, поэтому на рассматриваемом интервале времени (не более 10 с) его можно считать квазистационарным. Возмущения примем равными ± 1 % от максимальных значений соответствующих переменных. В общем случае величины возмущений от нештатных ситуаций предугадать затруднительно.

Пьезоактюатор выдвигается из начального положения при значении $l_0 = 0$ мм и фиксируется при достижении заданной длины $l_f = 5$ мм. Актюатор в начальном положении находится в состоянии покоя, соответственно линейная скорость $V_0 = 0$ м/с, напряжение $U_{30} = 0$ В. Конечное значение линейной скорости $V_f = 0$ м/с. Пьезоактюатор преобразует электрическое напряжение в механическое перемещение [19]. Когда к нему приложено электрическое напряжение, он деформируется, при снятии напряжения он приходит в исходное состояние. Примем конечное значение напряжения, исходя из ограничений, принятых на орбите $U_{3f} = 12$ В. Время выдвигания $t_f = 4$ с.

Моделирование

Для моделирования был выбран тонкопленочный пьезоэлектрический микроактюатор типа АПМ со следующими техническими характеристиками [19]: $K_0 = 3,425 \cdot 10^{-8}$ Кл/м, $m_\Sigma = 0,125$ кг, $F_c = 0$ Н, $K_y = 7,611$ Н/м, $K_d = 1,9$, $C_0 = 11,7 \cdot 10^{-5}$ Ф, $R_{вт} = 1,025 \cdot 10^2$ Ом. Для осуществления выдвигания на заданную длину $l_f = 5$ мм при ограничении на управление $e_{3, \max} = 12$ В необходимо $N = 305$ слоёв.

Численное моделирование перевода системы из начального состояния $x(0) = (0 \ 0 \ 0)^T$ в конечное $x(t_f) = (l_f \ 0 \ U_{3f})^T$ при минимизации энергии P_3 с отсутствием перерегулирования по длине выдвигания l за время $t_f = 4$ с проводилось методом Эйлера с шагом $\Delta t = 0,00001$ с. Расчеты показали, что при значениях параметров критерия J_2 : $\rho_1 = 10^4$, $\rho_2 = 10^8$, $\rho_3 = 0$, $\rho_4 = 0$, $\beta_1 = 0$, $\beta_2 = 0$, $\beta_3 = 0$, $k_2 = 1$ алгоритм успешно решает поставленную задачу. Затраченная мощность на перевод системы из начального в конечное положение $P_3 = 0,0075$ Вт, при максимальном токе $I = 0,0069$ А.

На рис. 3 представлены результаты моделирования, графики зависимостей $l(t)$ и $V(t)$ соответственно. Видно, что удалось решить поставленную задачу, т. е. перевести пьезоактюатор из начального состояния в конечное, переместив его активную часть на 5 мм при $\mathbf{B}_x = \text{diag}(0,00075, 0, 0,12, 0)$.

На рис. 4 представлены ток и мощность при работе пьезоактюатора. Видно, что за время моделирования было затрачено около 8 мВт.

Принятые возмущения и шумы измерений не оказывают существенного влияния на переходные характеристики системы. Алгоритм успешно справляется с возмущениями и отклонениями начальных значений в диапазоне $\pm 10\%$.

На рис. 5 представлены диагональные элементы матрицы ковариации при $R_{11}(0) = 0,01$; $R_{22}(0) = 0,001$; $R_{33}(0) = 0,1$; $\mathbf{B}z = \text{diag}(0,0001, 0,18)$. Видно, что с течением времени они приходят к установившимся значениям. Также было проведено моделирование при разных уровнях шума. Фильтр Калмана обрабатывает их успешно.

Поскольку шумы измерений не оказывают сильного воздействия на управление, то для экономии энергии было предложено периодически отключать работу датчиков и текущее положение определять путем математического моделирования. Это позволило успешно решать задачу управления при меньших энергетических затратах. В моменты отключения датчиков не затрачивается энергия на их функционирование и передачу данных.

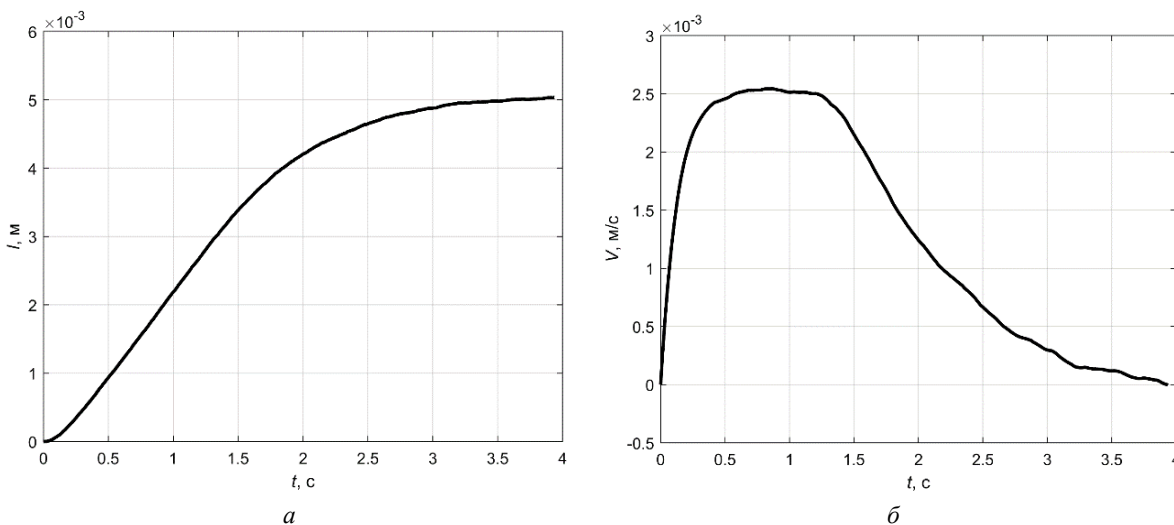


Рис. 3. Графики: а – $l(t)$; б – $V(t)$

Fig. 3. Graphics: а – $l(t)$; б – $V(t)$

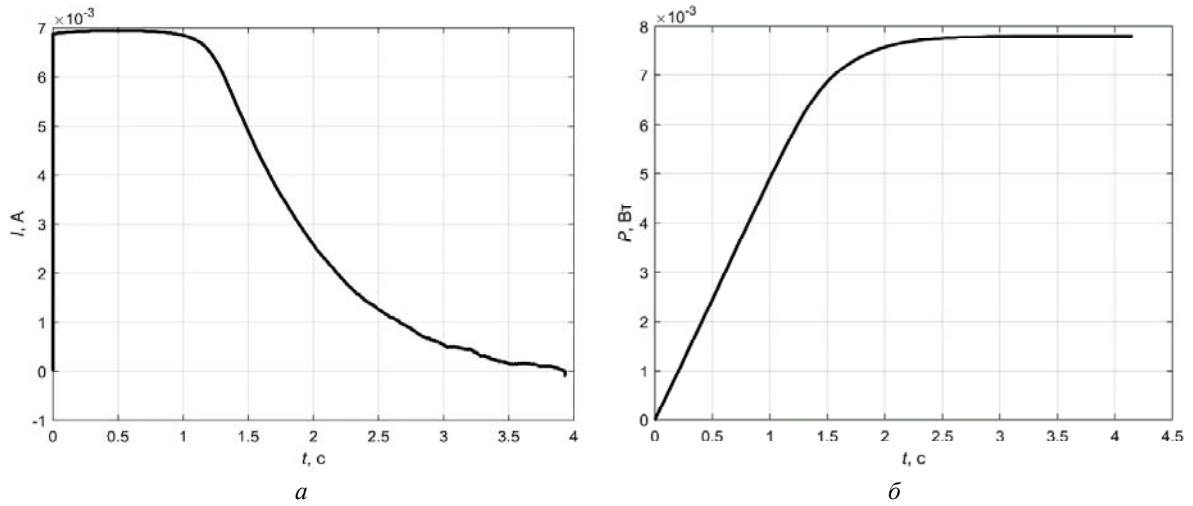


Рис. 4. Графики: $a - I(t)$; $б - P(t)$

Fig. 4. Graphics: $a - I(t)$; $b - P(t)$

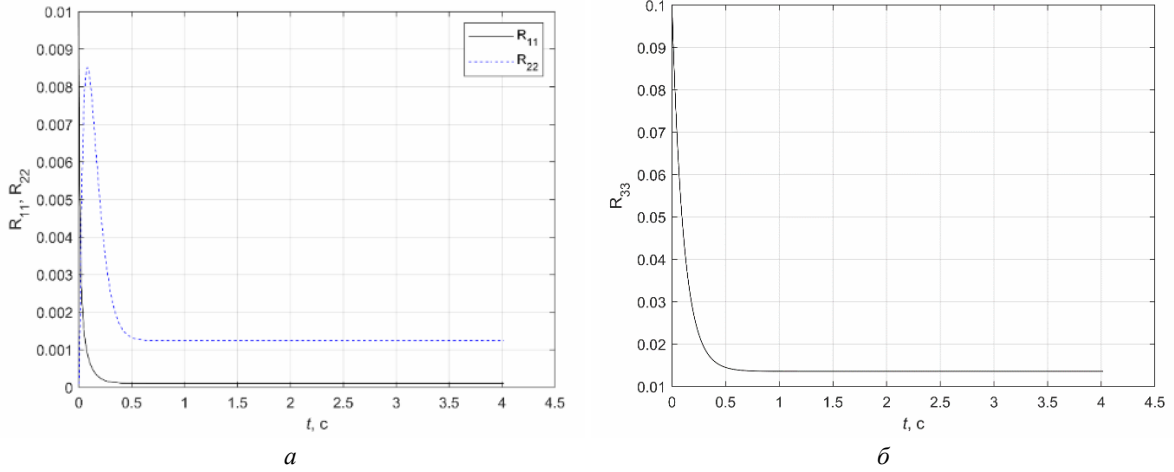


Рис. 5. Графики: $a - R_{11}(t), R_{22}(t)$; $б - R_{33}(t)$

Fig. 5. Graphics: $a - R_{11}(t), R_{22}(t)$; $b - R_{33}(t)$

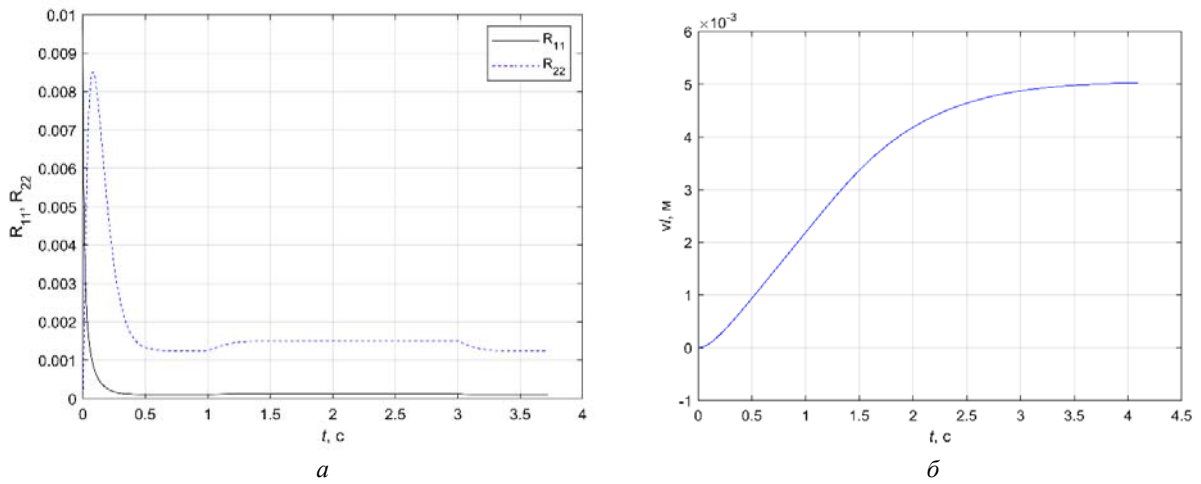


Рис. 6. Графики: $a - R_{11}(t), R_{22}(t)$; $б - \hat{I}(t)$

Fig. 6. Graphics: $a - R_{11}(t), R_{22}(t)$; $b - \hat{I}(t)$

На рис. 6, а представлены графики $R_{11}(t)$ и $R_{22}(t)$ при отключении измерений с 1 до 3 секунды. Рис. 6, б показывает оцененную величину $\hat{l}(t)$. Элементы ковариационной матрицы приходят к установившемуся значению при наличии наблюдений. На интервале отключения измерений при $B_{z1}^{-1} = 0$ и $B_{z2}^{-1} = 0$ величины оценок и $R_{11}(t)$, $R_{22}(t)$ вычисляются с помощью фильтра в режиме прогноза.

При включении измерений на 3 с фильтр Калмана приводит оценку к оптимальному значению к 3,2 с. Математическое ожидание шума равняется нулю, поэтому при отключении измерений каких-либо существенных отличий в оценке измеряемых величин не наблюдается. Критическим является наличие внешних возмущений, так как за время отключения датчиков возможен уход математической модели от состояния реальной системы. Ввиду того, что процесс управления для рассматриваемой задачи занимает $t_f = 4$ с, важно включать измерения при приближении к конечным значениям, что позволит оценить состояние системы и при необходимости скорректировать управление. При этом достаточно проводить измерение длины выдвижения пьезоактюатора l , включение датчика измерения напряжения $U_{30} = 0$ незначительно повышает точность решения задачи.

Ошибки оценивания Δl и ΔU_3 при работе фильтра Калмана с течением времени стремятся к нулю. При наличии внешних возмущений данные ошибки имеют математическое ожидание равное нулю и дисперсию, не превышающую дисперсию возмущений.

Заключение

Для решения задачи управления также применялись алгоритмы на основе принципа максимума Понтрягина с использованием численных методов Ньютона, Крылова – Черноусько, алгоритма коррекции параметров структуры управления [12; 23; 27]. Алгоритм последовательной оптимизации позволил на 12 % снизить энергетические затраты на управление. Применение ПИД-структуры управления увеличивало затраты электроэнергии на 27 % по сравнению с предлагаемым алгоритмом [28] при наличии перерегулирования.

Как видно, численное моделирование подтвердило возможность решения задачи оптимального управления стохастической моделью пьезоактюатора для настройки радиоотражающего сетеполотна КТР по неполным данным с использованием принципа разделения. Интервальное выключение измерений позволяет снизить энергозатраты на питание датчиков и обработку измерений. При этом более длительное включение датчиков в конечный момент времени приводит к более точному выполнению терминальных условий. Поэтому дополнительно возникает задача оптимизации интервалов наблюдения с целью минимизации энергетических затрат при высокоточном выполнении терминальных условий [29].

Представленные исследования доложены на XXII международной научной конференции «Системный анализ, управление и навигация» [30].

Библиографические ссылки

1. Вовасов В. Е., Бетанов В. В., Герко С. А. Методика калибровки навигационного приемника ГЛОНАСС при использовании двухчастотных комбинаций измерений псевдопоследовательностей // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21, № 5. С. 137–144.
2. Фёдоров А. В., Хоанг Ву. Т. Программный комплекс для проектирования алгоритмов управления движением сервисного модуля на геостационарной орбите // Вестник Московского авиационного ин-та. 2020. Т. 27, № 4. С. 192–205.
3. Kazantsev Z. A. Deployment concept mechanical system of a radar antenna for space purposes // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 858–867.

4. Xuelin D., Jingli D., Hong B., Guohui S., Deployment analysis of deployable antennas considering cable net and truss flexibility // *Aerospace Science and Technology*. 2018. Vol. 82–83. P. 557–565.
5. Wang H. Multifrequency Spaceborne Deployable Radiometer Antenna Designs // *IEEE Aerospace and electronic systems magazine*. 2020. Vol. 35, No. 5. P. 28–35.
6. Deployable reflector system for satellite applications, in: 2005 SBMO / M. Terada, N. Bludworth, J. Moore et al. // *IEEE MTT-S International Conference on Microwave and Optoelectronics*. Brazil. 2005. P. 647–656.
7. Li T. Deployment analysis and control of deployable space antenna // *Aerospace Science and Technology*. 2012. Vol. 18, No. 1. P. 42–47.
8. Резник С. В., Чубанов Д. Е. Моделирование динамики раскрытия крупногабаритного трансформируемого рефлектора космической антенны из композиционного материала // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2018. Т. 19, № 4. С. 411–425.
9. Метод расчёта напряженно-деформированного состояния вантовооболочечных конструкций космических антенн рефлекторов / А. В. Бельков, С. В. Белов, А. П. Жуков и др. // *Вестник Томского гос. ун-та. Математика и механика*. 2019. № 62. С. 5–18.
10. Разработка расчетно-экспериментального метода модального анализа / В. А. Бернс, В. Е. Левин, Д. А. Красноруцкий и др. // *Космические аппараты и технологии*. 2018. Т. 2, № 3(25). С. 125–133.
11. Кабанов С. А., Зимин Б. А., Митин Ф. В. Разработка и анализ математических моделей раскрытия подвижных частей трансформируемых космических конструкций. Ч. I // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2020. Т. 20, № 1. С. 51–64.
12. Кабанов С. А., Зимин Б. А., Митин Ф. В. Разработка и анализ математических моделей раскрытия подвижных частей трансформируемых космических конструкций. Ч. II // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2020. Т. 21, № 2. С. 117–128.
13. Kabanov S. A., Mitin F. V. Optimization of the stages of deploying a large-sized space-based reflector // *Acta Astronautica, Special Issue on 6th SFS 2019*. 2020. Vol. 176. P. 717–724.
14. Development for petal-type deployable solid-surface reflector by uniaxial rotation mechanism / H. Huang, Q. Cheng, L. Zheng, Y. Yang // *Acta Astronautica*. 2021. № 178. P. 511–521.
15. Тайгин В. Б., Лопатин А. В. Метод обеспечения высокой точности формы рефлекторов зеркальных антенн космических аппаратов // *Космические аппараты и технологии*. 2019. Т. 3, № 4 (30). С. 200–208.
16. Kalabegashvili G. I., Bikeev E. V., Mathylenko M. G. Determination of the minimal reflecting surface points number required for assessment of large-size transformable antenna pattern deviation // *Сибирский журнал науки и технологий*. 2018. Т. 19, № 1. С. 66–75.
17. Ишков В. Н. Воздействие солнечных активных явлений на околоземное космическое пространство и возможность их прогноза // *Сложные системы*. 2012. № 4 (5). С. 21–41.
18. Влияние солнечной активности на магнитосферу Земли / Б. Б. Михалеев, С. Б. Дертеев, И. Ю. Лагаев, Т. Т. Осмонов // *Актуальные проблемы современной физики и математики*. 2017. С. 92–97.
19. Панич А. Е. Пьезокерамические актюаторы. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2008. 159 с.
20. ПИН-50-У-4/20-ДХ – преобразователь измерительный постоянного и переменного напряжения [Электронный ресурс]. URL: <https://www.electronpribor.ru/catalog/850/pin-50-u-420-dh.htm> (дата обращения: 10.10.2021).
21. 3D-сканеры RangeVision [Электронный ресурс]. URL: <https://printer-plotter.ru/3d-oborudovanie/3d-scanners/rangevision/?yclid=5975775935832053836> (дата обращения: 10.10.2021).

22. Управление пьезоактюатором для настройки отражающей поверхности рефлектора космического базирования / С. А. Кабанов, Ф. В. Митин, А. И. Кривушов, Е. А. Улыбушев // Изв. вузов. Авиационная техника. 2018. № 4. С. 111–116.
23. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. М. : Наука, 1987. 712 с.
24. Кабанов С. А. Оптимизация динамики систем при действии возмущений. М. : Физматлит, 2008. 200 с.
25. Кабанов Д. С. Оптимальное управление ядерным реактором с учетом случайных возмущений // Приборостроение. 2009. № 5. С. 27–30.
26. Кабанов С. А. Управление системами на прогнозирующих моделях. СПб. : Изд-во СПбГУ, 1997. 200 с.
27. Кабанов С. А., Митин Ф. В. Оптимизация процессов раскрытия и создания формы трансформируемого рефлектора космического базирования // Изв. РАН. ТиСУ. 2021. № 2. С. 106–125.
28. Кабанов С. А., Митин Ф. В. Оптимальное управление пьезоактюатором для настройки радиоотражающего сетеполотна космического рефлектора // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 3. С. 183–191.
29. Мальшев В. В., Красильщиков М. Н., Карлов В. И. Оптимизация наблюдения и управления летательных аппаратов. М. : Машиностроение, 1989. 312 с.
30. Кабанов С. А., Митин Ф. В., Шевчик А. А. Решение задачи фильтрации при оптимальной настройке радиоотражающего сетеполотна трансформируемого рефлектора // Системный анализ, управление и навигация : тез. докладов. М. : Изд-во МАИ, 2021. С. 170–171.

References

1. Vovasov V. E., Betanov V. V., Gerko S. A. [Calibration technique of navigation glonass receiver using combinations of dual-frequency pseudorange measurements]. *Aerospace MAI Journal*. 2014, Vol. 21, No. 5, P. 137–144 (In Russ.).
2. Fyodorov A. V., Hoang Vu. T. [Software package for motion control algorithms design of service module in geostationary orbit]. *Aerospace MAI Journal*. 2020, Vol. 27, No. 4, P. 192–205 (In Russ.).
3. Kazantsev Z. A. [Deployment concept mechanical system of a radar antenna for space purposes]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2017, Vol. 18, No. 4. P. 858–867 (In Russ.).
4. Xuelin D., Jingli D., Hong B., Guohui S. Deployment analysis of deployable antennas considering cable net and truss flexibility. *Aerospace Science and Technology*. 2018, Vol. 82–83, P. 557–565.
5. Wang H. Multifrequency Spaceborne Deployable Radiometer Antenna Designs. *IEEE Aerospace and electronic systems magazine*. 2020. Vol. 35, No. 5, P. 28–35.
6. Deployable reflector system for satellite applications, in: 2005 SBMO / M. Terada, N. Bludworth, J. Moore et al. *IEEE MTT-S International Conference on Microwave and Optoelectronics*. Brazil. 2005. P. 647–656.
7. Li T. Deployment analysis and control of deployable space antenna. *Aerospace Science and Technology*. 2012, Vol. 18, No. 1, P. 42–47.
8. Reznik S. V., Chubanov D. E. [Modeling the dynamics of the deployment of a large-sized transformable reflector of a space antenna made of composite material]. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2018, Vol. 19, No. 4, P. 411–425 (In Russ.).
9. Bel'kov A. V., Belov S. V., Zhukov A. P., Pavlov M. S., Ponomarev S. V., Kuznecov S. A. [Method for calculation of the stress-strain state for cable-membrane space reflector structures]. *Vestn. Tomsk. Gos. Univ. Mat. Mekh*. 2019, No. 62, P. 5–18 (In Russ.).

10. Berns V. A., Levin V. E., Krasnorutsky D. A., Marinin D. A., Zhukov E. P., Malenkova V. V., Lakiza P. A. Development of a calculation and experimental method for modal analysis of large transformable space structures. *Spacecrafts & Technologies*. 2018, Vol. 2, No. 3, P. 125–133.
11. Kabanov S. A., Zimin B. A., Mitin F. V. [Development and Research of Mathematical Models of Deployment of Mobile Parts of Transformable Space Construction. Part I]. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2020, Vol. 21, No. 1, P. 51–64 (In Russ.).
12. Kabanov S. A., Zimin B. A., Mitin F. V. [Development and Research of Mathematical Models of Deployment of Mobile Parts of Transformable Space Construction. P. II]. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2020, Vol. 21, No. 2, P. 117–128 (In Russ.).
13. Kabanov S. A., Mitin F. V. Optimization of the stages of deploying a large-sized space-based reflector. *Acta Astronautica, Special Issue on 6th SFS 2019*, 2020, No. 176, P. 717–724.
14. Huang H., Cheng Q., Zheng L., Yang Y. Development for petal-type deployable solid-surface reflector by uniaxial rotation mechanism. *Acta Astronautica*. 2021, No. 178, P. 511–521.
15. Taygin V. B., Lopatin A. V. [Method of achievement the high accuracy of the shape of reflectors of mirror antennas of spacecraft]. *Spacecrafts & Technologies*. 2019, Vol. 3, No. 4, P. 200–208 (In Russ.).
16. Kalabegashvili G. I., Bikeev E. V., Mathylenko M. G. [Determination of the minimal reflecting surface points number required for assessment of large-size transformable antenna pattern deviation]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 1, P. 66–75 (In Russ.).
17. Ishkov V. N. [Solar geoeffective phenomena: Action on the near-earth outer space and the possibility of the forecast]. *Slozhnye sistemy*. 2012, No. 4 (5), P. 21–41 (In Russ.).
18. Mihalyaev B. B., Derteev S. B., Lagaev I. Y., Osmonov T. T. [Vliyanie solnechnoj aktivnosti na magnitosferu Zemli]. *Aktual'nye problemy sovremennoj fiziki i matematiki. trudy*. 2017, P. 92–97 (In Russ.).
19. Panich A. E. *P'ezokeramicheskie aktyuatory* [Piezoceramic actuators]. Rostov-na-Donu, YUFU Publ., 2008, 159 p.
20. PIN-50-U-4/20-DKh – *preobrazovatel' izmeritel'nyy postoyannogo i peremennogo napryazheniya* [PIN-50-U-4/20-DX – DC and AC voltage Measuring Converter]. Available at: <https://www.electronpribor.ru/catalog/850/pin-50-u-420-dh.htm> (accessed: 10.10.2021).
21. *3D skanery RangeVision* [3D Scanners Range Vision]. Available at: <https://printer-plotter.ru/3d-oborudovanie/3d-scanners/rangevision/?yclid=5975775935832053836> (accessed: 10.10.2021).
22. Kabanov S. A., Mitin F. V., Krivushov A. I., Ulybushev E. A. Control of a piezo actuator to adjust refractive surface of the space-based reflector. *Russian Aeronautics (Iz. VUZ)*. 2018, Vol. 61, No. 4, P. 629–635.
23. *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravlenija. Pod red. A. A. Krasovskogo* [Handbook on the theory of automatic control. Ed. by A. A. Krasovskij]. Moscow, Nauka Publ., 1987, 712 p.
24. Kabanov S. A. *Optimizatsiya dinamiki sistem pri deystvii vozmushcheniy* [Optimization of the dynamics of systems under the action of disturbances]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008, 200 p.
25. Kabanov D. S. [Optimal control of a nuclear reactor taking into account random disturbances]. *Journal of instrument engineering*. 2009, No. 5, P. 27–30 (In Russ.).
26. Kabanov S. A. *Upravlenie sistemami na prognoziruyushchih modelyah* [Control systems based on predictive model]. SPb., SPbGU Publ., 1997, 200 p.
27. Kabanov S. A., Mitin F. V. Optimization of the Processes of Deployment and Shape Generation for a Transformable Space-Based Reflector. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2021, Vol. 60, No. 2, P. 283–302.
28. Kabanov S. A., Mitin F. V. [Optimal control for piezo actuator for setting the shape of the radio-reflecting network]. *Journal of Instrument Engineering*. 2021, Vol. 64, No. 3, P. 183–191 (In Russ.).

29. Malyshev V. V., Krasil'shchikov M. N., Karlov V. I. *Optimizaciya nablyudeniya i upravleniya letatel'nyh apparatov* [Optimization of surveillance and control of aircraft]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, 312 p.

30. Kabanov S. A., Mitin F. V., Shevchik A. A. [Solution of the filtration problem with the optimal adjustment of the radio reflecting net of a transformable reflector]. *Sistemnyy analiz, upravlenie i navigaciya*. Moscow, Izd-vo MAI Publ., 2021, P. 170–171.

© Кабанов С. А., Митин Ф. В., 2021

Кабанов Сергей Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры систем управления и компьютерных технологий; БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова». E-mail: kaba-sa@mail.ru.

Митин Фёдор Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры систем управления и компьютерных технологий; БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова». E-mail: fedor28@list.ru.

Kabanov Sergey Aleksandrovich – Dr. Sc., Professor; Department of Control Systems and Computer Technologies, Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D. F. Ustinov”. E-mail: kaba-sa@mail.ru.

Mitin Fedor Vasilyevich – Cand. Sc. Associate Professor, Department of Control Systems and Computer Technologies, Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D. F. Ustinov”. E-mail: fedor28@list.ru.

УДК 658.5:629.78

Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-589-599

Для цитирования: Картамышев А. С., Черныш Б. А., Мурыгин А. В. Формирование многомерных данных в информационной финансово-экономической системе на предприятии госкорпорации «Роскосмос» // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 4. С. 589–599. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-589-599.

For citation: Kartamyshev A. S., Chernysh B. A., Murygin A. V. Method for forming multi-dimensional data in the information financial and economic system at the enterprise of state space corporation “Roscosmos”. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 4, P. 589–599. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-589-599.

Формирование многомерных данных в информационной финансово-экономической системе на предприятии госкорпорации «Роскосмос»

А. С. Картамышев^{1*}, Б. А. Черныш², А. В. Мурыгин²

¹АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, 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

*E-mail: kartam@iss-reshetnev.ru

Построение детализированного учета, позволяющего генерировать сложную, аналитическую отчетность, является непреложным требованием современной финансовой системы. Для предприятий госкорпорации «Роскосмос» с позаказным и мелкосерийным производством, работающих в условиях 275 ФЗ, отличающихся большим количеством НИОКР и высокой степенью неопределенности в процессе создания продукции, эта задача является системообразующей. Отчетность должна содержать согласованные непротиворечивые данные на любом участке управленческого и бухгалтерского учета на любой момент времени. Наряду с этим, система должна обеспечивать гибкость, надежность и быстродействие, присущие транзакционным базам данных. Для построения информационной поддержки, удовлетворяющей указанным условиям, требуется либо разделять OLTP и OLAP схемы данных, либо применять специализированные решения, основанные на использовании структур и методик, оптимизированных для выполнения OLAP операций в традиционных РСУБД. В данной статье рассматривается подход к формированию многомерных данных в автоматизированной системе управления финансово-экономическими задачами как эффективная альтернатива сложным и дорогостоящим BI-решениям. В отличие от многих коммерческих решений, описываемая система не хранит избыточные данные (например, регистры оперативного учета в платформе «1С: Предприятие»), необходимые для построения аналитического учета. Лежащие в ее основе структуры данных и методы их обработки позволяют осуществлять все виды учета и иметь мощные инструменты построения аналитической отчетности. В статье предлагаются алгоритмы работы системы на примере построения простых OLAP кубов, применяемых в реальных задачах автоматизации финансово-экономической деятельности в АО «ИСС» для одной из подсистем «Покупки». Проведена формализация этих задач, рассмотрен математический аппарат построения многомерных моделей данных на основе информации из фиксированного набора нормализованных таблиц реляционной БД. Представлены примеры SQL запросов и выходных данных. Обобщены преимущества применения системы в оперативном, управленческом и бухгалтерском учете на предприятии, повышающие ее эксплуатационную эффективность.

Ключевые слова: база данных, OLTP, OLAP, аналитическая обработка, многомерное представление, реляционная схема, нормализация, нормальная форма, система автоматизации.

Method for forming multi-dimensional data in the information financial and economic system at the enterprise of state space corporation “Roscosmos”

A. S. Kartamyshev^{1*}, B. A. Chernysh², A. V. Murygin²

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, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: kartam@iss-reshetnev.ru

The construction of detailed accounting that allows to generate complex analytical reporting is an indispensable requirement of a modern financial system. For enterprises of the State Space Corporation “Roskosmos” with custom-made and small-scale production, operating in the conditions of Federal Law No. 275, characterized by a large amount of R&D and a high degree of uncertainty in the process of creating products, this task is a system-forming one. The reporting should contain consistent data in any area of management and accounting at any given time. Along with this, system must provide the flexibility, reliability and performance inherent in transactional databases. To build information support that satisfies the specified conditions, it is required either to separate OLTP and OLAP data schemas, or to apply specialized solutions based on the use of structures and techniques optimized for performing OLAP operations in traditional RDBMSs. This article discusses an approach to the formation of multidimensional data in an automated management system for economic tasks, as an effective alternative to complex and expensive BI solutions. Unlike many commercial systems, the ASU FEZ does not store redundant data (for example, operational accounting registers in the IC: Enterprise platform) required to build analytical accounting. The underlying data structures and methods of their processing allow for all types of accounting and have powerful tools for constructing analytical reporting. The article proposes algorithms for the operation of the system using the example of building simple OLAP cubes used in real tasks of automating financial and economic activities in ISS JSC for one of the Purchase subsystems. The formalization of these problems is carried out, the mathematical apparatus for constructing multidimensional data models based on information from a fixed set of normalized tables of a relational database is considered. Examples of SQL queries and outputs are provided. The advantages of using the system in operational, management and accounting at an enterprise, which increase its operational efficiency, are summarized.

Keywords: database, OLTP, OLAP, analytical processing, multidimensional representation, relational schema, normalization, normal form, automation system.

Введение

Одним из основных требований, предъявляемых к финансово-экономическим системам, является возможность оперативного получения актуальной аналитической информации, необходимой для принятия оперативных управленческих решений и генерации всеохватывающей детализированной отчетности. Особенно актуальной эта задача является для предприятий госкорпорации «Роскосмос», работающих в условиях гособоронзаказа и обязанных вести в своей хозяйственной деятельности раздельный учет затрат по различным проектам. Информационная поддержка бухгалтерского и управленческого учета построена на правилах хранения и обработки данных документов-первоисточников, регистрируемых в системах учета, их связях и процессах формирования новых информационных объектов учета. Данные на разных участках учета есть не что иное, как производные от первичных документов или множества первичной информации. В процессе передела и потребления данных на определенных участках учета ин-

формационные связи между различными производными от одного основания могут теряться. Информационные объекты начинают «жить своей жизнью» и порождать новые производные. При информационных разрывах теряется возможность дифференцирования текущей производной до первоисточника данных (основания) и анализа связанных с ним данных в рамках технологических и экономических процессов. Математическое решение подобных задач, приводящее к логически выстроенной цепочке операций и возможности автоматизации учета, является предметом исследований многих ученых и практиков, работающих над созданием систем информационной поддержки финансово-экономических задач в управлении предприятиями.

Анализ исследований

Ведущее место в решении данного класса задач занимают OLAP-технологии [1] (OLAP – online analytical processing, оперативная аналитическая обработка). Системы, реализующие OLAP, должны отвечать так называемым принципам FASMI [2]: *Fast* (быстрый отклик системы), *Analysis* (полнофункциональный анализ), *Shared* (многопользовательский доступ к данным), *Multidimensional* (многомерное концептуальное представление данных), *Information* (получение информации в нужном объеме там, где она необходима). Как видно, исходя из данных принципов, требования к системе построения отчетности, которую действительно можно назвать OLAP-системой, весьма жесткие. За секунды отчеты должны строиться по миллионам записей, столь же быстро раскрываться по интересующим пользователя аналитикам, фильтроваться и перегруппировываться [3].

Наиболее распространенным подходом в реализации OLAP-систем является разделение данных между двумя базами: транзакционной (OLTP – online transaction processing) и аналитической (OLAP). При этом OLTP-база оптимизируется под быстрое внесение данных, а OLAP – под быстрое построение сложной отчетности. Фактически OLAP-база обычно строится по специальной архитектуре и содержит предварительно просчитанные агрегатные данные, что и обеспечивает высокую скорость выполнения запросов. Платой за это становится необходимость синхронизировать OLTP и OLAP. Так как подобный процесс, как правило, периодичен, то между появлением данных в оперативной базе и аналитическими данными имеется запаздывание. Данный подход реализован практически во всех современных BI-системах (business intelligence – сбор и анализ бизнес-информации): Microsoft Analysis Services, Oracle OLAP, IBM Informix, Arbo Essbase и др.

Другим подходом в решении задач оперативной аналитической обработки данных является встраивание OLAP-инструментария непосредственно в OLTP-хранилище. Это достигается как использованием специальных элементов данных (например, регистры оперативного учета в платформе «1С: Предприятие» [4]), так и оптимальной (с точки зрения оптимизации выполнения OLAP-запросов) структуризацией схемы данных. Данный подход лег в основу разработанной на предприятии системы управления финансово-экономическими задачами (АСУ ФЭЗ) [5] как эффективная альтернатива сложным и дорогостоящим BI-системам.

Описание подхода

Структуры и алгоритмы, лежащие в основе АСУ ФЭЗ, позволяют эффективно сочетать гибкость и быстродействие транзакционной базы данных (БД), с одной стороны, и возможности построения сложной отчетности за приемлемое время – с другой. Далее в статье приведен обзор технической реализации хранилища данных на примере подсистемы «Покупки», отвечающей за учет товаров, работ и услуг, которые предприятие приобретает для создания собственных объектов продажи.

Ядро модуля «Покупки» составляет 5 таблиц, построенных в соответствии с правилами нормальных форм [6; 7], и представлено на рис. 1:

- POK_PRIH – документы прихода товарно-материальных ценностей, работ, услуг;
- POK_OSN – документы-основания для учета НДС (входящие счета-фактуры);
- PO_SOGL – документы-основания для платежа (акцепт-согласие ответственных сотрудников на оплату товарно-материальных ценностей, работ, услуг);
- POK_OPL – платежные документы;
- POK_SW – таблица связей, содержит ссылки в виде внешних ключей на первичные ключи записей из перечисленных выше таблиц (ID_PR – на таблицу POK_PRIH, ID_OSN – на таблицу POK_OSN, ID_TS – на таблицу POK_SOGL, ID_OPL – на таблицу POK_OPL).

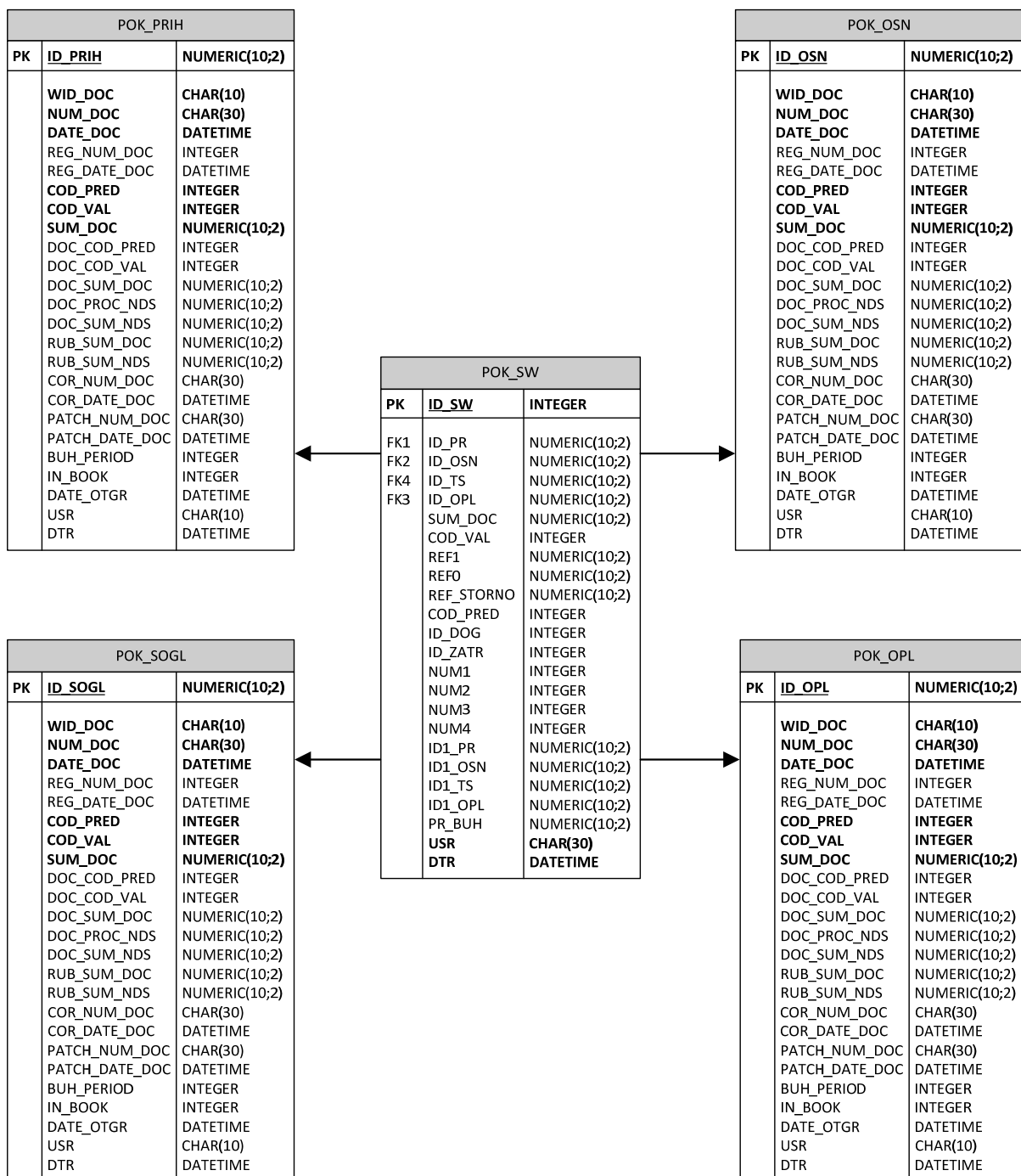


Рис. 1. Схема данных модуля «Покупки»

Fig. 1. Module "Purchase" data schema

Предлагаемый подход к структурированию данных позволяет выполнять широкий спектр задач аналитической обработки без предварительной подготовки данных или использования промежуточных представлений. Для наглядного описания проведем их формализацию [8], затем рассмотрим несколько реальных примеров таких задач, решаемых в рамках подсистемы «Покупки». Итак, пусть задана схема базы данных $\mathfrak{R} = \{R_1, R_2, \dots, R_k\}$, полученная в результате нормализации отношений [6; 7]. Отношения R_i определены на множестве атрибутов $U = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$. Пусть $[R_i]$ – схема отношения, множество атрибутов, на которых определено отношение R_i . Предположим, что схема \mathfrak{R} является редуцированной [7], т. е. не существует двух отношений таких, что $[R_i] \subseteq [R_j]$, при $i \neq j$. Кортеж $t[X]$ – совокупность значений атрибутов $A_j \in X \subseteq [R_i]$, заданных в кортеже $t \in R_i$. Неопределенное значение $NULL$ атрибута A_j в кортеже t : $t[A_j] = NULL$ не равно любому другому значению, в том числе другому неопределенному значению.

Многомерное представление будем задавать в виде совокупности размерностей $\{D_1, D_2, \dots, D_d\}$, где D_l – множество расширенных имен атрибутов: $R_i A_j, A_\varphi \in [R_i]$; M – множество мер, также заданных в виде расширенных имен атрибутов. Значения D_l являются значениями координат гиперкуба, значения M будут располагаться в рабочей области гиперкуба. Для каждой размерности задается ограничение в виде логической формулы F_l .

Пример 1. Необходимо найти данные оплат (любых перечислений денежных средств) предприятию с кодом 12345 по проекту 111 и договорам поставки 222, 223, где были уплачены денежные средства с 01.01.2021 по 28.02.2021 по статьям бюджетного планирования (СБП) 333, 334 и получены товар/работы/услуги в период с 01.01.2021 по 31.01.2021.

С целью упрощения постановки и реализации, в этом и последующих примерах не используемые в выборке атрибуты опускаются. Таким образом, в рамках описанной схемы БД имеем следующее подмножество атрибутов: A_1 – идентификатор связи, A_2 – идентификатор записи о поступлении товара/работ/услуг, A_3 – идентификатор записи платежа, A_4 – код предприятия, A_5 – идентификатор проекта, A_6 – идентификатор договора поставки, A_7 – СБП, A_8 – дата приходной накладной, A_9 – дата платежа, A_{10} – сумма платежа. Здесь существуют следующие функциональные зависимости: $DEP = \{A_1 \rightarrow A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 A_7, A_2 \rightarrow A_8, A_3 \rightarrow A_9 A_{10}\}$. На основании данного подмножества получаем упрощенную схему отношений: Связи документов = $R_1(A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7)$, Поступления товаров/работ/услуг = $R_2(A_2, A_8)$, Платежные документы = $R_3(A_3, A_9, A_{10})$, где жирным выделены ключевые атрибуты отношений. Одно из возможных представлений гиперкуба приведено в табл. 1.

Таблица 1

Данные оплат

Код предприятия	12345			
Проект	111			
Договор поставки	222		223	
СБП	333	334	333	334
Дата	<i>Сумма</i>	<i>Сумма</i>	<i>Сумма</i>	<i>Сумма</i>
21.01.2021	75000	250000	357500	65500
26.01.2021	31000	310000	785000	96000
28.01.2021	70000	870080	6500	55000

Атрибуты измерений представлены жирным шрифтом, атрибуты фактов – курсивом, значения атрибутов – обычным шрифтом. Схема гиперкуба в табл. 1 может быть представлена в следующем виде:

$$\{R_3.A_9\} \times \{R_1.A_4\{R_1.A_5\{R_1.A_6\{R_1.A_7(R_3.A_{10})\}\}\}\},$$

где $D_1 = \{R_3.A_9\}$ и $D_2 = \{R_1.A_4, R_1.A_5, R_1.A_6, R_1.A_7\}$ – измерения, $M = \{R_3.A_{10}\}$ – факты. Логическое ограничение: $F = (R_1.A_2 \neq NULL \wedge R_1.A_3 \neq NULL \wedge R_1.A_4 = 12345 \wedge R_1.A_5 = 111 \wedge (R_1.A_6 = 222 \vee R_1.A_6 = 223) \wedge (R_1.A_7 = 333 \vee R_1.A_7 = 334) \wedge R_3.A_{11} \geq 01.01.2021 \wedge R_3.A_{11} \leq 28.02.2021 \wedge R_2.A_8 \geq 01.01.2020 \wedge R_2.A_8 \leq 31.01.2020)$.

Соответствующий SQL запрос приведен на рис. 2.

```
SELECT pok.cod_pred AS pok_cod_pred, -- предприятие
       pok.id_zatr AS pok_id_zatr, -- проект
       pok.id_dog AS pok_id_dog, -- договор
       pok.num4 AS pok_num4, -- статья бюджетного плана
       opl.date_doc AS opl_date_doc, -- дата платежного документа
       opl.sum_doc AS opl_sum_doc -- сумма платежного документа
FROM pok_sw pok
LEFT JOIN pok_opl opl ON pok.id_opl = opl.id_opl
LEFT JOIN pok_prih pr ON pok.id_pr = pr.id_prih
WHERE pok.id_opl IS NOT NULL -- были уплачены деньги
AND pok.id_pr IS NOT NULL -- были получены товар/работы/услуги
AND pok.cod_pred = 12345 -- данные по предприятию с кодом 12345
AND pok.id_zatr = 111 -- по проекту с кодом 111
AND pok.id_dog = 222 -- по договору с кодом 222
AND pok.num4 = 333 -- платеж был по СБП с кодом 333
AND opl.date_doc BETWEEN TO_DATE('01.01.2021', 'dd.mm.yyyy') AND
TO_DATE('28.02.2021', 'dd.mm.yyyy') -- оплата в период
AND pr.date_doc BETWEEN TO_DATE('01.01.2020', 'dd.mm.yyyy') AND
TO_DATE('31.01.2020', 'dd.mm.yyyy') -- приход был в период
```

Рис. 2. SQL запрос данных оплат предприятию с указанной аналитикой

Fig. 2. SQL query of payments data to the enterprise with the specified analytics

С использованием описанной схемы БД в запрос аналогичным образом включаются любые другие измерения и факты (данные и аналитика оплат, счетов-фактур, акцептов, приходов и т. д.), позволяющие отследить все движение (документы, операции) по данному либо иному логическому ограничению.

Пример 2. Необходимо найти дебиторскую задолженность (сумму долга) предприятию с кодом 12345 за поставленные товары/работы/услуги по проектам 111 и 112.

Задано минимальное подмножество атрибутов: A_1 – идентификатор связи, A_2 – идентификатор записи о поступлении товара/работ/услуг, A_3 – идентификатор записи платежа, A_4 – код предприятия, A_5 – идентификатор проекта, A_6 – идентификатор договора поставки, A_7 – номер документа прихода, A_8 – сумма документа прихода, A_9 – отчетный период. На данном множестве атрибутов существуют следующие функциональные зависимости: $DEP = \{A_1 \rightarrow A_2A_3A_4A_5A_6, A_2 \rightarrow A_7A_8A_9\}$. Получаем схему отношений: Связи документов = $R_1(A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6)$, Поступления товаров/работ/услуг = $R_2(A_2, A_7, A_8, A_9)$. Одно из возможных представлений гиперкуба приведено в табл. 2.

Схема гиперкуба в табл. 2 может быть представлена в следующем виде:

$$\{R_2.A_7\} \times \{R_1.A_4\{R_1.A_5\{R_1.A_6\{R_2.A_9(R_2.A_8)\}}\}\},$$

где $D_1 = \{R_2.A_7\}$ и $D_2 = \{R_1.A_4, R_1.A_5, R_1.A_6, R_2.A_9\}$ – измерения, $M = \{R_2.A_8\}$ – факты. Логическое ограничение: $F = (R_1.A_2 \neq NULL \wedge R_1.A_3 = NULL \wedge R_1.A_4 = 12345)$.

Дебиторская задолженность

Код предприятия	12345							
Проект	111				112			
Договор поставки	222	223		224		225		
Отчетный период	333		334		333		334	
№ док.	I/2020	II/2020	III/2020	IV/2020	I/2020	II/2020	III/2020	IV/2020
11	75000	21500	250000	784200	357500	650800	65500	48000
12	31000	79200	310000	58100	785000	130000	96000	51700
13	70000	623300	870080	3700	6500	210000	55000	3580

Пример соответствующего SQL запроса приведен на рис. 3.

```

SELECT pok.cod_pred AS pok_cod_pred, -- предприятие
       pok.id_zatr AS pok_id_zatr, -- проект
       pok.id_dog AS pok_id_dog, -- договор
       prih.num_doc AS prih_num_doc, -- номер документа прихода
       prih.sum_doc AS prih_sum_doc, -- сумма документа прихода
       prih.cod_val AS prih_cod_val, -- код валюты документа прихода
       prih.buh_period AS prih_buh_period -- отчетный период
FROM pok_sw pok
LEFT JOIN pok_prih prih ON pok.id_pr = prih.id_prih
WHERE pok.id_pr IS NOT NULL -- был приход товара (наличие документа
прихода)
AND pok.id_opl IS NULL -- не было оплаты
AND pok.cod_pred = 12345 -- данные по предприятию с кодом 12345

```

Рис. 3. SQL запрос данных о дебиторской задолженности указанному предприятию

Fig. 3. SQL query of data on accounts receivable for the specified company

Результатом будут все строки по исследуемому предприятию, где зарегистрированы первичные приходные документы, по всем проектам, договорам поставки с возможными оплатами в любой валюте. Здесь можно анализировать, за какую поставку чем оплачивалось, какие были согласованы акцепты, авансы или платежи, по каким договорам, для кого, какие счета-фактуры для налогового учета и когда они должны попасть в книги покупок и продаж и т. д. Пример подсчета суммы платежей предприятию представлен на рис. 4.

```

SELECT SUM(DECODE(NVL(pok.id_opl, 0), 0, 0, pok.sum_doc)) AS
sum_opl, pok.cod_val
FROM pok_sw pok
WHERE pok.id_pr IS NOT NULL -- был приход товара (наличие приход-
ного ордера)
AND pok.cod_pred = 12345 -- данные по предприятию с кодом 12345
GROUP BY pok.cod_val

```

Рис. 4. SQL запрос суммы долга указанному предприятию

Fig. 4. SQL query for the amount owed to the specified company

Пример 3. Получить информацию о том, какие товары/работы/услуги были оплачены данным документом и на основании какого документа согласования (акцепта) это было сделано.

Задано минимальное подмножество атрибутов: A_1 – идентификатор связи, A_2 – идентификатор записи о поступлении товара/работ/услуг, A_3 – идентификатор записи документа согласования (акцепта), A_4 – идентификатор записи платежа, A_5 – код предприятия, A_6 – идентификатор проекта, A_7 – идентификатор договора поставки, A_8 – вид документа прихода, A_9 – номер документа прихода, A_{10} – сумма прихода, A_{11} – номер акцепта, A_{12} – номер документа оплаты, A_{13} – дата документа оплаты. Имеются следующие зависимости: $DEP = \{A_1 \rightarrow A_2A_3A_4A_5A_6A_7, A_2 \rightarrow A_8A_9(A_{10}), A_3 \rightarrow A_{11}, A_4 \rightarrow A_{12}A_{13}\}$ (три функциональных и одна многозначная).

В данном примере предлагается отказаться от необходимости выполнения функциональной зависимости [9–13]

$$D_1D_2...D_d \rightarrow M,$$

которая означает, что любому составному вектору значений размерностей $D_1D_2...D_d$ соответствует не более одного вектора значений мер M .

Отказ от данной зависимости позволит использовать содержательные (не ключевые) атрибуты в размерностях и иметь в одной ячейке гиперкуба несколько значений (список) атрибута $R_iA_j \in M$. Списки значений используются в анализе данных, когда значения параметров не надо соотносить с объектами.

Получаем следующую схему отношений: Связи документов = $R_1(A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7)$, Поступления товаров/работ/услуг = $R_2(A_2, A_8, A_9, A_{10})$, Документы согласования платежей = $R_3(A_3, A_{11})$, Платежные документы = $R_4(A_4, A_{12}, A_{13})$. Одно из возможных представлений гиперкуба приведено в табл. 3.

Таблица 3

Данные платежного документа

Код предприятия	12345							
Проект	111							
Договор поставки	222				223			
Вид документа прихода	Приходная накладная		Приходный ордер		Акт выполненных работ		Приходная накладная	
№ акцепта	Сумма	№ док. прихода	Сумма	№ док. прихода	Сумма	№ док. прихода	Сумма	№ док. прихода
11	75000	21	357500	24	250000	27	65500	30
12	31000	22	785000	25	310000	28	96000	31
13	70000	23	6500	26	870080	29	55000	32

Схема гиперкуба в табл. 3 может быть представлена в следующем виде:

$$\{R_3.A_{11}\} \times \{R_1.A_5\{R_1.A_6\{R_1.A_7\{R_2.A_8(R_2.A_9)\}(R_2.A_{10})\}\}\},$$

где $D_1 = \{R_3.A_{11}\}$ и $D_2 = \{R_1.A_5, R_1.A_6, R_1.A_7, R_2.A_8\}$ – измерения, $M = \{R_3.A_9, R_3.A_{10}\}$ – факты. Логическое ограничение: $F = (R_4.A_{12} = 987 \wedge R_4.A_{13} = 21.01.2021)$.

Пример соответствующего SQL запроса приведен на рис. 5.

Аналогичным образом реализован модуль АСУ ФЭЗ «Продажи» и другие вспомогательные модули. В совокупности эти модули составляют ядро системы.

Схема базы данных изначально спроектирована в соответствии с правилами нормальных форм [6; 7] и обладает свойством соединения без потерь информации (СБПИ) в соответствии с теоремой 5.8 [6]:

Пусть σ – декомпозиция отношения R , образованная схемами отношений в третьей нормальной форме, и пусть также X – ключ R . Тогда $\tau = \sigma \cup \{X\}$ – декомпозиция R , такая, что все составляющие ее схемы отношений находятся в третьей нормальной форме. Эта декомпозиция сохраняет зависимости и сохраняет свойство соединения без потерь.

```

SELECT pok.cod_pred AS pok_cod_pred, -- предприятие
       pok.id_zatr AS pok_id_zatr, -- проект
       pok.id_dog AS pok_id_dog, -- договор
       prih.wid_doc AS prih_wid_doc, -- вид документа прихода
       prih.num_doc AS prih_num_doc, -- номер документа прихода
       prih.sum_doc AS prih_num_doc, -- сумма прихода
       sogl.num_doc AS osn_num_doc -- номер акцепта
FROM pok_sw pok
     LEFT JOIN pok_prih prih ON pok.id_pr = prih.id_prih
     LEFT JOIN pok_sogl sogl ON pok.id_osn = sogl.id_osn
     LEFT JOIN pok_opl opl ON pok.id_opl = opl.id_opl
WHERE opl.num_doc = 987 -- № документа из таблицы регистрации оплат
      AND opl.date_doc = TO_DATE('21.01.2021', 'dd.mm.yyyy') -- дата
документа из таблицы регистрации оплат

```

Рис. 5. SQL запрос данных платежа

Fig. 5. SQL query for payment data

Полученные в результате кубы данных соответствуют формальным правилам, рассмотренным в работе [14], в соответствии с моделью данных «композиционная таблица», которая, в свою очередь, является обобщением модели «семантическая трансформация» [12], на случай списка значений в одной ячейке. Данный алгоритм формирует иерархии в измерениях гиперкуба, используя функциональные, многозначные зависимости исходной базы данных и иерархии атрибутов, заданные пользователем.

Описанная методика хранения и обработки данных позволяет эффективно выполнять как OLTP, так и OLAP операции без создания дополнительных структур данных и выполнения лишних преобразований. Это, в свою очередь, ведет к существенному снижению накладных расходов как по сложности составления запросов, так и по времени их выполнения по сравнению с классическим OLAP-инструментарием, способствует более оптимальному использованию ресурсов хранилища данных, позволяет избегать необходимости хранить избыточные данные. Применение описанного алгоритма в OLAP-системах позволяет сократить время на формирование схемы новой многомерной модели данных, а также сделать представление модели наиболее удобным для работы пользователя.

Заключение

Предложенный вариант формирования и хранения данных первичных документов о хозяйственной деятельности предприятия обеспечивает детализированный раздельный учет финансово-хозяйственных операций покупок и продаж, и позволяет эффективно решать проблемы построения бухгалтерского, налогового и управленческого учетов. Применение вышеописанных схем, логики хранения и обработки данных для работы с различными их производными дает возможность дифференцировать элементы цепочки событий (состояний) в учете до первоисточников, увязанных в таблице связей в соответствии с логикой хозяйственных операций, что позволяет анализировать данные по любому интересующему набору аналитики. Таким образом, на любом этапе и участке учета всегда имеются целостные информационные связи. При этом обеспечивается возможность построения сложных OLAP структур данных в сочетании с быстродействием транзакционной СУБД. Эффективность работы АСУ ФЭЗ и лежащих в ее основе алгоритмов подтверждается опытом многолетней промышленной эксплуатации на одном из ведущих предприятий госкорпорации «Роскосмос» АО «ИСС» без привлечения внешних коммерческих решений.

Библиографические ссылки

1. Вычугжанина Т. В., Долгова И. А. Использование хранилищ данных и OLAP-технологии в современных ERP-системах // Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения : сб. тр. конф. Пенза, 2017.
2. Аврунев О. Е., Стасышин В. М. Модели баз данных. Новосибирск : Изд. НГТУ, 2018. 124 с.
3. Компания «Абис Софт». Применение OLAP-технологий для учетных систем на платформе 1С [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cfin.ru/itm/olap/1c.shtml> (дата обращения: 11 02 2021).
4. Гончарова Ю. А., Андреева Н. М. Чтение данных периодического регистра сведений «1С:Предприятие 8.1» методами табличной модели информационной базы // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2012. № 1. С. 393–394.
5. Картамышев А. С., Вилков Ю. В., Инновации в управлении предприятием РКО. Интегрированная информационная система управления предприятием АО «ИСС» // Актуальные вопросы проектирования автоматических космических аппаратов для фундаментальных и прикладных научных исследований. Анапа, 2017.
6. Ульман Дж. Основы систем баз данных. М. : Финансы и статистика, 1983. 334 с.
7. Maier D. The Theory of Relational Databases. Rockville: Computer Science Press, 1983.
8. Зыкин С. В., Мосин С. В., Полуянов А. Н. Технология раздельного формирования многомерных данных // Вестник Донского гос. техн. ун-та. 2016. № 2(85). С. 121–128.
9. Lechtenborger J., Vossen G. Multidimensional normal forms for data warehouse design // Information Systems Frontiers. 2003. No. 28. P. 415–434.
10. Lehner W., Albrecht J., Wedekind H. Normal forms for multidimensional databases // Proceedings of the Tenth International Conference on Scientific and Statistical Database Management. 1998. P. 63–72.
11. Mazon J., Trujillo J., Lechtenborger J. Reconciling requirement-driven data warehouses with data sources via multidimensional normal forms // Data & Knowledge Engineering, 2007. No. 3 (63). P. 725–751.
12. Zykin S.V. Formation of Hypercube Representation of Relational Database. Programming and Computer Software. 2006. No. 6 (32). P. 348–354.
13. Zykin S.V. Dynamic contexts of relational-type database. Informatics and Applications. 2014. No. 1 (8). P. 77–88.
14. Редреев П. Г. Построение иерархий в многомерных моделях данных // Известия Саратовского ун-та, 2009. № 4. С. 7–12.

References

1. Vychugzhanina T. V., Dolgova I. A. [Using data warehouses and OLAP-technology in modern ERP-systems]. *Informacionnye tekhnologii v modelirovanii i upravlenii: podhody, metody, resheniya*. Penza, 2017 (In Russ.).
2. Avrunev O. E., Stasyshin V. M. *Modeli baz dannykh* [Database models]. Novosibirsk, Novosibirsk state technical university Publ., 2018 (In Russ.).
3. *Kompaniya "Abis Soft". Primenenie OLAP-tekhnologii dlya uchetykh sistem na platforme 1S* [Abis Soft company. Using of OLAP technologies for accounting systems on the 1C platform]. Available at: <https://www.cfin.ru/itm/olap/1c.shtml> (accessed: 11.02 2021).
4. Goncharova Y. A., Andreeva N. M. [Reading data from the 1C: Enterprise 8.1 periodic information register using the methods of the infobase tabular model]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики*. 2012, No. 1, P. 393–394 (In Russ.).

5. Kartamyshev A. S., Vilkov Y. V. [Innovation in aerospace enterprise control. Integrated information control system of the enterprise JSC “ISS”]. *Aktual'nye voprosy proektirovaniya avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov dlya fundamental'nyh i prikladnyh nauchnyh issledovaniy*, Anapa, 2017 (In Russ.).
6. Ulman J. *Osnovy sistem baz dannykh* [Principles of Database Systems]. Moscow, Finance and statistics Publ., 1983, 334 p.
7. Maier D. *The Theory of Relational Databases*. Rockville, Computer Science Press, 1983.
8. Zykin S. V., Mosin S. V., Poluyanov A. N. [Technology of separate generation of multidimensional data]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2016, No. 2(85), P. 121–128 (In Russ.).
9. Lechtenborger J., Vossen G. Multidimensional normal forms for data warehouse design. *Information Systems Frontiers*. 2003, No. 28, P. 415–434.
10. Lehner W., Albrecht J., Wedekind H. Normal forms for multidimensional databases. *Proceedings of the Tenth International Conference on Scientific and Statistical Database Management*. 1998, P. 63–72.
11. Mazon J., Trujillo J., Lechtenborger J. Reconciling requirement-driven data warehouses with data sources via multidimensional normal forms. *Data & Knowledge Engineering*. 2007, No. 3 (63), P. 725–751.
12. Zykin S. V. Formation of Hypercube Representation of Relational Database. *Programming and Computer Software*. 2006, No. 6 (32), P. 348–354.
13. Zykin S. V. Dynamic contexts of relational-type database. *Informatics and Applications*. 2014, No. 1 (8), P. 77–88.
14. Redreev P. G. [Construction of Hierarchies in Multidimensional Data Models]. *Izvestiya Saratovskogo universiteta*. 2009, No. 4, P. 7–12 (In Russ.).

© Картамышев А. С., Черныш Б. А., Мурыгин А. В., 2021

Картамышев Александр Сергеевич – начальник группы автоматизации задач управления в Обществе; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: kartam@iss-reshetnev.ru.

Черныш Борис Александрович – аспирант; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: borisblack@mail.ru.

Мурыгин Александр Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-управляющих систем; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: avm514@mail.ru.

Kartamyshev Alexandr Sergeevich – Chief of control process automation group in the Company, JSC Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: kartam@iss-reshetnev.ru.

Chernysh Boris Aleksandrovich – postgraduate student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: borisblack@mail.ru.

Murygin Alexandr Vladimirovich – Dr. Sc., Professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: avm514@mail.ru.

УДК 519.711.3

Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-600-612

Для цитирования: Ликсонова Д. И., Раскина А. В. Непараметрические алгоритмы идентификации и управления для Т-процессов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 4. С. 600–612. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-600-612.

For citation: Liksonova D. I., Raskina A. V. Non-parametric identification and control algorithms for T-processes. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 4, P. 600–612. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-600-612.

Непараметрические алгоритмы идентификации и управления для Т-процессов

Д. И. Ликсонова, А. В. Раскина

Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660074, ул. Академика Киренского, 26, к. 1
E-mail: LiksonovaDI@yandex.ru

В настоящей работе рассматриваются непараметрические методы идентификации и управления для многомерных дискретно-непрерывных процессов с запаздыванием, присущих многим реальным производствам. Конечно, такие системы типичны для практики, в том числе и в ракетно-космической отрасли, а также в технологических процессах производства космической техники. Рассматривая многомерные процессы, необходимо учитывать связи между входными и выходными переменными, а также их связи между собой. Причем эти связи не всегда известны исследователю. При учете неизвестных связей входных переменных исследователь будет иметь дело с трубчатými процессами или Н-моделями, а при учете неизвестных связей выходных переменных модель по тому или иному каналу объекта будет представлять собой аналоги неявных функций. В целом модель многомерного объекта будет представляться в виде системы нелинейных неявных уравнений. В этом случае решение задачи идентификации будет сводиться к нахождению прогноза вектора выходных переменных по известным значениям вектора входных переменных и может быть получено только в результате решения соответствующей системы уравнений, которые были названы Т-моделями, о которых и пойдет речь в настоящей статье. Решение системы нелинейных неявных уравнений параметрическими методами идентификации не приведет к нужному результату из-за отсутствия достаточной априорной информации, вот тут и возникает необходимость в применении непараметрических методов идентификации, а также использовании методов системного анализа. Априорная информация в задачах непараметрической статистики носит недостаточный характер, с чем не могут справиться общепринятые методы идентификации.

При управлении многомерными процессами следует учитывать зависимости выходных переменных, в связи с чем возникает еще одна важная особенность, а именно: в качестве задающих воздействий нельзя использовать случайные значения из области определения выходных переменных, их нужно выбирать из их общего пересечения.

Ключевые слова: идентификация, управление, многомерный объект, составные вектора, непараметрические алгоритмы.

Non-parametric identification and control algorithms for T-processes

D. I. Liksonova, A. V. Raskina

Siberian Federal University
26 k., 1, Academician Kirensky St., 660074, Russian Federation
E-mail: LiksonovaDI@yandex.ru

In this paper, we consider nonparametric identification and control methods for multidimensional discrete-continuous processes with delay, which are typical for many real industries. Of course, such systems are typical for practice, including in the rocket and space industry, as well as in technological processes for the production of space technology. In multidimensional processes, we must take into account the relationships between input and output variables, as well as their relationship with each other. Moreover, these connections are not always known to the researcher. Taking into account the unknown connections of the input variables, the researcher will deal with tubular processes or H-models, and if the unknown connections of the output variables are taken into account, the model along one or another channel of the object will be analogs of implicit functions. In general, the model of a multidimensional object will be represented as a system of nonlinear implicit equations. In this case, the solution to the identification problem will be reduced to finding the forecast of the vector of output variables from the known values of the vector of input variables and can be obtained only as a result of solving the corresponding system of equations, which were called T-models, which will be discussed in this article. The solution of a system of nonlinear implicit equations by parametric identification methods will not lead to the desired result, due to the lack of sufficient a priori information, this is where the need to use nonparametric identification methods arises, as well as the necessary use of system analysis methods. A priori information in problems of nonparametric statistics is insufficient, which cannot be dealt with by generally accepted identification methods.

When managing multidimensional processes, the dependencies of the output variables should be taken into account. Here another important feature arises, which consists in the fact that random values from the range of definition of output variables cannot be used as reference influences, they must be selected from their common intersection.

Keywords: identification, control, multidimensional object, composite vectors, nonparametric algorithms.

Введение

В настоящее время задачи идентификации и управления многомерными дискретно-непрерывными системами с запаздыванием в условиях априорной неопределенности являются достаточно важными [1]. Во многих производствах добычи, переработки и хранения продукции обычно технологи имеют дело с многомерными дискретно-непрерывными процессами. Например, при производстве конвертерной стали происходят сложные физико-химические реакции и поэтому отсутствие адекватной модели может привести к неудачному управлению конвертером, связанному с большим отклонением (более 5 %) значений выходных переменных от заданных. В таком случае построение параметрической модели конвертерного производства приведет к проведению большего числа экспериментов и соответственно к многочисленным затратам, в то время как использование непараметрических моделей существенно сокращает затраты и позволяет уменьшить время на создание адекватной модели [2].

Подобные многомерные объекты (процессы) имеют чаще всего зависимости выходных переменных $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, стохастически зависимых заранее неизвестным образом (Т-процессы). Это приводит к тому, что математическое описание многомерного объекта будет представлять-

ся в виде некоторого аналога системы неявных функций вида $F_j(u, x) = 0, j = \overline{1, n}$, где $u = (u_1, u_2, \dots, u_m)$ – входные переменные процесса. Основная особенность подобных объектов состоит в том, что класс зависимостей $F(\cdot)$ неизвестен с точностью до параметров. В этом случае классическая теория идентификации не применима. Задача идентификации сводится к задаче решения системы нелинейных уравнений $F_j(u, x) = 0, j = \overline{1, n}$ относительно компонент вектора $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ при известных значениях u, x и наличии обучающей выборки $(u_i, x_i, i = \overline{1, s})$, которая может быть решена при использовании теории непараметрических систем [1]. Подобные задачи ранее не рассматривались [3; 4].

Воспользуемся конкретизацией понятия, связанного с термином «непараметрический», которое было использовано в работах М. Розенблатта и Э. Парзена [5; 6], а также в монографии Ф. П. Тарасенко [7].

«Непараметрическая задача – это статистическая задача, определенная на таких классах распределений, среди которых хотя бы один не сводится к параметрическому семейству функций».

«Непараметрическая задача оценивания неизвестных распределений – это задача нахождения процедуры, с помощью которой можно оценивать непараметризованные распределения из класса, например, всех непрерывных функций распределения или класса распределений, имеющих ряд производных и т. д.».

В настоящей же статье термин «непараметрический» означает отсутствие достаточной априорной информации для представления объекта с точностью до параметров.

Исходя из данных определений, можно сказать, что непараметрические методы намного выигрывают в эффективности, если параметрическая модель не описывает адекватно наблюдаемые данные [8].

Задача идентификации

Рассмотрим многомерный процесс, представленный на рис. 1.

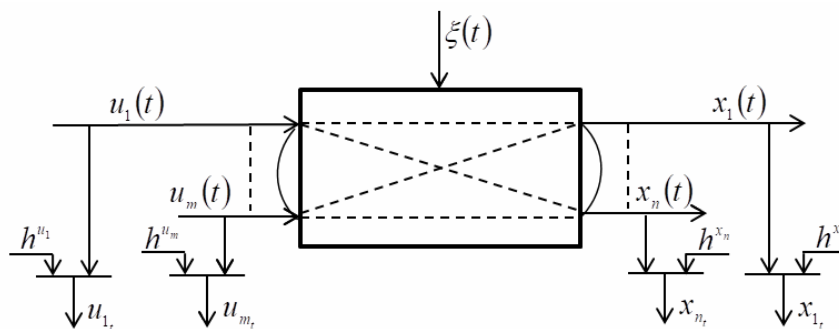


Рис. 1. Многомерный объект

Fig. 1. Multidimensional object

На рис. 1 приведены следующие обозначения: $u(t) = (u_1(t), u_2(t), \dots, u_k(t), \dots, u_m(t))$, $k = \overline{1, m}$ – m -мерный вектор входных переменных; $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_j(t), \dots, x_n(t))$, $j = \overline{1, n}$ – n -мерный вектор выходных переменных, которые принадлежат соответствующим областям: $x_j \in \Omega_j(x)$; $\xi(t)$ – случайные помехи, действующие на объект; h^u, h^x – случайные помехи

измерений соответствующих переменных процесса; пунктирные линии свидетельствуют о наличии зависимости входных и выходных переменных; (t) – непрерывное время; u_t, x_t – измерения входных и выходных переменных в дискретный момент времени t .

На основании вышеизложенного можно сказать, что многомерные процессы окружают нашу повседневную жизнь и представляют собой процессы, имеющие много входов и выходов, а также связи входных и выходных переменных между собой, связи только между входными переменными [9; 10] и только между выходными. Причем все эти связи не всегда известны исследователю [11], а может также присутствовать разнотипная априорная информация [12]. В связи с тем, что выходные переменные многомерного процесса связаны между собой, следует отметить и составной (ситуационный) вектор, который был введен Я. З. Цыпкиным в [13]. Составной вектор – это вектор, составленный из входных и выходных переменных. Это может быть любой набор, например $x^{<3>} = (u_2, u_5, \mu_1, x_4)$. Составной вектор известен исследователю из априорной информации.

Рассмотрим понятие запаздывания в многомерном объекте. В одном случае запаздывание – это природное свойство объекта (например, это может быть длительность процесса измельчения клинкера для получения цемента). В другом случае, задержка будет связана с дискретностью измерений, например, если выходные характеристики процесса или объекта можно наблюдать только через некоторый период времени. Таким образом, в теории управления запаздывание и задержку следует различать по-разному. Следует учитывать, что задержка может зависеть от аппаратуры и технологии измерения, когда измерения выходных переменных осуществляются в различные промежутки времени, например раз в два часа, раз в смену, раз в сутки и т. д.

Задача идентификации многомерных объектов заключается в построении моделей этих объектов, которые условно можно представить на рис. 2.

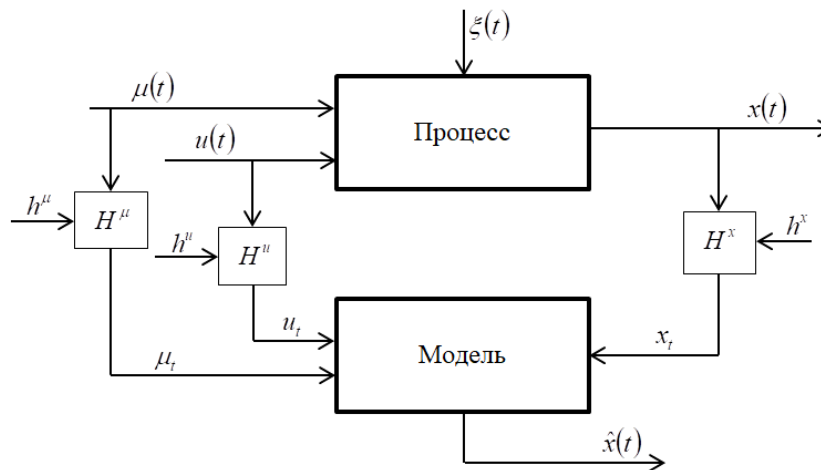


Рис. 2. Многомерный дискретно-непрерывный процесс

Fig. 2. Multidimensional discrete-continuous process

На рис. 2 на вход рассматриваемого процесса поступает вектор входных управляемых переменных $u(t) = (u_1(t), \dots, u_m(t)) \in (u) \subset R^m$ и вектор входных неуправляемых, но контролируемых переменных $\mu(t) = (\mu_1(t), \dots, \mu_p(t)) \in (\mu) \subset R^p$, на выходе наблюдается вектор выходных переменных $x(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t)) \in (x) \subset R^n$, $\hat{x}(t)$ – выход модели. Входные и выходные перемен-

ные контролируются в дискретные моменты времени через интервал Δt . Средствами контроля H^u, H^μ, H^x получаем выборку наблюдений или обучающую выборку. В каналах измерения переменных действуют случайные помехи h^u, h^μ, h^x .

Как было сказано выше, процессы, рассматриваемые в настоящей работе, имеют неизвестные зависимости компонент выходных переменных. Поэтому исследуемый процесс будет описываться системой неявных стохастических уравнений:

$$F_j(u(t), \mu(t), x(t + \tau), (t)) = 0, \quad j = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где функции $F_j(\cdot)$ не известны, так как не известны зависимости выходных переменных; τ – известное запаздыванием по различным каналам изучаемого процесса.

Задача идентификации состоит в построении модели системы, которая представлена на рис. 2, при наличии выборки наблюдений над объектом: $u_i = (u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im})$, $\mu_i = (\mu_{i1}, \mu_{i2}, \dots, \mu_{ip})$, $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$, $i = \overline{1, s}$.

В этом случае Т-модель процесса с неизвестными зависимостями компонент вектора выходных переменных будет рассматриваться в виде системы:

$$\hat{F}_j(u^{<j>, \mu^{<j>, x^{<j>, \bar{u}_s, \bar{\mu}_s, \bar{x}_s) = 0, \quad j = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где $u^{<j>, \mu^{<j>, x^{<j>$ – составные векторы, $\bar{u}_s, \bar{\mu}_s, \bar{x}_s$ – временные векторы (т. е. набор данных, которые поступили к s -му моменту времени).

В результате измерения входных и выходных переменных может быть получена обучающая выборка $u_i = (u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im})$, $\mu_i = (\mu_{i1}, \mu_{i2}, \dots, \mu_{ip})$, $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$, $i = \overline{1, s}$, которая используется при построении модели многомерного объекта. Так как входные воздействия u заданы и известны, то решаем систему (2) и получаем оценки \hat{x}_j компонент вектора выходных переменных x_j при соответствующих значениях входных воздействий u . Здесь естественно воспользуемся методами непараметрического оценивания [14].

Для начала подставляем l -е поступление входных переменных $u_l = (u_{l1}, \dots, u_{lm})$, $l = \overline{1, s}$, где s – объем обучающей выборки, в формулу (2). Далее подставляем выходные переменные из обучающей выборки $x_i = (x_{i1}, \dots, x_{in})$ для определения невязок ε_i , $i = \overline{1, s}$. Невязки ε_i , $i = \overline{1, s}$ вычисляются по следующей формуле:

$$\varepsilon_{ij} = f_j(u^{<j>, \mu^{<j>, x^{<j>, \bar{u}_s, \bar{\mu}_s, \bar{x}_s), \quad j = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где функции $f_j(\cdot)$ принимаются в виде разницы между измеренными значениями компонент выхода и их оценками [15]:

$$\varepsilon_j(i) = x_j(i) - \frac{\sum_{i=1}^s x_j[i] \prod_{k=1}^{<m>} \Phi\left(\frac{u'_k - u_k[i]}{c_{su_k}}\right) \prod_{v=1}^{<p>} \Phi\left(\frac{\mu'_v - \mu_v[i]}{c_{s\mu_v}}\right)}{\sum_{i=1}^s \prod_{k=1}^{<m>} \Phi\left(\frac{u'_k - u_k[i]}{c_{su_k}}\right) \prod_{v=1}^{<p>} \Phi\left(\frac{\mu'_v - \mu_v[i]}{c_{s\mu_v}}\right)}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (4)$$

где $< m >$ – размерность составного вектора u_k , $< m > \leq m$.

Далее оцениваем условное математическое ожидание

$$x_j = M \{x_j | u^{<j>}, \mu^{<j>}, \varepsilon = 0\}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (5)$$

и в конечном итоге прогноз для каждой компоненты вектора выходных переменных будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{x}_j = \frac{\sum_{i=1}^s x_j[i] \cdot \prod_{k_1=1}^{<m>} \Phi \left(\frac{u_{k_1} - u_{k_1}[i]}{c_{su}} \right) \prod_{v_1=1}^{<p>} \Phi \left(\frac{\mu_{v_1} - \mu_{v_1}[i]}{c_{s\mu}} \right) \prod_{k_2=1}^{<n>} \Phi \left(\frac{\varepsilon_{k_2}[i]}{c_{s\varepsilon}} \right)}{\sum_{i=1}^s \prod_{k_1=1}^{<m>} \Phi \left(\frac{u_{k_1} - u_{k_1}[i]}{c_{su}} \right) \prod_{v_1=1}^{<p>} \Phi \left(\frac{\mu_{v_1} - \mu_{v_1}[i]}{c_{s\mu}} \right) \prod_{k_2=1}^{<n>} \Phi \left(\frac{\varepsilon_{k_2}[i]}{c_{s\varepsilon}} \right)}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (6)$$

где в качестве колоколообразных функций $\Phi(\cdot)$ были приняты функции различных типов и коэффициенты $c_{su}, c_{s\mu}, c_{s\varepsilon}$ удовлетворяли условиям сходимости [16].

Оценка (6) и является прогнозом выходных переменных x при известных входных u .

Задача управления

Рассмотрим многомерный объект – блок-схему с запаздыванием, общая схема управления которого представлена на рис. 3.

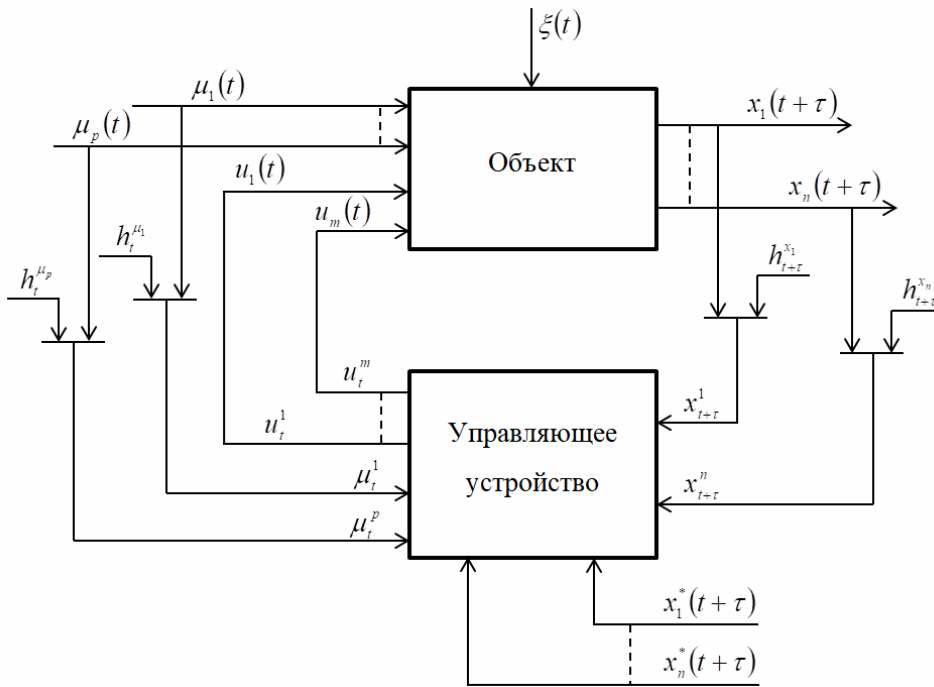


Рис. 3. Схема непараметрической системы управления объектом с запаздыванием

Fig. 3. Scheme of a nonparametric control system for an object with delay

На рис. 3 приняты следующие обозначения: $u(t) = (u_1(t), \dots, u_m(t))$ – управляемые входные переменные; $\mu(t) = (\mu_1(t), \dots, \mu_p(t))$ – неуправляемые, но контролируемые входные переменные; $x(t + \tau) = (x_1(t + \tau), \dots, x_n(t + \tau)) \in R^n$ – выходные переменные процесса; $x^*(t + \tau) = (x_1^*(t + \tau), \dots, x_n^*(t + \tau)) \in R^n$ – задающие воздействия; ξ_t, h_t^{μ}, h_t^x – случайные стационарные помехи, действующие на объект и в каналах измерения входных и выходных пере-

менных; τ – запаздывание по различным каналам многомерной системы. Запаздывание τ известно по всем каналам многомерной системы, и в данном случае является одинаковым для каждой компоненты вектора выходных переменных.

Если принимать во внимание, что выходные переменные многомерного Т-процесса стохастически связаны между собой, то определение задающих воздействий для такой системы приобретает некоторое отличие. Так как выходные переменные связаны, то общее пересечение они имеют в некоторой области $\Omega_j(x_j)$, но не всегда все выходные переменные будут пересекаться в одной области. В том случае если эта область $\Omega_j(x_j)$ существует, то задающие воздействия необходимо выбирать только из этой области, в противном случае управление такой системой не представляется возможным. В случае если такой области нет, то управлять такой системой бесполезно. При этом приведем систему управления многомерным объектом, в которой рассмотрим систему взаимосвязанных задающих воздействий (рис. 4).

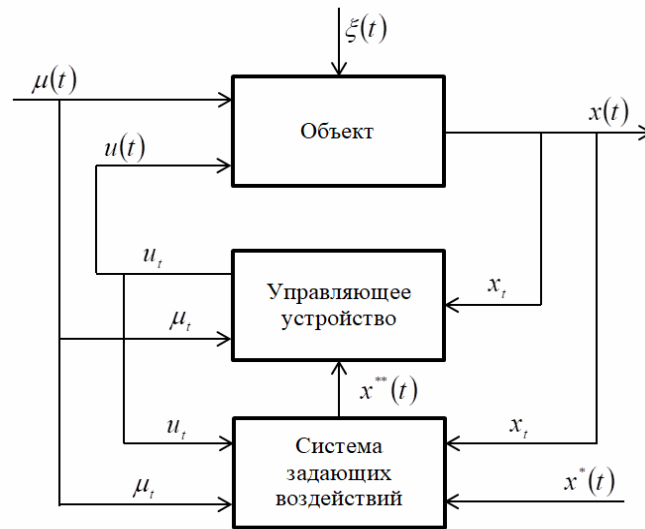


Рис. 4. Схема непараметрической системы управления с дополнительным блоком

Fig. 4. Diagram of a nonparametric control system with an additional block

Рис. 4 в отличие от рис. 3 дополнен блоком формирования задающих воздействий для их определения. На рис. 4 приняты следующие обозначения: $x^*(t)$ – исходные значения задающих воздействий; $x^{**}(t)$ – задающие воздействия, которые необходимо найти из системы уравнений

$$F_j(u^{<j>(t), \mu^{<j>(t), x^{*<j>(t)}) = 0, \quad j = \overline{1, n}, \quad (7)$$

где функции $F_j(\cdot)$ продолжают оставаться неизвестными. Изложим процедуру управления, начиная с конкретного момента времени t .

Пусть имеется обучающая выборка $(u^i, \mu^i, x^i, i = \overline{1, s})$. В конкретный момент времени t на вход поступают неуправляемые, но контролируемые переменные μ_t , при этом управляющие воздействия u_t и выходные переменные x_t пока неизвестны. Далее из всей первоначальной выборки $(u^i, \mu^i, x^i, i = \overline{1, s})$ выбираются те строки, в которых значения μ_t наиболее близки к вновь поступившим значениям μ_t , и из этих строк формируется новая выборка. Задающие

воздействия x_j^{**} находятся из новой сформированной выборки $x_j^{**} \in A(x_j)$, а именно из решения системы (7). Решение системы (7) сводится к последовательности алгоритмов, изложенной ниже.

Для задающего воздействия x_1^{**} берем произвольные значения из области $\Omega_1(x_1)$. Вторую переменную x_2^{**} определяем с учетом выбранной компоненты x_1^{**} из следующего выражения:

$$x_2^{**i} = \frac{\sum_{i=1}^{s_1} x_2^i \Phi\left(\frac{x_1^{**} - x_1^i}{c_{x_1}}\right) \prod_{k=1}^{<m>} \Phi\left(\frac{u_k - u_k^i}{c_{u_k}}\right) \prod_{v=1}^{<p>} \Phi\left(\frac{\mu_v - \mu_v^i}{c_{\mu_v}}\right)}{\sum_{i=1}^{s_1} \Phi\left(\frac{x_1^{**} - x_1^i}{c_{x_1}}\right) \prod_{k=1}^{<m>} \Phi\left(\frac{u_k - u_k^i}{c_{u_k}}\right) \prod_{v=1}^{<p>} \Phi\left(\frac{\mu_v - \mu_v^i}{c_{\mu_v}}\right)}, \quad (8)$$

где $s_1 \subseteq \Omega(x_1)$, т. е. суммирование проводится не по всей первоначальной выборке, а только по тем значениям, которые были наиболее близки к вновь поступившим значениям μ_i .

В общем виде алгоритм принимает следующий вид:

$$x_j^{**s} = \frac{\sum_{i=1}^{s_{j-1}} x_j^i \prod_{j=1}^{j-1} \Phi\left(\frac{x_j^{**} - x_j^i}{c_{x_j}}\right) \prod_{k=1}^{<m>} \Phi\left(\frac{u_k - u_k^i}{c_{u_k}}\right) \prod_{v=1}^{<p>} \Phi\left(\frac{\mu_v - \mu_v^i}{c_{\mu_v}}\right)}{\sum_{i=1}^{s_{j-1}} \prod_{j=1}^{j-1} \Phi\left(\frac{x_j^{**} - x_j^i}{c_{x_j}}\right) \prod_{k=1}^{<m>} \Phi\left(\frac{u_k - u_k^i}{c_{u_k}}\right) \prod_{v=1}^{<p>} \Phi\left(\frac{\mu_v - \mu_v^i}{c_{\mu_v}}\right)}. \quad (9)$$

После определения задающих воздействий можно приступить к нахождению прогнозных значений управляющих воздействий для многомерной системы. Для этого воспользуемся следующим непараметрическим алгоритмом. Входную переменную $u_1(t)$ берем произвольно из области $\Omega(u_1)$. Входная переменная $u_2(t)$ может быть определена в соответствии со следующим алгоритмом:

$$u_2 = \frac{\sum_{i=1}^s u_2^i \Phi\left(\frac{u_1 - u_1^i}{c_{u_1}}\right) \prod_{j=1}^n \Phi\left(\frac{x_j^{**} - x_j^i}{c_{x_j}}\right) \prod_{v=1}^p \Phi\left(\frac{\mu_v - \mu_v^i}{c_{\mu_v}}\right)}{\sum_{i=1}^s \Phi\left(\frac{u_1 - u_1^i}{c_{u_1}}\right) \prod_{j=1}^n \Phi\left(\frac{x_j^{**} - x_j^i}{c_{x_j}}\right) \prod_{v=1}^p \Phi\left(\frac{\mu_v - \mu_v^i}{c_{\mu_v}}\right)}, \quad (10)$$

где $(u^i, \mu^i, x^i, i = \overline{1, s})$ – обучающая выборка; μ_v – поступившие входные неуправляемые, но контролируемые переменные.

Для входной переменной $u_3(t)$ алгоритм управления будет выглядеть следующим образом:

$$u_3 = \frac{\sum_{i=1}^s u_3^i \Phi\left(\frac{u_1 - u_1^i}{c_{u_1}}\right) \Phi\left(\frac{u_2 - u_2^i}{c_{u_2}}\right) \prod_{j=1}^n \Phi\left(\frac{x_j^{**} - x_j^i}{c_{x_j}}\right) \prod_{v=1}^p \Phi\left(\frac{\mu_v - \mu_v^i}{c_{\mu_v}}\right)}{\sum_{i=1}^s \Phi\left(\frac{u_1 - u_1^i}{c_{u_1}}\right) \Phi\left(\frac{u_2 - u_2^i}{c_{u_2}}\right) \prod_{j=1}^n \Phi\left(\frac{x_j^{**} - x_j^i}{c_{x_j}}\right) \prod_{v=1}^p \Phi\left(\frac{\mu_v - \mu_v^i}{c_{\mu_v}}\right)}, \quad (11)$$

и так далее для каждой компоненты входа $u(t)$ объекта. В общем виде для многомерной системы алгоритм управления будет выглядеть следующим образом:

$$u_s^k = \frac{\sum_{i=1}^s u_i^k \prod_{k=1}^{k-1} \Phi\left(\frac{u_k - u_k^i}{c_{u_k}}\right) \prod_{j=1}^n \Phi\left(\frac{x_j^{**} - x_j^i}{c_{x_j}}\right) \prod_{v=1}^p \Phi\left(\frac{\mu_v - \mu_v^i}{c_{\mu_v}}\right)}{\sum_{i=1}^s \prod_{k=1}^{k-1} \Phi\left(\frac{u_k - u_k^i}{c_{u_k}}\right) \prod_{j=1}^n \Phi\left(\frac{x_j^{**} - x_j^i}{c_{x_j}}\right) \prod_{v=1}^p \Phi\left(\frac{\mu_v - \mu_v^i}{c_{\mu_v}}\right)}, \quad k = \overline{1, m}. \quad (12)$$

В реальных задачах часто число компонент вектора входных переменных u больше числа компонент вектора выходных переменных x . В этом случае в число компонент вектора μ включают компоненты вектора u , с тем, чтобы размерность вектора u и x сделать одинаковой.

Настраиваемыми параметрами будут параметры размытости c_{u_k} , c_{x_j} и c_{μ_v} , для них можно использовать следующие формулы: $c_{u_k} = \alpha |u_k - u_k^i|$, $c_{x_j} = \beta |x_j^{**} - x_j^i|$ и $c_{\mu_v} = \gamma |\mu_v - \mu_v^i|$, где α , β и γ некоторые параметры большие 1, $\alpha > 1$, $\beta > 1$, $\gamma > 1$. Следует заметить, что выбор c_{u_k} , c_{x_j} и c_{μ_v} осуществляется на каждом такте управления. При этом если сначала определен c_{u_k} , то определение c_{x_j} и c_{μ_v} осуществляется с учетом этого факта. Однако может быть и наоборот, например, сначала определяется c_{x_j} или c_{μ_v} , а потом остальные.

Вычислительные эксперименты

Для примера был взят объект с 4-мя входными переменными $u(t) = (u_1(t), u_2(t), u_3(t), u_4(t))$ и тремя выходными переменными $x(t) = (x_1(t), x_2(t), x_3(t))$. Подобные объекты характерны для реальных производств, например, для производства цемента, нефтепереработки, металлургии и т. д., где протекают только многомерные процессы. Для данного объекта была сформирована выборка входных и выходных переменных и найдены прогнозируемые значения выходных переменных при известных входных с использованием алгоритма (4) и (6). Для вычисления использовался объем выборки $s = 1000$, параметры размытости $c_{su} = 0,4$; $c_{se} = 0,2$, помеха, действующая на компоненты вектора выходных переменных $\alpha = 0,1$, запаздывание $\tau = 2$ такта (где 1 такт равен 1 минуте либо иной). Описание объекта с точностью до параметров было принято только для проведения компьютерного исследования и оставалось неизвестным для изложенной выше теории. Представим полученные результаты для третьей компоненты выхода многомерного объекта.

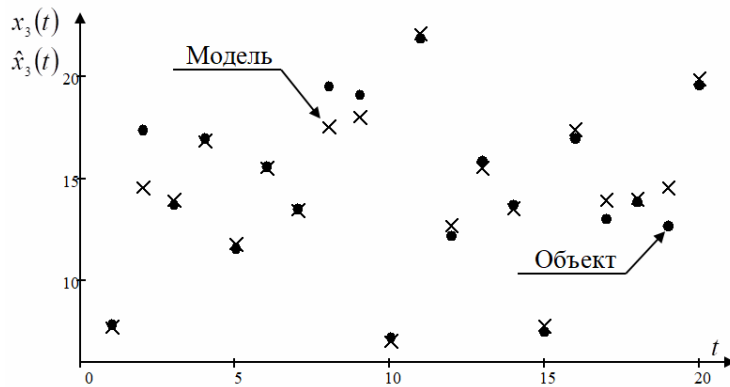


Рис. 5. Прогноз выходной переменной $x_3(t)$ объекта, измеренный с равномерной помехой 10 %, $\delta_3 = 0,07$

Fig. 5. The predicted output variable $x_3(t)$ of the object, measured with a uniform noise of 10 %, $\delta_3 = 0,07$

На рис. 5 представлены полученные прогнозируемые значения $\hat{x}_3(t)$ для третьей компоненты выхода $x_3(t)$. Погрешности определения переменных обусловлены наличием помех. Как видно из рис. 5, прогноз значений выходных переменных $\hat{x}_3(t)$ многомерного объекта по известным входным переменным $u(t)$ с учетом 10 % помехи достаточно удовлетворителен с точки зрения многих задач практики (например, процесс измельчения клинкера). Обратим еще раз внимание на то, что исследователю неизвестен вид системы уравнений, описывающий управляемый объект. В качестве информации о последнем используются измерения входных и выходных переменных $(u^i, \mu^i, x^i, i = \overline{1, s})$.

Далее приводятся результаты вычислительных экспериментов для данного объекта для первой компоненты выхода при использовании алгоритма управления (12). В данном вычислительном эксперименте число компонент вектора u больше числа компонент вектора x . Если же размерность вектора u превышает размерность вектора x , т. е. $m > n$, то сделаем замену: $u_4(t) \rightarrow \mu_1(t)$, чтобы размерность вектора u и x сделать одинаковой. Далее значения задающих воздействий $x_1^{**}(t)$, которые были найдены при помощи алгоритма (9), представим в виде ступенчатой функции, как показано на рис. 6.

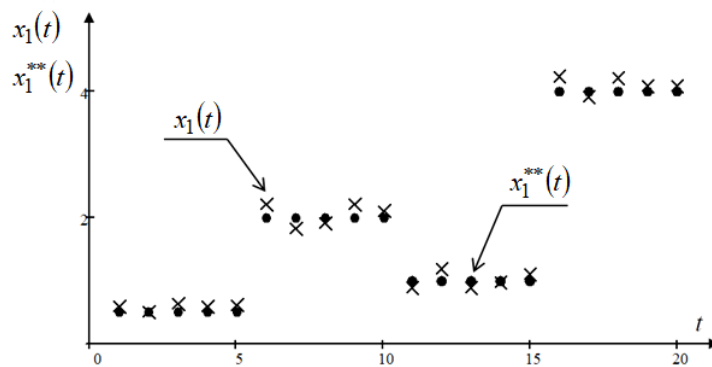


Рис. 6. Зависимость выхода объекта $x_1(t)$ от задающего воздействия $x_1^{**}(t)$

Fig. 6. Dependence of the output of the object $x_1(t)$ on the setting action $x_1^{**}(t)$

Как видно из рис. 6, выход объекта $x_1(t)$ достаточно близок к задающему воздействию $x_1^{**}(t)$ при наличии 10 % помехи и не превышает 1,7 % от значений $x_1^{**}(t)$, что удовлетворяет большинству практических задач.

Таким образом, непараметрический алгоритм управления многомерным объектом со стохастически зависимыми выходными переменными $x(t)$ показывает достаточно точные результаты с точки зрения многих практических задач.

Заключение

В настоящей статье рассматриваются задачи идентификации и управления многомерным объектом в условиях неполной информации об объекте исследования, т. е. в условиях, когда параметрическая модель процесса не определена. Такие многомерные объекты часто встречаются на практике, например в металлургии, энергетике, нефтепереработки и в других отраслях. Отличительная особенность моделей этих объектов и алгоритмов от известных состоит в том,

что задачи ставятся в условиях непараметрической неопределенности, т. е. в условиях, когда многомерная система не описывается с точностью до вектора параметров из-за недостатка априорных данных.

Еще основной особенностью является то, что и при задаче идентификации и задаче управления вводятся последовательности непараметрических алгоритмов. Сущность непараметрических алгоритмов идентификации и управления состоит в том, что для задачи идентификации прогноз выстраивается как условное математическое ожидание компонент вектора выходных переменных $x(t)$ при известных компонентах входных $u(t)$, а при управлении – как условное математическое ожидание входных переменных $u(t)$ при найденных задающих воздействиях $x^{**}(t)$.

Исходя из полученных прогнозируемых значений в вычислительном эксперименте, в процессе использования непараметрических алгоритмов, получаются достаточно хорошие с практической точки зрения результаты, которые можно использовать и при решении реальных задач на производствах [17].

Библиографические ссылки

1. Медведев А. В. Основы теории непараметрических систем. Красноярск : СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2018. 727 с.
2. Васильев В. А., Добровидов А. В., Кошкин Г. М. Непараметрическое оценивание функционалов от распределений стационарных последовательностей. М. : Наука, 2004. 508 с.
3. Методы классической и современной теории автоматического управления: в 5 т. Т. 1: Математические модели, динамические характеристики и анализ систем управления / под. ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 748 с.
4. Методы классической и современной теории автоматического управления: в 5 т. Т. 2: Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления / под. ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 640 с.
5. Rozenblatt M. Remarks on some nonparametric estimates of density function // Ann. Math. Statist. 1956. Vol. 27. P. 832–837.
6. Parzen E. On estimation of probability density function and mode // Ann. Math. Statist. 1962. Vol. 33. № 3. P. 1065–1076.
7. Тарасенко Ф. П. Непараметрическая статистика. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1976. 292 с.
8. Кошкин Г. М., Пивен И. Г. Непараметрическая идентификация стохастических объектов. Хабаровск : РАН Дальневосточное отделение, 2009. 336 с.
9. Медведев А. В. Н-модели для безынерционных систем с запаздыванием // Вестник СибГАУ. 2012. № 5 (45). С. 84–89.
10. Medvedev A. V., Mihov E. D., Nepomnyashchiy O. V. Mathematical modeling of N-processes // Журнал Сибирского федерального ун-та. Сер. «Математика и физика». 2016. Т. 9, № 3. С. 338–346.
11. Медведев А. В., Ярещенко Д. И. Непараметрические алгоритмы идентификации и управления многомерными безынерционными процессами // Вестник Томского гос. ун-та. Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. № 53. С. 72–81.
12. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. К-модели // Вестник СибГАУ. 2011. № 3 (36). С. 57–62.
13. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М. : Наука, 1968. 399 с.
14. Терешина А. В., Ярещенко Д. И. О непараметрическом моделировании безынерционных систем с запаздыванием // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 3. С. 452–461.

15. Хардле В. Прикладная непараметрическая регрессия. М. : Мир, 1993. 349 с.
16. Надарая Э. А. Замечания о непараметрических оценках плотности вероятности и кривой регрессии // Теория вероятностей и ее применение. 1970. Т. 15, вып. 1. С. 139–142.
17. Прогнозная модель процесса каталитической гидродепарафинизации в условиях недостатка априорных сведений / Е. Д. Агафонов, А. В. Медведев, Н. Ф. Орловская и др. // Изв. ТулГУ. 2018. № 9. С. 456–468.

References

1. Medvedev A. V. *Osnovy teorii neparametricheskikh sistem* [Fundamentals of the theory of non-parametric systems]. Krasnoyarsk, SibGU im. M. F. Reshetneva Publ., 2018, 732 p.
2. Vasil'ev V. A., Dobrovidov A. V., Koshkin G. M. *Neparametricheskoe otsenivanie funktsionalov ot raspredeleniy statsionarnykh posledovatel'nostey* [Nonparametric Estimation of Functionals of Distributions of Stationary Sequences]. Moscow, Nauka Publ., 2004, 508 p.
3. Pupkov K. A., Egupov N. D. *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya: v 5 t. T. 1: Matematicheskie modeli, dinamicheskie kharakteristiki i analiz sistem upravleniya* [Methods of classical and modern theory of automatic control: in 5 vol. Vol. 1: Mathematical models, dynamic characteristics and analysis of control systems]. Moscow, MGTU im. N. E. Baumana Publ., 2004. 748 p.
4. Pupkov K. A., Egupov N. D. *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya: v 5 t. T. 2: Statisticheskaya dinamika i identifikatsiya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of classical and modern theory of automatic control: in 5 vol. Vol. 2: Statistical dynamics and identification of automatic control systems]. Moscow, MGTU im. N. E. Baumana Publ., 2004. 640 p.
5. Rozenblatt M. Remarks on some nonparametric estimates of density function. *Ann. Math. Statist.* 1956, Vol. 27, P. 832–837.
6. Parzen E. On estimation of probability density function and mode. *Ann. Math. Statist.* 1962, Vol. 33, No. 3, P. 1065–1076.
7. Tarasenko F. P. *Neparametricheskaya statistika* [Nonparametric statistics]. Tomsk, Izd-vo Tom. un-ta Publ., 1976, 292 p.
8. Koshkin G. M., Piven I. G. *Neparametricheskaya identifikatsiya stokhasticheskikh ob'ektov* [Nonparametric identification of stochastic objects]. Khabarovsk, RAN Dal'nevostochnoe otdelenie Publ., 2009, 336 p.
9. Medvedev A. V. [H-models for inertialess lag systems]. *Vestnik SibGAU.* 2012, No. 5, P. 84–89 (In Russ.).
10. Medvedev A. V., Mihov E. D., Nepomnyashchii O. V. [Mathematical modeling of H-processes]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Ser. Matematika i fizika.* 2016, Vol. 9, No. 3, P. 338–346 (In Russ.).
11. Medvedev A. V., Yareshchenko D. I. [Nonparametric algorithms for identification and control of multidimensional inertialess processes]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika.* 2020, No. 53, P. 72–81 (In Russ.).
12. Medvedev A. V. [Theory of nonparametric systems. K-models]. *Vestnik SibGAU.* 2011, No. 3, P. 57–62 (In Russ.).
13. Tsyppkin Ya. Z. *Adaptatsiya i obuchenie v avtomaticheskikh sistemakh* [Adaptation and training in automatic systems]. Moscow, Nauka Publ., 1968, 399 p.
14. Tereshina A. V., Yareshchenko D. I. [On nonparametric modeling of inertialess systems with delay]. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii.* 2018, Vol. 19, No. 3, P. 452–461 (In Russ.).

15. Khardle V. *Prikladnaya neparametricheskaya regressiya* [Applied nonparametric regression]. Moscow, Mir Publ., 1993, 349 p.
16. Nadaraya E. A. [Notes on Nonparametric Probability Density Estimates and Regression Curves]. *Teoriya veroyatnostey i ee primeneniye*. 1970, Vol. 15, No. 1, p. 139–142 (In Russ.).
17. Agafonov E. D., Medvedev A. V., Orlovskaya N. F., Sinyuta V. R., Yareshchenko D. I. [Predictive model of the catalytic hydrodewaxing process under conditions of a lack of a priori information]. *Izv. TulGU*. 2018, No. 9, P. 456–468 (In Russ.).

© Ликсонова Д. И., Раскина А. В., 2021

Ликсонова Дарья Игоревна – кандидат технических наук, доцент базовой кафедры интеллектуальных систем управления Института космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: LiksonovaDI@yandex.ru.

Раскина Анастасия Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем Института космических и информационных технологий; Сибирский федеральный университет. E-mail: raskina.1012@gmail.com.

Liksonova Darya Igorevna – Cand. Sc., docent of the department Intelligent Control Systems of the Institute of Space and Information Technologies; Siberian Federal University. E-mail: LiksonovaDI@yandex.ru.

Raskina Anastasia Vladimirovna – Cand. Sc., docent of Department of Information Systems of the Institute of Space and Information Technologies; Siberian Federal University. E-mail: raskina.1012@yandex.ru.

УДК 629.78

Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-613-623

Для цитирования: Максютин А. С., Мурыгин А. В., Ивленков Д. В., Дымов Д. В. Разработка рабочего места и алгоритмов тестирования бортового оборудования SpaceWire // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 4. С. 613–623. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-613-623.

For citation: Maksyutin A. S., Murugin A. V., Ivlenkov D. V., Dymov D. V. Development of workspace and algorithms for testing SpaceWire onboard equipment. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 4, P. 613–623. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-613-623.

Разработка рабочего места и алгоритмов тестирования бортового оборудования SpaceWire

А. С. Максютин^{1,2*}, А. В. Мурыгин², Д. В. Ивленков¹, Д. В. ДЫМОВ¹

¹АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, 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

*E-mail: Ellis1998@yandex.ru

В зарубежной космической отрасли на протяжении долгого времени используется одна из наиболее передовых и активно развивающихся технологий передачи информации на борту космического аппарата – SpaceWire. Данная технология обеспечивает высокоскоростную передачу больших объемов информации, создание единой инфраструктуры высокоскоростной обработки данных для соединения датчиков, элементов системы обработки данных и блоков массовой памяти. В России SpaceWire постепенно внедряется и используется на перспективных космических аппаратах. Для проверки соответствия бортовой аппаратуры таких аппаратов требованиям стандарта SpaceWire ECSS-E-ST-50-12C Rev.1 существует необходимость в разработке рабочего места, описанного в данной статье. Рабочее место предназначено для того, чтобы к нему можно было подключить бортовое оборудование SpaceWire и запустить тесты, проверяющие определенные параметры информационного обмена, регламентируемые стандартом. В статье представлена общая структура рабочего места, а также описание каждого из его элементов в отдельности вместе с изложением их функционала. Также в статье описаны разработанные алгоритмы тестирования. Среди них можно выделить проверку на соответствие коэффициенту битовых ошибок требуемому значению, проверку поддержки метода удаления заголовка коммутаторами SpaceWire, а также проверку на соответствие требованиям к транспортным протоколам RMAP и СТП-ИСС. Алгоритмы данных тестов представлены в виде блок-схем и подробного текстового описания. Сами тесты реализованы в виде программного кода на языке С. В качестве подтверждения корректности работы разработанных тестов было проведено практическое тестирование устройств SpaceWire, среди которых можно выделить две платы полезной нагрузки для космического аппарата «НОРБИ», а также сверхбольшую интегральную схему I931KX014 программируемого коммутатора для сетей SpaceWire. Приведено краткое описание используемых в работе устройств тестирования в виде изложения их функционала, применимого к разрабатываемому рабочему месту тестирования.

Ключевые слова: бортовая аппаратура, космические аппараты, стенды тестирования, алгоритмы тестирования, SpaceWire.

Development of workspace and algorithms for testing SpaceWire onboard equipment

A. S. Maksyutin^{1,2*}, A. V. Myrygin², D. V. Ivlenkov¹, D. V. Dymov¹

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, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: Ellis1998@yandex.ru

For a long time, the foreign space industry has been using one of the most advanced and actively developing technologies for transmitting information on board a spacecraft – SpaceWire. This technology provides high-speed transmission of large amounts of information, creation of a unified infrastructure for high-speed data processing to connect sensors, data processing system elements and mass memory blocks. In Russia, SpaceWire is gradually being introduced and used on promising spacecraft. To verify the compliance of the onboard equipment of such devices with the requirements of the SpaceWire ECSS-E-ST-50-12C Rev.1 standard, there is a need to develop a workplace described in this article. The workplace is designed so that SpaceWire onboard equipment can be connected to it and tests can be run that check certain parameters of information exchange regulated by the standard. The article presents the general structure of the workplace, as well as a description of each of its elements separately, together with a description of their functionality. The article also describes the developed testing algorithms. Among them, it is possible to distinguish a check for the compliance of the bit error coefficient with the required value, a check for the support of the header removal method by SpaceWire switches, as well as a check for compliance with the requirements for the RMAP and STP-ISS transport protocols. The algorithms of these tests are presented in the form of flowcharts and a detailed text description. The tests themselves are implemented in the form of program code in the C language. As a confirmation of the correctness of the developed tests, practical testing of SpaceWire devices was carried out, among which two payload boards for the NORBY spacecraft can be distinguished, as well as an ultra-large integrated circuit 1931KH014 of a programmable switch for SpaceWire networks. A brief description of the testing devices used in the work is given in the form of a presentation of their functionality applicable to the testing workplace being developed.

Keywords: onboard equipment, spacecraft, test stands, testing algorithms, SpaceWire.

Введение

Унификация используемых компьютерных интерфейсов на протяжении долгого времени являлась проблемой при проектировании космических аппаратов (КА). Для отечественных КА значимым в унификации бортовых интерфейсов стало внедрение мультиплексного канала информационного обмена (МКИО) на основе зарубежного стандарта MIL-STD-1553B. На его основе были выпущены две версии отечественных стандартов: ГОСТ 26765.52–87 и заменивший его ГОСТ Р 52070–2003 [1], который до сих пор служит фундаментом унификации бортовых интерфейсов КА. При этом сохранились потребности в увеличении скорости передачи и обработки информации, снижении энергопотребления, массы и стоимости космической техники, для чего требуется внедрение новых технологий передачи информации на основе достижений современной микроэлектроники.

Целенаправленную попытку изменить данную ситуацию предприняло Европейское космическое агентство (European space agency (ESA)). Европейской ассоциацией по стандартизации в области космической техники (European Cooperation for Space Standartization (ECSS)), рабо-

тающей в рамках европейской космической программы, в 2003 году была принята первая версия стандарта SpaceWire – «Соединения, узлы, маршрутизаторы и сети». В 2009 г. был принят действующий стандарт SpaceWire ECSS-E-ST-50-12C Rev.1, основанный на стандартах IEEE 1355-1995, TIA/EIA-644 и IEEE Standard 1596.3-1996 [2].

Разработка рабочего места

Неотъемлемой частью научно-технической деятельности в современном мире становятся технологии аппаратного и программного моделирования. Проведение экспериментальных исследований сложных технических систем, как правило, связано с экономическими и технологическими трудностями. В этой связи увеличивается роль специализированных инструментов, позволяющих моделировать технические системы до их изготовления и в дальнейшем использовать построенные модели при разработке и эксплуатации оборудования [3].

На сегодняшний день технология SpaceWire широко используется в космической отрасли всеми крупными космическими агентствами и применяется во многих текущих космических миссиях ESA, NASA и JAXA [4]. В связи с этим возникает вопрос о том, как тестировать оборудование, поддерживающее данную технологию. Сейчас в России не выявлено комплексного решения данной проблемы. В связи с этим была начата разработка стенда комплексного тестирования бортовых сетей SpaceWire.

Стенд представляет собой комплекс, который отрабатывает аспекты, связанные с построением бортовой сети, а также проверяет отдельные приборы на соответствие стандарту SpaceWire ECSS-E-ST-50-12C Rev.1, а также стандартам транспортных протоколов RMAP ECSS-E-ST-50-52C [5] и СТП-ИСС [6]. Он состоит из нескольких модулей. Модульная структура дает возможность дальнейшей реконфигурации стенда в зависимости от решаемой задачи. Первый модуль этого стенда (рабочее место) описывается в данной статье.

На рабочее место тестирования бортовой аппаратуры возложена задача отработки аспектов на уровне прибора. Оборудование модуля должно обеспечивать передачу данных между двумя устройствами, реализуя простейшую сеть. Следовательно, в модуле может быть использовано два узла бортовой аппаратуры, подлежащих тестированию. Один из таких объектов тестирования может быть заменен имитатором.

Управление передачей данных осуществляется при помощи внешнего программно-вычислительного модуля (ПВМ-1), представляющего собой персональный компьютер (ПК) со специальным программным обеспечением (СПО-1). Данное СПО-1 представляет собой написанную на языке программирования С программу. Данная программа позволяет протестировать соответствие коэффициента битовых ошибок (BER) требуемому значению, проверку поддержки коммутаторами метода удаления заголовка, поддержку механизмов, регламентируемых транспортными протоколами RMAP и СТП-ИСС. В модуле будет присутствовать тестер «Тип-1», который позволяет производить соответствующие специфике модуля проверки. Для рассмотренных проверок таким тестером является 4Links Diagnostic SpaceWire Interface. Данное устройство позволяет передавать, получать и обрабатывать пакеты данных, управлять параметрами соединения, записывать информацию о прошедших операциях [7].

В качестве технологического оборудования в модуле используется маршрутизатор предназначенный для соединения 4Links Diagnostic SpaceWire Interface с объектами тестирования, а также чтобы в дальнейшем данный модуль мог соединяться с другими модулями реализуемого стенда с последующей организацией различных топологий сети.

Структура блока рабочего места (РМ) тестирования бортовой аппаратуры (БА) приведена на рис. 1.

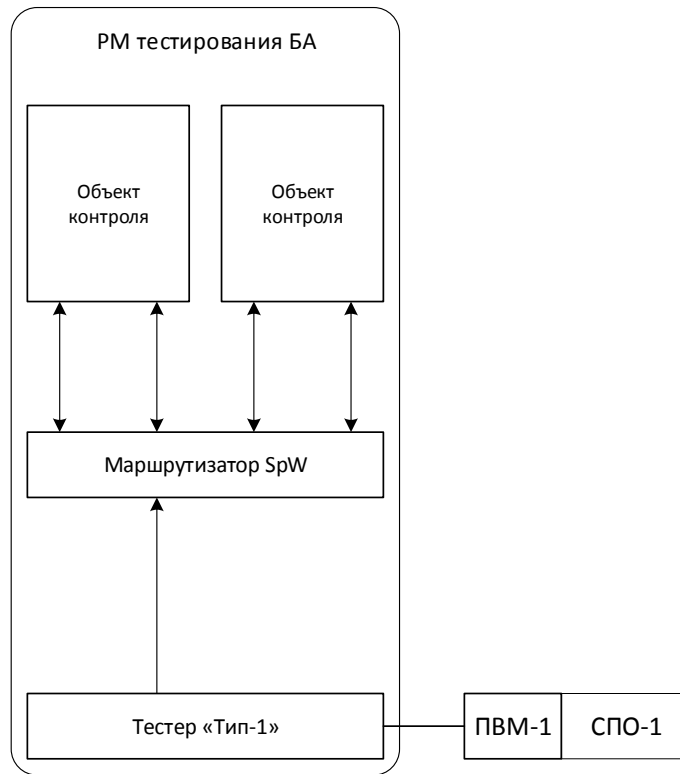


Рис. 1. Структура блока рабочего места тестирования бортовой аппаратуры

Fig. 1. Structure of the on-board equipment testing workplace unit

Алгоритмы тестирования

Для РМ БА были разработаны алгоритмы тестирования, часть из которых реализована в виде СПО-1. Далее каждый из них описывается более подробно:

1. Одним из тестов на символьном уровне является проверка на соответствие BER, равному 10^{-12} для скорости в 100 Мбит/с [8]. Поэтому был разработан следующий алгоритм тестирования.

Перед началом тестирования необходимо подключить первый порт тестируемого узла к первому порту тестирующего устройства.

На начальном этапе происходит установка линка между приемником и передатчиком. После успешного соединения происходит формирование массива данных из заранее определенного количества пакетов определенной длины, а затем их отправка. После того, как пакет приходит на приемник, он побитово сравнивается с ожидаемым пакетом (в коде приемника заранее прописаны ожидаемые пакеты). Происходит увеличение переменной, являющейся счетчиком искаженных битов. Когда передан последний пакет, происходит расчет BER как отношение искаженно принятых битов к их общему количеству. Данное число сравнивается с требуемым, и по этому результату выводится сообщение о соответствии оборудования требованиям по BER или не соответствии. Блок-схема данного алгоритма тестирования представлена на рис. 2.

2. На сетевом уровне в качестве одного из тестов происходит проверка поддержки коммутаторами SpaceWige метода удаления заголовка. При осуществлении данного метода заголовки пакетов, включающие в себя адрес узла назначения, отбрасываются при прохождении через порт коммутатора.

Перед началом тестирования необходимо подключить первый порт коммутатора к первому порту тестирующего устройства. Для оставшихся портов для передачи коммутатора использовать loopback кабели [9].

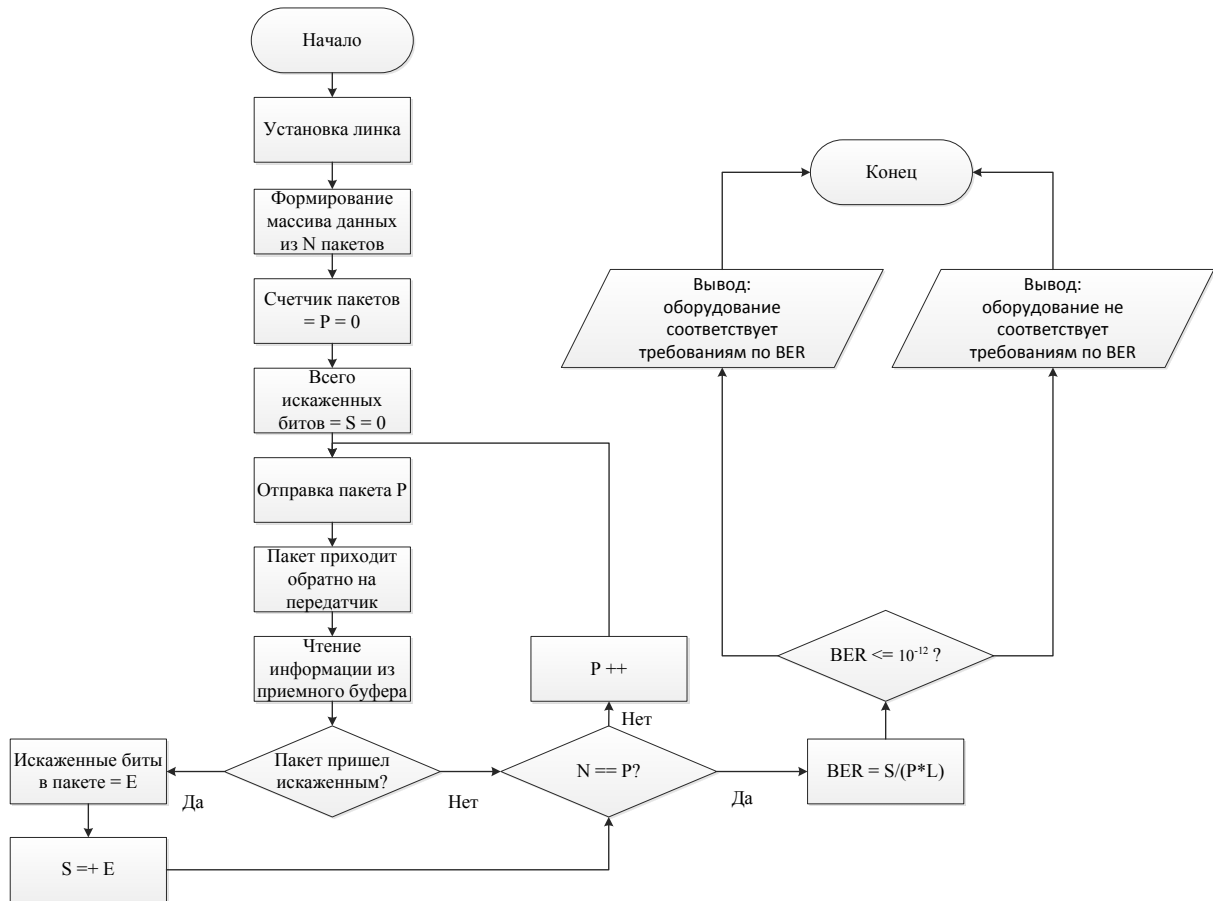


Рис. 2. Блок-схема алгоритма тестирования коэффициента битовых ошибок

Fig. 2. Block diagram of the bit error rate testing algorithm

Устанавливается соединение. После этого формируется фиксированный пакет данных с указанием путевого адреса, который указывает на все задействованные порты коммутатора без повторений. Далее пакет посылается на коммутатор, с которого после прохождения через все порты должен приходиться обратно. В зависимости от того, пришел пакет обратно или нет, выводится соответствующее сообщение. Блок-схема алгоритма тестирования метода удаления заголовка коммутатора приведена на рис. 3.

Данный тест является первым тестом для сетевого уровня стандарта SpaceWire ECSS-E-ST-50-12C Rev.1. На его основе разрабатывается проверка путевой и логической адресации. При использовании путевой адресации адрес назначения определяется как последовательность номеров выходных портов маршрутизатора, которые используются для ориентации пакета в сети [10]. При логической адресации каждый узел назначения имеет уникальный номер или логический адрес, связанный с ним [11]. Также запланирована разработка алгоритма тестирования принципа «червячной маршрутизации» [12].

3. На транспортном уровне для проверки поддержки тестируемого оборудования заданных механизмов протокола СТП-ИСС разработаны алгоритмы тестов:

- отправка трех типов сообщений (КУ, обычное, срочное);
- прием пакета максимального размера;
- прием/ отправка пакета подтверждения.

В качестве примера предлагается рассмотреть отправку сообщения и прием пакета подтверждения тестируемым устройством. Данные алгоритмы можно реализовать в рамках одного теста.

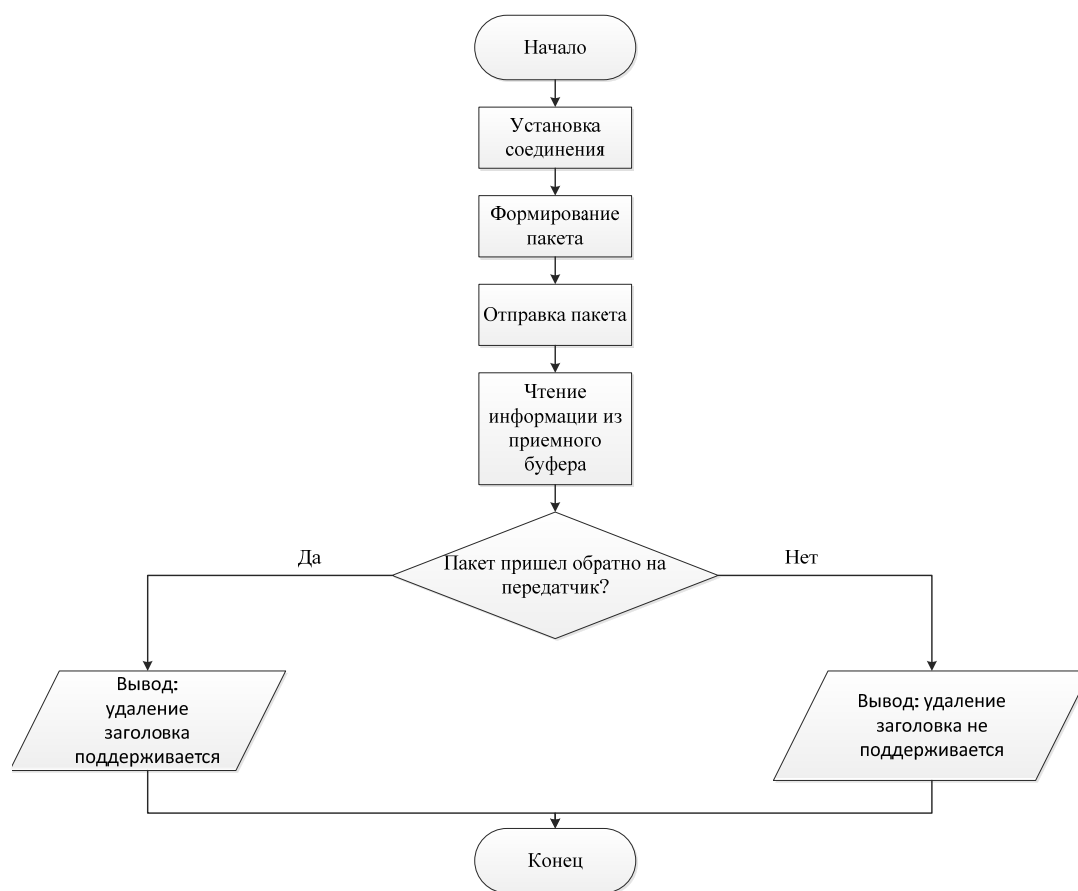


Рис. 3. Блок-схема алгоритма тестирования метода удаления заголовка

Fig. 3. Block diagram of the algorithm for testing the header removal method

Управляющее устройство посредством ПО организует передачу информации между двумя узлами, один из которых будет являться тестируемым оборудованием. В одном случае данное оборудование будет являться передатчиком, в другом – приемником. Это можно реализовать, так как узлы могут работать в полнодуплексном режиме [13]. В данной статье в качестве примера рассматривается случай, при котором тестируемое устройство является передатчиком.

На начальном этапе происходит установка соединения между передатчиком и приемником. Далее выводится сообщение о выборе теста, который пользователь желает запустить, – отправка команды управления (КУ), срочного сообщения или обычного сообщения. Пользователь производит соответствующий выбор. Подробно один из блоков тестирования будет рассмотрен далее. После прохождения одного из этих тестов выводится сообщение с предложением завершения всего теста. Пользователь может продолжить тестирование, выбрав вариант «нет», в случае чего он будет отослан к этапу выбора теста команды. В противном случае тестирование завершается. Блок-схема данного алгоритма тестирования представлена на рис. 4.

В качестве примера рассматривается алгоритм 1 (КУ). Блок-схема для КУ и информационных пакетов будет являться идентичной. Управляющим устройством на передатчике формируется фиксированный пакет КУ (с установленным в 1 битом ответа). Запускается передача. Параллельно этому на приемнике запускается сторожевой таймер. Приемник ожидает пакет. КУ должна передаваться на приемник. Если же передача пакетов не происходит, то на приемнике истекает сторожевой таймер. При истечении таймера на экран выводится сообщение о том,

что оборудование не поддерживает передачу пакетов КУ. Тест завершается. Если КУ получена приемником, то формируется и отправляется пакет подтверждения. В случае если пакет подтверждения получен передатчиком, то выводится соответствующее сообщение об успешном прохождении теста. В противном случае выводится сообщение о неудаче. После этого тест завершается. Блок-схема теста отправки КУ и получения пакета подтверждения согласно транспортному протоколу СТП-ИСС представлена на рис. 5.

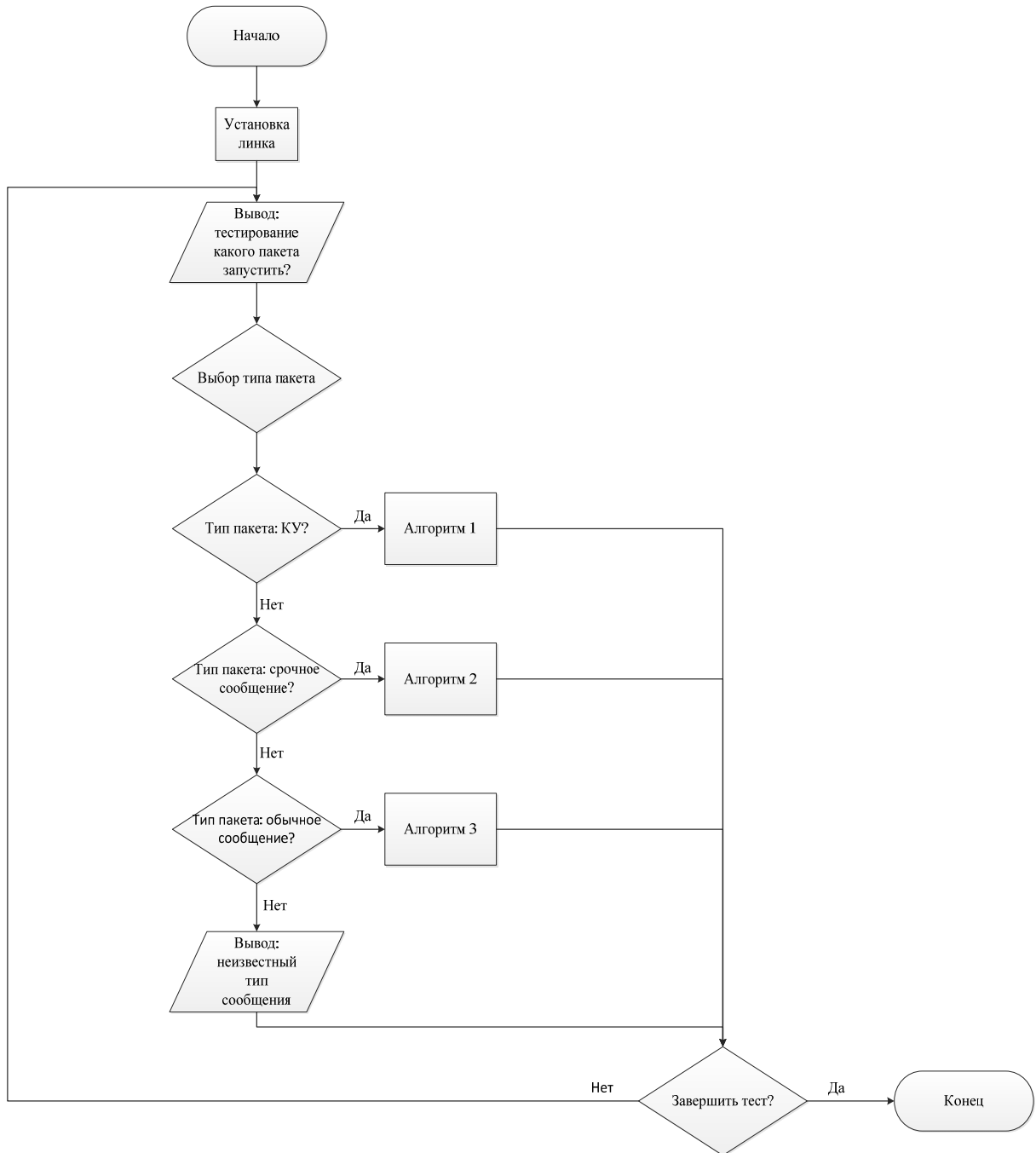


Рис. 4. Блок-схема общего алгоритма тестирования поддержки транспортного протокола СТП-ИСС

Fig. 4. Block diagram of the general algorithm for testing support or the STP-ISS transport protocol

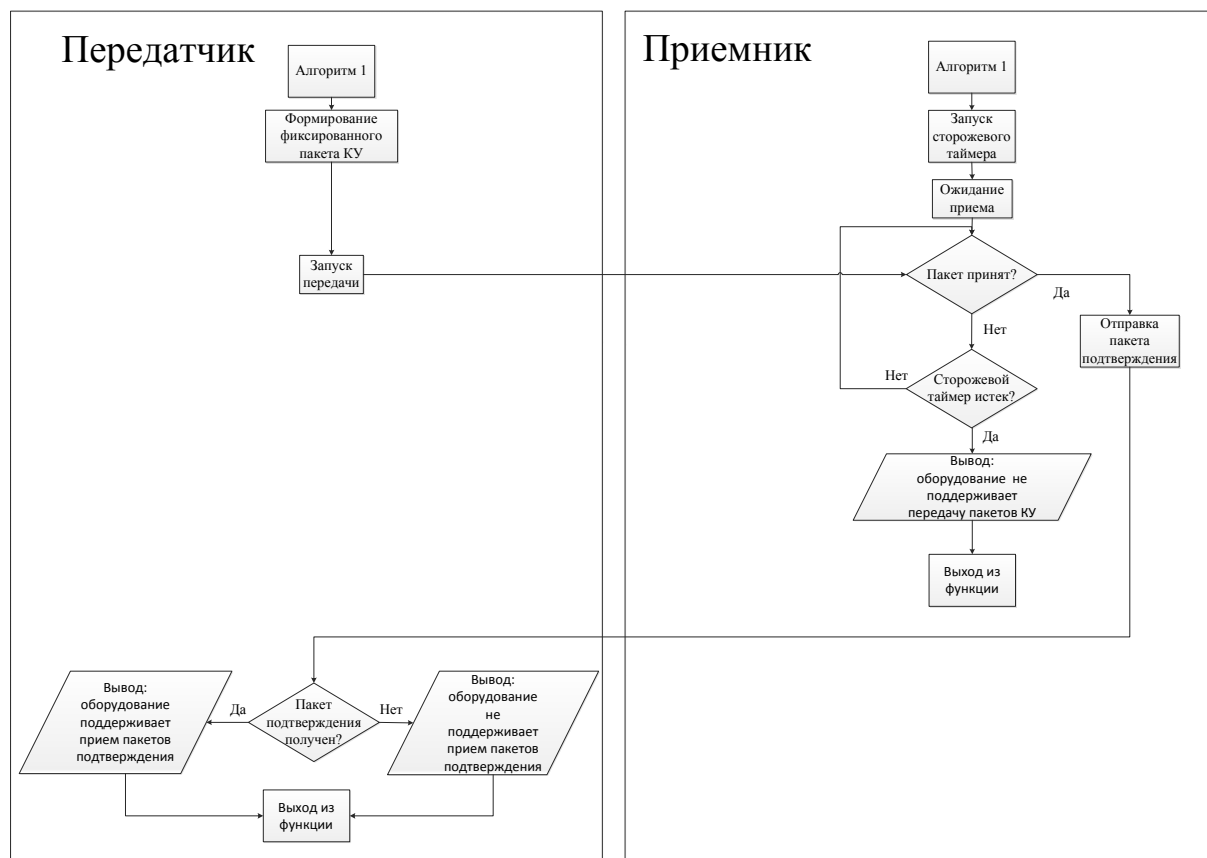


Рис. 5. Блок-схема теста отправки КУ и получения пакета подтверждения согласно транспортному протоколу СТП-ИСС

Fig. 5. Block diagram of the test of sending the control command and receiving the confirmation packet according to the STP-ISS transport protocol

Для транспортного протокола RMAP были разработаны аналогичные СТП-ИСС алгоритмы тестирования, однако они не были реализованы программно. В связи с этим данные тесты не выносятся на обозрение в рамках данной статьи.

Практическое тестирование

Вышеописанные тесты были опробованы на реальном оборудовании SpaceWire. Для теста поддержки метода удаления заголовка была использована сверхбольшая интегральная схема 1931KX014 программируемого коммутатора для сетей SpaceWire [14]. Так, в ходе тестирования было выявлено, что данный коммутатор поддерживает данный метод.

Для теста соответствия оборудования требованиям по BER (10^{-12} для скорости в 100 Мбит/сек) были использованы две платы полезной нагрузки для КА «НОРБИ» [15]. Для данного оборудования BER не превысил требуемых пределов.

Для теста поддержки бортовым оборудованием транспортного протокола СТП-ИСС были также использованы две платы полезной нагрузки для КА «НОРБИ». Данное оборудование успешно прошло все ранее рассмотренные тесты (отправка трех типов сообщений (КУ, обычное, срочное), прием пакета максимального размера, прием/отправка пакета подтверждения).

Заключение

В ходе работы над данным проектом была разработана общая структура рабочего места тестирования БА КА и представлен его функционал. Разработано несколько алгоритмов тестиро-

вания, реализованных впоследствии на языке программирования С. Произведено опробование разработанных алгоритмов на оборудовании SpaceWire. В дальнейшем будут решаться следующие задачи:

- программная реализация алгоритмов тестирования для проверки соответствия оборудования требованиям стандарта транспортного протокола RMAP;
- разработка алгоритмов тестирования для расширения функционала рабочего места;
- добавление новых модулей стенда тестирования для имитации бортовой сети КА.

Библиографические ссылки

1. ГОСТ Р 52070–2003. Интерфейс магистральной последовательной системы электронных модулей. М. : Изд. стандартов, 2003. 3 с.
2. Горбунов С. Ф., Гришин В. Ю., Еремеев П. М. Сетевые интерфейсы космических аппаратов: перспективы развития и проблемы внедрения // Наноиндустрия. 2019. № 89. С. 128–130.
3. Ноженкова Л. Ф., Исаева О. С., Грузенко Е. А. Метод системного моделирования бортовой аппаратуры космического аппарата // Вычислительные технологии. 2015. № 3. С. 33–45.
4. Parkes S., Armbruster P. SpaceWire: A spacecraft onboard network for real-time communications [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/4196676_SpaceWire_A_spacecraft_onboard_network_for_real-time_communications (дата обращения: 15.07.2021).
5. ECSS-E-50-11 Draft F. Remote memory access protocol (normative) [Электронный ресурс]. URL: <http://spacewire.esa.int/content/Standard/documents/SpaceWire%20RMAP%20Protocol%20Draft%20F%204th%20Dec%202006.pdf> (дата обращения: 20.07.2021).
6. Разработка, анализ и проектирование транспортного протокола СТП-ИСС для бортовых космических сетей SpaceWire / Шейнин Ю. Е., Оленев В. Л., Лавровская И. Я. и др. // Изв. самарского науч. центра рос. акад. наук. 2014. № 6–2. С. 632–639.
7. User manual for the 4Links Diagnostic SpaceWire Interface [Электронный ресурс]. URL: https://4links.co.uk/application/files/2615/9136/0012/User_Manual_DSI.pdf (дата обращения: 04.09.2021).
8. Особенности измерения параметров каналов с цифровой модуляцией [Электронный ресурс]. URL: <https://media-sputnik.net/osobennosti-izmereniya-parametrov-kanalov-s-cifrovoy-modulyacziej-3> (дата обращения: 12.09.2021).
9. Введение петлевого кабеля [Электронный ресурс]. URL: <http://ru.fibresplitter.com/news/introduction-of-loopback-cable-24290794.html> (дата обращения: 20.09.2021).
10. Российские IP-ядра стандарта SpaceWire [Электронный ресурс]. URL: <https://kit-e.ru/fpga/rossijskie-ip-yadra-standarta-spacewire-2/> (дата обращения: 25.09.2021).
11. Логическая адресация [Электронный ресурс]. URL: <http://osnovy-setei.ru/logicheskaya-adresaciya.html> (дата обращения: 01.10.2021).
12. Солохина Т., Петричкович Я., Шейнин Ю. Технология SpaceWire для параллельных систем и бортовых распределительных комплексов // Электроника: наука, технология, бизнес. 2007. № 1. С. 38–49.
13. Различия между полнодуплексным и полудуплексным режимами связи [Электронный ресурс]. URL: <https://itigic.com/ru/differences-between-full-duplex-and-half-duplex/> (дата обращения: 29.10.2021).
14. Руководство по эксплуатации ДВУК.431433.061-003РЭ1. Схемы интегральные 1931КХ014. 2020.
15. Программируемые логические интегральные схемы – ПЛИС [Электронный ресурс]. URL: <https://digteh.ru/digital/PLD/> (дата обращения: 06.11.2021).

References

1. *GOST R 52070–2003. Interfejs magistral'nyj posledovatel'nyj sistemy jelektronnyh modulej* [State Standard R 52070–2003. The interface is a backbone serial system of electronic modules]. Moscow, Standardinform, 2003. 3 p.
2. Gorbunov S. F., Grishin V. Yu., Ereemeev P. M. [Network interfaces of spacecraft: prospects of development and problems of implementation]. *Nanoindustriya*. 2019, No. 89, P. 128–130 (In Russ.).
3. Nozhenkova L. F., Isaeva O. S., Gruzenko E. A. [Method of system modeling of onboard spacecraft equipment]. *Computing technologies*. 2015, No. 3, P. 33–45 (In Russ.).
4. Parkes S., Armbruster P. SpaceWire: A spacecraft onboard network for real-time communications. Available at: https://www.researchgate.net/publication/4196676_SpaceWire_A_spacecraft_onboard_network_for_real-time_communications (accessed: 15.07.2021).
5. ECSS-E-50-11 Draft F. Remote memory access protocol (normative). Available at: <http://spacewire.esa.int/content/Standard/documents/SpaceWire%20RMAP%20Protocol%20Draft%20F%204th%20Dec%202006.pdf> (accessed: 20.07.2021).
6. Sheinin Yu. E., Olenev V. L., Lavrovskaya I. Ya. et al. [Development, analysis and design of the STP-ISS transport protocol for SpaceWire onboard space networks]. *Izvestiya samarskogo nauchnogo centra rossiysskoy akademii nauk*. 2014, No. 6–2, P. 632–639 (In Russ.).
7. User manual for the 4Links Diagnostic SpaceWire. Interface Available at: https://4links.co.uk/application/files/2615/9136/0012/User_Manual_DSI.pdf (accessed: 04.09.2021).
8. *Osobennosti izmereniya parametrov kanalov s cifrovoy moduljaciej* [Features of measuring the parameters of channels with digital modulation] (In Russ). Available at: <https://media-sputnik.net/osobennosti-izmereniya-parametrov-kanalov-s-cifrovoj-modulyacziej-3> (accessed: 12.09.2021).
9. *Vvedenie petlevogo kabelya* [Introduction of loop cable]. (In Russ). Available at: <http://ru.fibresplitter.com/news/introduction-of-loopback-cable-24290794.html> (accessed: 20.10.2021).
10. *Rossiyskie IP-yadra standarta SpaceWire* [Russian IP cores of the SpaceWire standard]. (In Russ). Available at: <https://kit-e.ru/fpga/rossijskie-ip-yadra-standarta-spacewire-2/> (accessed: 25.09.2021).
11. *Logicheskaya adresaciya* [Logical addressing] (In Russ). Available at: <http://osnovy-setei.ru/logicheskaya-adresaciya.html> (accessed: 01.10.2021).
12. Solokhina T., Petrichkovich Ya., Sheinin Yu. [SpaceWire technology for parallel systems and on-board distribution complexes]. *Jelektronika: nauka, tehnologija, biznes*. 2007, No. 1, P. 38–49. (In Russ.)
13. *Razlichiya mezhdru polnodupleksnym i poludupleksnym rezhimami svyazi* [Differences between full-duplex and half-duplex communication modes] (In Russ.). Available at: <https://itigic.com/ru/differences-between-full-duplex-and-half-duplex/> (accessed: 29.10.2021).
14. *Rukovodstvo po ekspluatacii DVUK.431433.061-003RE1. Skhemy integral'nye 1931KKH014* [Operating manual DVUK.431433.061-003RE1. Integrated circuits 1931KH014]. 2020. (In Russ.).
15. *Programmiruemye logicheskie integral'nye skhemy – PLIS* [Programmable logic integrated circuits – FPGA] (In Russ.). Available at: <https://digteh.ru/digital/PLD/> (accessed: 06.11.2021).

Максютин Андрей Сергеевич – инженер, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»; аспирант кафедры информационно-управляющих систем, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ellis1998@yandex.ru.

Мурыгин Александр Владимирович – доктор технических наук, заведующий кафедрой информационно-управляющих систем; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: avm514@mail.ru.

Ивленьков Денис Викторович – инженер; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: ivlenkovdv@iss-reshetnev.ru.

Дымов Дмитрий Валерьевич – начальник базового центра системного проектирования бортовой аппаратуры космических аппаратов; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: dymov@iss-reshetnev.ru.

Maksyutin Andrey Sergeevich – Engineer, JSC Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”; postgraduate student of the Department of Information and Control Systems, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: ellis1998@yandex.ru.

Murygin Alexander Vladimirovich – Dr. Sc., Head of the Department of Information and Control Systems; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: avm514@mail.ru.

Ivlenkov Denis Viktorovich – Engineer; JSC Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: ivlenkovdv@iss-reshetnev.ru.

Dymov Dmitry Valer'evich – Head of the Basic System Design Center for Onboard Spacecraft Equipment; JSC Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: dymov@iss-reshetnev.ru.

УДК 539.3

Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-624-635

Для цитирования: Матвеев А. Д. Применение фиктивных дискретных моделей с переменными характеристическими размерами в расчетах на прочность композитных тел // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 4. С. 624–635. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-624-635.

For citation: Matveev A. D. Application of fictitious discrete models with variable characteristic dimensions in calculations for the strength of composite bodies. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 4, P. 624–635. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-624-635.

Применение фиктивных дискретных моделей с переменными характеристическими размерами в расчетах на прочность композитных тел

А. Д. Матвеев

Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44
E-mail: mtv241@mail.ru

Для анализа напряженно-деформированного состояния однородных и композитных тел (КТ) эффективно применяется метод многосеточных конечных элементов (ММКЭ), в котором используются многосеточные конечные элементы (МнКЭ). ММКЭ порождает многосеточные дискретные модели малой размерности, в которых неоднородная структура тел учитывается в рамках микроподхода с помощью МнКЭ. Базовые дискретные модели (БМ), учитывающие неоднородную структуру тел, имеют высокую размерность. Для понижения размерности дискретных моделей тел используется ММКЭ. Однако, существуют БМ КТ (например, БМ тел с микронеоднородной структурой), которые имеют такую высокую размерность, что реализация ММКЭ для таких БМ, в силу ограниченности ресурсов ЭВМ, затруднительна. Кроме того, для многосеточных дискретных моделей высокой размерности ММКЭ порождает численно неустойчивые решения, что связано с погрешностью вычислений ЭВМ. Для решения данных проблем здесь предлагается в расчетах использовать фиктивные дискретные модели, особенность которых состоит в том, что их размерности меньше размерностей БМ КТ.

В данной работе предлагается метод фиктивных дискретных моделей (МФДМ) для расчета на статическую прочность упругих композитных тел с неоднородной, микронеоднородной регулярной структурой. МФДМ реализуется с помощью ММКЭ с применением скорректированных условий прочности, которые учитывают погрешность приближенных решений. В основе МФДМ лежит положение, что решения, отвечающие БМ КТ, мало отличаются от точных, т. е. эти решения считаем точными.

Расчет КТ по МФДМ сводится к построению и расчету на прочность фиктивных дискретных моделей (ФМ), которые обладают следующими свойствами. ФМ отражают форму, характерные размеры, крепление, нагружение и вид неоднородной структуры КТ, распределение модулей упругости, отвечающее БМ КТ. Размерности ФМ меньше размерности БМ КТ. Последовательность, состоящая из ФМ, сходится к БМ, т. е. предельная ФМ совпадает с БМ. Как показывают расчеты, сходимость такой последовательности обеспечивает равномерную сходимость максимальных эквивалентных напряжений ФМ к максимальному эквивалентному напряжению БМ КТ, что позволяет применять такие ФМ в расчетах упругих тел на прочность.

Рассматриваются два типа ФМ. Первый тип – масштабированные ФМ, второй – ФМ с переменными характеристическими размерами. В данной работе подробно рассматриваются ФМ второго типа. Расчеты показывают, что реализация ММКЭ для ФМ с одним, двумя или тремя переменными характеристическими размерами приводит к большой экономии ресурсов ЭВМ, что позволяет исполь-

зывать МФДМ для тел с микронеоднородной регулярной структурой. Расчеты на прочность КТ по МФДМ требуют в $10^3 \div 10^7$ раз меньше объема памяти ЭВМ, чем аналогичный расчет с использованием БМ КТ, и не содержат процедуру измельчения БМ. Приведенный пример расчета на прочность трехмерной композитной балки по МФДМ с применением ФМ с тремя переменными характеристическими размерами показывает его высокую эффективность.

Ключевые слова: упругость, композиты, скорректированные условия прочности, фиктивные дискретные модели, многосеточные конечные элементы.

Application of fictitious discrete models with variable characteristic dimensions in calculations for the strength of composite bodies

A. D. Matveev

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

To analyze the stress-strain state of homogeneous and composite bodies (CB), the method of multigrid finite elements (MMFE) is effectively used, which uses multigrid finite elements (MgFE). MMFE generates multigrid discrete models of small dimension, in which the inhomogeneous structure of bodies is taken into account within the framework of a micro-approach using MgFE. Basic discrete models (BM), taking into account the heterogeneous structure of bodies, have a high dimension. To reduce the dimensionality of discrete models of bodies, MMFE is used. However, there are BM CB (for example, BM bodies with a micro-homogeneous structure), which have such a high dimension that the implementation of MMFE for such BM, due to limited computer resources, is difficult. In addition, for multigrid discrete models of high dimension, the MMFE generates numerically unstable solutions, which is associated with the error of computer calculations. To solve these problems, it is proposed here to use fictitious discrete models in calculations, the peculiarity of which is that their dimensions are smaller than the dimensions of BM CB.

In this paper, we propose a method of fictitious discrete models (MFDM) for calculating the static strength of elastic composite bodies with an inhomogeneous, micro-homogeneous molecular structure. MFDM is implemented using MMFE using adjusted strength conditions that take into account the error of approximate solutions. The MFDM is based on the position that the solutions that meet the BM CB differ little from the exact ones, i. e. we consider these solutions to be accurate.

The calculation of CB by MFDM is reduced to the construction and calculation of the strength of fictitious discrete models (FM), which have the following properties. FM reflect: the shape, characteristic dimensions, fastening, loading and type of inhomogeneous structure of the CB, and the distribution of elastic modulus corresponding to BM CB. The dimensions of FM are smaller than the dimensions of BM CB. The sequence consisting of FM converges to BM, i. e. the limiting FM coincides with BM. Calculations show that the convergence of such a sequence ensures uniform convergence of the maximum equivalent stresses of the FM to the maximum equivalent stress of the BM CB, which allows the use of such FM in the calculations of elastic bodies for strength.

Two types of FM are considered. The first type is scaled FM, the second type is FM with variable characteristic sizes. In this paper, the FM of the second type is considered in detail. Calculations show that the implementation of MMFE for FM with one, two or three variable characteristic sizes leads to a large saving of computer resources, which allows the use of MFDM for bodies with a micro-homogeneous regular structure. Calculations for the strength of CB according to MFDM require several times less computer memory than a similar calculation using BM CB, and does not contain a procedure for grinding BM. The

given example of calculating the strength of a three-dimensional composite beam according to MFDM using FM with three variable characteristic dimensions shows its high efficiency.

Keywords: elasticity, composites, adjusted strength conditions, fictitious discrete models, multigrid finite elements.

Введение

Статический расчет на прочность упругой конструкции (тела) V_0 проводится, как правило, по запасам прочности [1–3] и сводится к определению максимального эквивалентного напряжения конструкции. В этом случае для тела V_0 заданные условия прочности имеют вид $n_1 \leq n_0 \leq n_2$, где n_1 , n_2 заданы, n_0 – коэффициент запаса тела V_0 , $n_0 = \sigma_T / \sigma_0$, σ_T – предельное напряжение тела V_0 , σ_0 – максимальное эквивалентное напряжение тела V_0 , отвечающее точному решению задачи упругости, построенному для тела V_0 . Для максимальных эквивалентных напряжений, которые определяются приближенно, используются скорректированные условия прочности [4]. При анализе напряженно-деформированного состояния (НДС) упругих тел эффективно используется метод многосеточных конечных элементов (ММКЭ) [5–11], в котором используются многосеточные конечные элементы (МнКЭ) [5–17]. ММКЭ порождает многосеточные дискретные модели малой размерности, в которых неоднородная структура тел учитывается в рамках микроподхода [18] с помощью МнКЭ. Базовые дискретные модели (БМ) композитных тел (КТ), которые учитывают их неоднородную, микронеоднородную структуру в рамках микроподхода, имеют очень высокую размерность. Для понижения размерностей дискретных моделей очень результативно используется ММКЭ. Однако, например, БМ тел с микронеоднородной регулярной структурой имеют такую высокую размерность, что реализация ММКЭ для таких БМ, в силу ограниченности ресурсов ЭВМ, затруднительна. Кроме того, для многосеточных дискретных моделей высокой размерности ММКЭ порождает численно неустойчивые решения, что связано с погрешностью вычислений ЭВМ. Для решения данных проблем здесь предлагается в расчетах использовать фиктивные дискретные модели, особенность которых состоит в том, что их размерности меньше размерностей БМ КТ. Существующие приближенные подходы и методы расчета КТ имеют сложные формулировки и трудно реализуемы для тел, имеющих сложную неоднородную структуру [19–26].

В данной работе предлагается метод фиктивных дискретных моделей (МФДМ) для расчета на прочность тел с неоднородной, микронеоднородной регулярной структурой. МФДМ реализуется с помощью ММКЭ с применением скорректированных условий прочности, которые учитывают погрешность численных решений. Введем определение для фиктивных дискретных моделей.

Определение. Дискретные модели КТ V будем называть фиктивными моделями (ФМ), если эти ФМ обладают следующими свойствами.

1. Неоднородные структуры ФМ отличаются (не отличаются) от неоднородной структуры БМ КТ V .
2. ФМ отражают: форму, характерные размеры, крепление, нагружение и вид неоднородной структуры КТ V , и распределение модулей упругости, отвечающее БМ КТ V .
3. Последовательность, состоящая из ФМ, сходится к БМ КТ V , т. е. предельная ФМ последовательности совпадает с БМ КТ V .
4. Размерности ФМ меньше размерности БМ КТ V , кроме предельной ФМ, размерность которой равна размерности БМ КТ V .

Здесь рассматриваются два основных типа ФМ. Первый тип – масштабированные ФМ, второй – ФМ с переменными характерными размерами.

В работе [27] в качестве ФМ подробно рассматриваются масштабированные композитные дискретные модели, размерности которых меньше размерности БМ КТ. Предлагаемые ФМ, образованные с помощью масштабированной регулярной ячейки КТ, имеют такие же характерные размеры, форму, крепления и нагружения, как БМ, но неоднородные структуры ФМ отличаются от неоднородной структуры БМ. Масштабированные ФМ отражают вид неоднородной структуры БМ КТ и распределение модулей упругости, отвечающее БМ. Сходимость последовательности масштабированных ФМ обеспечивает равномерную сходимость максимальных эквивалентных напряжений ФМ к максимальному эквивалентному напряжению БМ. Высокая эффективность применения масштабированных ФМ в МФДМ показана на примере расчета на прочность балки с неоднородной регулярной структурой [27].

В данной работе подробно рассматриваются ФМ второго типа. Расчеты показывают, что реализация ММКЭ для ФМ с одним, двумя или тремя переменными характерными размерами приводит к большой экономии ресурсов ЭВМ, что позволяет использовать МФДМ для тел с микронеоднородной регулярной структурой.

Расчет на прочность КТ по МФДМ требует в $10^3 \div 10^7$ раз меньше объема памяти ЭВМ, чем аналогичный расчет с использованием БМ КТ, и не содержит процедуру измельчения БМ. Приведенный пример расчета на прочность трехмерной композитной балки по МФДМ с применением ФМ с тремя переменными характерными размерами показывает его высокую эффективность.

1. Основные положения метода фиктивных дискретных моделей

МФДМ применяется для КТ с регулярной структурой, которые удовлетворяют следующим положениям.

Положение 1. КТ состоят из разномодульных изотропных однородных упругих тел, связи между которыми идеальны, т. е. на общих границах разномодульных изотропных однородных тел функции перемещений и напряжений являются непрерывными.

Положение 2. Перемещения, деформации и напряжения разномодульных изотропных однородных тел отвечают соотношениям трехмерной линейной задачи теории упругости [28].

Положение 3. Приближенные решения, которые отвечают БМ КТ, мало отличаются от точных. Такие приближенные решения будем считать точными. Отметим, что в силу сходимости ММКЭ такие БМ для КТ всегда существуют.

2. Фиктивные дискретные модели с переменными характерными размерами

На практике широко применяются композитные балки и оболочки с постоянным поперечным сечением, которые армированы непрерывными волокнами постоянной толщины. Волокна параллельны оси балки (оболочки).

Не теряя общности суждений, для простоты изложения, суть построения ФМ с одним переменным характерным размером рассмотрим на примере консольной балки, форма постоянного поперечного сечения которой есть симметричный двутавр, состоящий из 3-х прямоугольников (рис. 1). КТ V_0 , расположенное в декартовой прямоугольной системе координат $Oxuz$, при $y = 0$ жестко закреплено, т. е. при $y = 0$ имеем: $u, v, w = 0$. Ось Oy на рис. 1 параллельна оси балки V_0 . КТ V_0 армировано непрерывными волокнами сечением $h \times h$, которые параллельны оси Oy и имеют одинаковые модули упругости. На рис. 2 показано сечение балки, состоящее из 3-х прямоугольников, сечения волокон закрашены.

На рис. 1, 3 a, b – характерные размеры поперечного сечения БМ R_0 КТ V_0 и ФМ R_n, L_0 (L_n) – длина БМ R_0 (ФМ R_n), $L_n \leq L_0$. ФМ R_n имеет такое же крепление (т. е. при $y = 0$ ФМ R_n жестко закреплена) и такой же характер нагружения, как БМ R_0 .

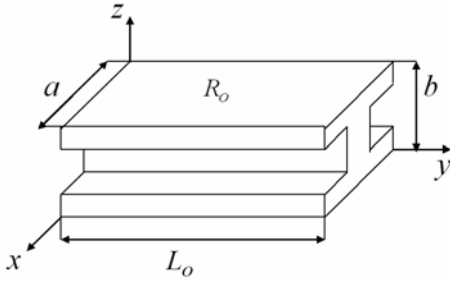


Рис. 1. Балка (КТ) V_0 , БМ R_0

Fig. 1. Beam (CB) V_0 , BM R_0

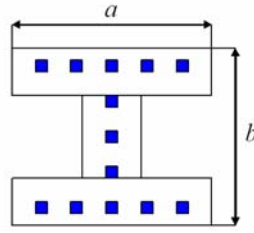


Рис. 2. Сечение КТ V_0

Fig. 2. Section of CB V_0

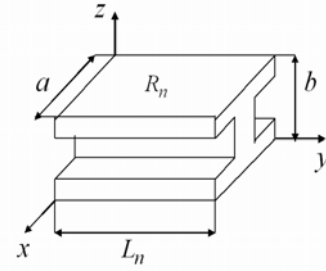


Рис. 3. ФМ R_n балки V_0

Fig. 3. FM R_n beams V_0

ФМ R_n имеет такую же неоднородную структуру, как КТ V_0 , т. е. ФМ R_n армирована непрерывными параллельными оси Oy волокнами сечением $h \times h$ и имеет такой же вид распределения волокон в поперечном сечении, как КТ V_0 (рис. 2). Модули упругости волокон и связующего материала КТ V_0 и ФМ R_n одинаковы. Для простоты изложения пусть

$$h = L_0 / N, \quad (1)$$

где N – целое; N – задано; $N \gg 1$; h – мало.

БМ R_0 КТ V_0 состоит из КЭ V_e 1-го порядка формы куба со стороной h (в которых реализуется трехмерное НДС [28]), учитывает неоднородную структуру и сложную форму КТ V_0 . Пусть БМ R_0 порождает решение, которое мало отличается от точного и которое будем считать точным (полож. 3, п. 1). Неоднородная структура в ФМ R_n , как и в БМ R_0 , учитывается с помощью КЭ V_e 1-го порядка. Учитывая (1), размер L_n ФМ R_n находим по формуле

$$L_n = L_0 n / N = hn, \quad (2)$$

где n – целое, $n = n_0, \dots, N$, n_0 – задано, имеем $L_n \leq L_0$.

Из вышеизложенного, учитывая, что согласно (2) $L_n \rightarrow L_0$ при $n \rightarrow N$, следует, что

$$R_n \rightarrow R_0 \text{ при } n \rightarrow N. \quad (3)$$

При $n = N$ в силу (2), (3) имеем $R_N = R_0$. Тогда из выполнения (3) вытекает

$$\sigma_n \rightarrow \sigma_0 \text{ при } n \rightarrow N, \quad (4)$$

где σ_n (σ_0) – максимальное эквивалентное напряжение ФМ R_n (БМ R_0).

ФМ R_n и БМ R_0 состоят из КЭ V_e 1-го порядка формы куба со стороной h и поперечные сечения этих моделей одинаковы. Значит, сечения ФМ R_n и БМ R_0 имеют одинаковое число узлов, равное N_0 . Тогда общее число узлов M_0 БМ R_0 равно $M_0 = N_0(N + 1)$. Общее число узлов M_n ФМ R_n равно $M_n = N_0(n + 1)$. Отсюда следует, что при $n_0 \leq n < N$ имеем

$$M_n < M_0. \quad (5)$$

При $n = N$ имеем $M_N = M_0$, т. е. $R_N = R_0$. Итак, использование ФМ R_n с переменным размером L_n в расчетах на прочность по МФДМ КТ V_0 в силу (5) приводит к экономии ресурсов ЭВМ. Расчеты показывают наибольшую эффективность МФДМ при использовании в расчетах ФМ с тремя переменными характерными размерами.

3. Результаты численных экспериментов

Рассмотрим модельную задачу расчета на прочность консольной балки V_0 с неоднородной регулярной волокнистой структурой размерами $48h \times 1152h \times 96h$ (рис. 4). Регулярная ячейка G_0 балки размерами $6h \times 6h \times 6h$ на рис. 5 расположена в локальной декартовой системе координат $Oxyz$, волокна сечением $h \times h$ направлены вдоль оси Oy , сечения волокон в плоскости Oxz закрашены, $i, j, k = 1, \dots, 7$.

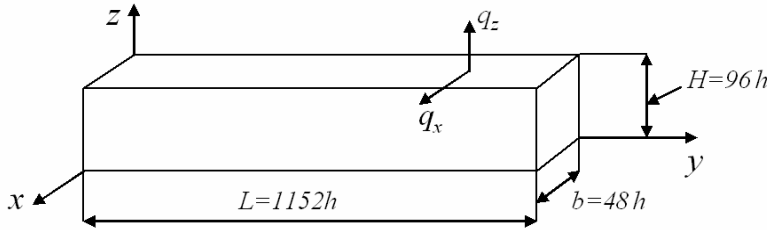


Рис. 4. Размеры балки V_0

Fig. 4. Dimensions of the beam V_0

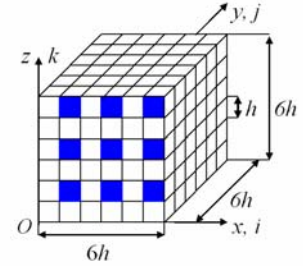


Рис. 5. Регулярная ячейка G_0

Fig. 5. Regular cell G_0

Балка армирована продольными непрерывными волокнами. При $y = 0$ балка жестко закреплена, на поверхности $z = H$ имеет нагружение q_x, q_z . Для коэффициента запаса n_0 балки заданы условия прочности

$$1,8 \leq n_0 \leq 3,4. \quad (6)$$

Для модельной задачи имеем следующие исходные данные:

$$h = 0,2083; \quad \sigma_T = 6; \quad E_c = 1, \quad E_v = 10, \quad \nu_c = \nu_v = 0,3, \quad (7)$$

где E_c, E_v (ν_c, ν_v) – модули Юнга (коэффициенты Пуассона) матрицы и волокна; σ_T – предел текучести волокна, на границе $z = H$; $0,5L \leq y \leq L$ задана нагрузка $q_z = q_x = 0,000375$ (рис. 4).

Базовая модель R_0 КТ V_0 состоит из односеточных конечных элементов (1сКЭ) V_j^h 1-го порядка формы куба со стороной h (в которых реализуется трехмерное НДС [28]), учитывает неоднородную структуру КТ V_0 и порождает равномерную сетку с шагом h размерности $49 \times 1153 \times 97$ с общим числом узловых неизвестных метода конечных элементов (МКЭ) [29; 30], равным $N_0 = 16426368$, ширина ленты системы уравнений (СУ) МКЭ равна $b_0 = 14556$. Считаем, что БМ R_0 КТ V_0 удовлетворяют полож. 3 п. 1. В расчетах используем ФМ R_n с тремя переменными характерными размерами, $b_n \times L_n \times H_n$ (рис. 6), где

$$b_n = 6hn, \quad L_n = 24 \times 6hn, \quad H_n = 2 \times 6hn, \quad (8)$$

т. е. ФМ R_n состоит из регулярных ячеек G_0 , рис. 5, $n = 2, \dots, 8$. При $n < 8$ имеем: $b_n < b$, $L_n < L$, $H_n < H$, при $n = 8$: $b_8 = b$, $L_8 = L$, $H_8 = H$, т. е. характерные размеры ФМ R_8 совпадает с размерами БМ КТ V_0 . Так как ФМ и БМ КТ V_0 представлены одинаковыми конечными элементами (КЭ) (см. п. 2), то $R_8 = R_0$. При $y = 0$ ФМ R_n жестко закреплена, на поверхности $z = H_n$, $0,5L_n \leq y \leq L_n$ имеет нагружение $q_z = q_x = 0,000375$.

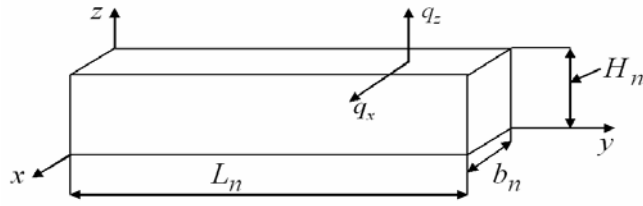


Рис. 6. Переменные характерные размеры ФМ R_n балки V_0
 Fig. 6. Variable characteristic dimensions of the FM R_n beam V_0

В расчетах используем двухсеточный КЭ (2сКЭ) $V_d^{(2)}$, имеющий размеры $6h \times 6h \times 6h$ (рис. 7), т. е. состоящий из одной регулярной ячейки G_0 (рис. 5). На базе модели R_n строим двухсеточную модель R_n^o , которая состоит из 2сКЭ $V_d^{(2)}$.

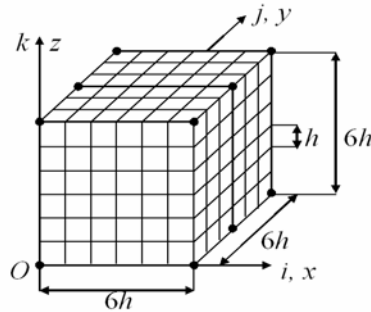


Рис. 7. Мелкая и крупная сетки 2сКЭ $V_d^{(2)}$
 Fig. 7. Small and large grids 2gFE $V_d^{(2)}$

На рис. 7 2сКЭ $V_d^{(2)}$ расположен в локальной декартовой системе координат $Oxyz$. При построении 2сКЭ $V_d^{(2)}$ используем две вложенные сетки: мелкую сетку h_d с шагом h размерности $7 \times 7 \times 7$ и крупную – H_d размерности $2 \times 3 \times 2$. По осям Ox , Oz сетка H_d имеет шаг $6h$, по оси Oy – шаг $3h$. На рис. 7 показаны сетки h_d и H_d , узлы крупной сетки H_d отмечены точками, 12 узлов. 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) и учитывает неоднородную структуру 2сКЭ $V_d^{(2)}$. Процедура построения матрицы жесткости и вектора узловых сил 2сКЭ $V_d^{(2)}$ подробно изложена в работе [27].

Результаты расчетов даны в табл. 1, где σ_n^o – максимальное эквивалентное напряжение модели R_n^o , найденное по 4-й теории прочности, N_n^o и b_n^o – размерность и ширина ленты СУ ММКЭ модели R_n^o , $n = 2, \dots, 7$, относительная погрешность $\delta_n(\%)$ определяется по формуле

$$\delta_n(\%) = 100\% \times |\sigma_n^o - \sigma_{n-1}^o| / \sigma_n^o, \quad n = 2, \dots, 7. \quad (9)$$

Анализ результатов показывает равномерную монотонную сходимость напряжений σ_n^o и погрешностей $\delta_n(\%)$, $n = 2, \dots, 7$.

Таблица 1

Результаты расчетов для моделей $R_2^o - R_7^o$

n	R_n^o	σ_n^o	$\delta_n(\%)$	N_n^o	b_n^o	n	R_n^o	σ_n^o	$\delta_n(\%)$	N_n^o	b_n^o
2	R_2^o	1,801	–	4320	105	5	R_5^o	2,373	7,33	47520	420
3	R_3^o	1,993	9,61	12096	186	6	R_6^o	2,525	6,03	78624	573
4	R_4^o	2,199	9,36	25920	291	7	R_7^o	2,661	5,12	120960	751

Так как $R_8 = R_0$, то напряжение σ_8^o ФМ R_8^o , равное $\sigma_8^o = 2,785$, считаем точным решением, т. е. $\sigma_0 = 2,785$ (см. п. 2, полож. 3 п. 1). В расчетах на прочность упругих тел по МФДМ используются скорректированные условия прочности (учитывающие погрешность приближенных решений), которые представлены в следующей теореме.

Теорема. Пусть для коэффициента запаса n_0 упругого тела V_0 заданы условия прочности

$$n_1 \leq n_0 \leq n_2, \quad (10)$$

где n_1, n_2 – заданы, $n_1 > 1$; $n_0 = \sigma_T / \sigma_0$, σ_T – предельное напряжение тела V_0 ; σ_0 – максимальное эквивалентное напряжение тела V_0 , которое отвечает точному решению задачи теории упругости, построенному для тела V_0 .

Пусть коэффициент запаса n_b тела V_0 , отвечающий приближенному решению задачи теории упругости, удовлетворяет скорректированным условиям прочности

$$\frac{n_1}{1 - \delta_\alpha} \leq n_b \leq \frac{n_2}{1 + \delta_\alpha}. \quad (11)$$

Тогда коэффициент запаса n_0 тела V_0 , отвечающий точному решению задачи теории упругости, удовлетворяет заданным условиям прочности (10), где $n_b = \sigma_T / \sigma_b$, σ_b – максимальное эквивалентное напряжение тела V_0 , отвечающее приближенному решению задачи теории упругости, построенному для тела V_0 , и найденное с такой погрешностью δ_b , что

$$|\delta_b| \leq \delta_\alpha < C_\alpha = \frac{n_2 - n_1}{n_1 + n_2}, \quad (12)$$

где δ_α – верхняя оценка относительной погрешности δ_b , δ_α – задано, погрешность δ_b для напряжения σ_b определяется по формуле $\delta_b = (\sigma_0 - \sigma_b) / \sigma_0$.

Отметим, что если тело V_0 состоит из пластичных материалов, то σ_T – предел текучести. Из (12) следует, что если $n_2 - n_1$ мало, то σ_b необходимо определять с малой погрешностью δ_b .

Доказательство теоремы изложено в работе [4].

Для заданных $n_1 = 1,8$ и $n_2 = 3,4$ согласно (12) имеем $C_\alpha = 0,31$. Расчеты показывают, что если $\delta_n(\%) \leq 10\%$, то погрешность напряжения σ_n^o модели R_n^o не более 15%. Напряжения $\sigma_6^o = 2,525$ и $\sigma_5^o = 2,373$ отличаются на $\delta_6(\%) = 6,028\%$ (см. табл. 1), тогда погрешность напряжения σ_6^o не более 15%, т. е. имеем $\delta_\alpha \leq 0,15$. Отметим, что $\sigma_6^o = 2,525$ отличается от точного напряжения $\sigma_0 = 2,785$ на 9,33%. Принимаем $\delta_\alpha = 0,15$, $\sigma_b = \sigma_6^o$. Условие (12) для δ_α выполняется, т. е. имеем $\delta_\alpha = 0,15 < C_\alpha = 0,31$. Используя $\delta_\alpha = 0,15$, $n_1 = 1,8$ и $n_2 = 3,4$ в (11) получаем

$$2,12 \leq n_b \leq 2,96. \quad (13)$$

Используя $\sigma_b = 2,525$, $\sigma_T = 6$, находим коэффициент запаса n_b для КТ V_0 по формуле

$$n_b = \sigma_T / \sigma_b = 6 / 2,525 = 2,38. \quad (14)$$

Так как найденный коэффициент n_b удовлетворяет скорректированным условиям прочности (13), то согласно выше сформулированной теореме коэффициент запаса n_0 КТ V_0 , отвечающий точному решению задачи упругости, найденному для КТ V_0 , удовлетворяет заданным условиям прочности (6), т. е. $1,8 \leq n_0 \leq 3,4$. В самом деле, $n_0 = \sigma_T / \sigma_0 = 6 / 2,785 = 2,15$, коэффициент запаса $n_0 = 2,15$ КТ V_0 удовлетворяет заданным условиям прочности (6), т. е. имеем $1,8 < 2,15 < 3,4$.

В расчетах на прочность КТ V_0 по МФДМ используем дискретную модель R_6^o , которая требует в $k = \frac{N_0 \times b_0}{N_6^o \times b_6^o} = \frac{16426368 \times 14556}{78624 \times 573} = 5307,30$ раз меньше объема памяти ЭВМ, т. е. почти в $5,3 \times 10^3$ раз меньше, чем БМ R_0 КТ V_0 , что показывает высокую эффективность реализации МФДМ с применением ФМ с тремя переменными характерными размерами.

Заключение

Предложен метод фиктивных дискретных моделей (МФДМ) для расчета на статическую прочность упругих тел с неоднородной, микронеоднородной регулярной структурой. Предлагаемый метод сводится к построению и расчету на прочность фиктивных дискретных моделей (ФМ), размерности которых меньше размерностей базовых дискретных моделей (БМ) композитных тел (КТ), и реализуется с применением метода многосеточных конечных элементов (ММКЭ) и скорректированных условий прочности, которые учитывают погрешность приближенных решений. Здесь ФМ представляются двумя основными типами. Первый тип – масштабированные ФМ, второй тип – ФМ с переменными характерными размерами. В данной работе подробно рассматриваются ФМ второго типа. Расчеты показывают, что реализация ММКЭ для ФМ с переменными характерными размерами приводит к большой экономии ресурсов ЭВМ, что позволяет использовать МФДМ для тел с микронеоднородной регулярной структурой. Расчеты на прочность КТ по МФДМ требуют в $10^3 \div 10^7$ раз меньше объема памяти ЭВМ, чем аналогичный расчет с использованием БМ КТ, и не содержат процедуру измельчения БМ. Приведенный пример расчета на прочность композитной балки по МФДМ с применением ФМ с тремя переменными характерными размерами показывает его высокую эффективность.

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. Математика и механика. 2017. № 4. С. 116–119. Doi: 10.14258/izvasu(2017)4-21.

5. 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.
6. Матвеев А. Д. Метод многосеточных конечных элементов в расчетах композитных пластин и балок // Вестник КрасГАУ. 2016. № 12. С. 93–100.
7. 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, № 1. P. 1–9.
8. Матвеев А. Д. Метод многосеточных конечных элементов в расчетах композитных пластин и балок сложной формы // Вестник КрасГАУ. 2017. № 11. С. 131–140.
9. Матвеев А. Д. Метод многосеточных конечных элементов // Вестник КрасГАУ. 2018. № 2. С. 90–103.
10. Матвеев А. Д. Метод многосеточных конечных элементов в расчетах композитных оболочек вращения и двоякой кривизны // Вестник КрасГАУ. 2018. № 3. С. 126–137.
11. Матвеев А. Д. Метод многосеточных конечных элементов в решении физических краевых задач. // Информационные технологии и математическое моделирование. 2017. С. 27–60.
12. Матвеев А.Д. Некоторые подходы проектирования упругих многосеточных конечных элементов. // Деп. в ВИНТИ № 2990–В00. 2000. 30 с.
13. Матвеев А. Д. Смешанные дискретные модели в анализе упругих трехмерных неоднородных тел сложной формы // Вестник ПНИПУ. Механика. Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. Политехн. ун-та. 2013. № 1. С. 182–195.
14. Матвеев А. Д. Многосеточное моделирование композитов нерегулярной структуры с малым коэффициентом заполнения // Прикладная механика и техническая физика. 2004. № 3. С. 161–171.
15. Матвеев А. Д. Построение сложных многосеточных конечных элементов с неоднородной и микрон неоднородной структурой // Известия АлтГУ. Серия: Математика и механика. 2014. № 1/1. С. 80–83. Doi: 10.14258/izvasu(2014)1.1-18.
16. Матвеев А. Д. Метод образующих конечных элементов // Вестник КрасГАУ. 2018. № 6. С. 141–154.
17. 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.
18. Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов. М. : Мир, 1982. 232 с.
19. Голушко С. К., Немировский Ю. В. Прямые и обратные задачи механики упругих композитных пластин и оболочек вращения. М. : ФИЗМАТЛИТ. 2008. 432 с.
20. Немировский Ю. В., Резников Б. С. Прочность элементов конструкций из композитных материалов. Новосибирск : Наука, Сибирское отделение. 1984. 164 с.
21. Кравчук А. С., Майборода В. П., Уржумцев Ю. С. Механика полимерных и композиционных материалов. М. : Наука. 1985. 201 с.
22. Алфутов Н. А., Зиновьев А. А., Попов Б. Г. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. М. : Машиностроение, 1984. 264 с.
23. Победря Б. Е. Механика композиционных материалов. М. : МГУ, 1984. 336 с.
24. Андреев А. Н., Немировский Ю. В. Многослойные анизотропные оболочки и пластины. Изгиб, устойчивость, колебания. Новосибирск : Наука, 2001. 288 с.
25. Ванин Г. А. Микромеханика композиционных материалов. Киев : Наукова думка. 1985. 302 с.
26. Васильев В. В. Механика конструкций из композиционных материалов. М. : Машиностроение, 1988. 269 с.

27. Матвеев А. Д. Метод фиктивных дискретных моделей в расчетах тел с неоднородной регулярной структурой // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 2. С. 244–260. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-2-244-260.
28. Самуль В. И. Основы теории упругости и пластичности. М. : Высшая школа, 1982. 264 с.
29. Норри Д., Ж. де Фриз. Введение в метод конечных элементов: М. : Мир, 1981. 304 с.
30. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М. : Мир, 1975. 542 с.

References

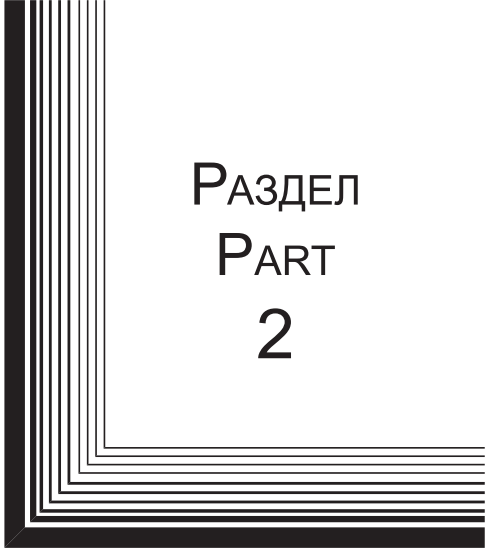
1. Pisarenko G. S., Yakovlev A. P., Matveev V. V. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* [Handbook of resistance materials']. Kiev, Nauk. Dumka Publ., 1975, 704 p.
2. Birger I. A., Shorr B. F., Iosilevich G. B. *Raschet na prochnost' detalej mashin* [Calculation of the strength of machine parts]. 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*. 2017, No. 4, P. 116–119. Doi: 10.14258/izvasu(2017)4-21.
5. Matveev A. D. [The method of multigrid finite elements in the calculations of three-dimensional homogeneous and composite bodies]. *Uchen. zap. Kazan. un-ta. Seriya: Fiz.-matem. Nauki*. 2016, Vol. 158, Is. 4, P. 530–543 (In Russ.).
6. 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.).
7. 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.
8. Matveev A. D. [Multigrid finite element Method in the calculations of composite plates and beams of irregular shape]. *The Bulletin of KrasGAU*. 2017, No. 11, P. 131–140.
9. Matveev A. D. [Multigrid finite element Method]. *The Bulletin of KrasGAU*. 2018, No. 2, P. 90–103 (In Russ.).
10. Matveev A. D. [The method of. multigrid finite elements of the composite rotational and bi-curved shell calculations]. *The Bulletin of KrasGAU*. 2018, No. 3, P. 126–137 (In Russ.).
11. Matveev A. D. [Method of. multigrid finite elements to solve physical boundary value problems]. *Information technologies and mathematical modeling*. Krasnoyarsk, 2017, P. 27–60.
12. Matveev A. D. [Some approaches of designing elastic multigrid finite elements]. *VINITI Proceedings*. 2000, No. 2990-B00, P. 30 (In Russ.).
13. Matveev A. D. [Mixed discrete models in the analysis of elastic three-dimensional inhomogeneous bodies of complex shape]. *Vestnik PNIPU. Mekhanika*. 2013, No. 1, P. 182–195 (In Russ.).
14. Matveev A. D. [Multigrid modeling of composites of irregular structure with a small filling ratio]. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2004, No. 3, P. 161–171 (In Russ.).
15. Matveev A. D. [The construction of complex multigrid finite element heterogeneous and micro-inhomogeneities in structure]. *Izvestiya AltGU. Seriya: Matematika i mekhanika*. 2014, No. 1/1, P. 80–83 (In Russ.). Doi: 10.14258/izvasu(2014)1.1-18.
16. Matveev A. D. [Method of generating finite elements]. *The Bulletin of KrasGAU*. 2018, No. 6, P. 141–154 (In Russ.).
17. 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.

18. Fudzii T., Dzako M. *Mekhanika razrusheniya kompozitsionnykh materialov* [Fracture mechanics of composite materials]. Moscow, Mir Publ., 1982, 232 p.
19. Golushko S. K., Nemirovskij Y. V. *Pryamye i obratnye zadachi mekhaniki uprugih kompozitsionnykh plastin i obolochek vrashcheniya* [Direct and inverse problems of mechanics of elastic composite plates and shells of rotation]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2008, 432 p.
20. Nemirovskij Y. V., Reznikov B. S. *Prochnost' elementov konstrukcij iz kompozitsionnykh materialov* [Strength of structural elements made of composite materials]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984, 164 p.
21. Kravchuk A. S., Majboroda V. P., Urzhumcev Y. S. *Mekhanika polimernykh i kompozitsionnykh materialov* [Mechanics of polymer and composite materials]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 201 p.
22. Alfutov N. A., Zinov'ev A. A., Popov B. G. *Raschet mnogoslojnykh plastin i obolochek iz kompozitsionnykh materialov* [Calculation of multilayer plates and shells made of composite materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984, 264 p.
23. Pobedrya B. E. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov* [Mechanics of composite materials]. Moscow, MGU Publ., 1984, 336 p.
24. Andreev A. N., Nemirovskij Y. V. *Mnogosloynnye anizotropnye obolochki i plastiny. Izgib, ustoychivost', kolebaniya* [Multilayer anisotropic shells and plates. Bending, stability, vibration]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2001, 288 p.
25. Vanin G. A. *Mikromekhanika kompozitsionnykh materialov* [Micromechanics of composite materials]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1985, 302 p.
26. Vasil'ev V. V. *Mekhanika konstrukcij iz kompozitsionnykh materialov* [Mechanics of structures made of composite materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988, 269 p.
27. Matveev A. D. [The method of fictitious discrete models in calculations bodies with inhomogeneous regular structure]. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 2. P. 244–260. (In Russ.) Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-2-244-260.
28. Samul' V. I. *Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti* [Fundamentals of the theory of elasticity and plasticity]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 1982, 264 p.
29. Norri D., de Friz Zh. *Vvedenie v metod konechnykh elementov* [Introduction to the finite element method]. Moscow, Mir Publ., 1981, 304 p.
30. Zenkevich O. *Metod konechnykh elementov v tekhnike* [Finite element method in engineering]. Moscow, Mir Publ., 1975, 544 p.


© Матвеев А. Д., 2021

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.



РАЗДЕЛ
PART
2



АВИАЦИОННАЯ
И РАКЕТНО-
КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

AVIATION
AND SPACECRAFT
ENGINEERING



УДК 629.7.083

Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-638-648

Для цитирования: Гусев Е. В., Родченко В. В. Разработка модели выявления неисправностей в процессе проведения технического обслуживания систем летательных аппаратов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 4. С. 638–648. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-638-648.

For citation: Gusev E. V., Rodchenko V. V. Development of a model for detecting malfunctions during the maintenance of aircraft units and systems. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 4, P. 638–648. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-638-648.

Разработка модели выявления неисправностей в процессе проведения технического обслуживания систем летательных аппаратов

Е. В. Гусев, В. В. Родченко

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
Российская Федерация, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4
E-mail: ccg-gus@mail.ru

На сегодняшний день можно выделить ряд перспективных многоразовых ракет-носителей «Крыло СВ» – многоразовая крылатая ступень ракеты-носителя легкого класса; «Байкал-Ангара» многоразовый ускоритель первой ступени ракеты-носителя Ангара; «Союз-7» – многоразовая двухступенчатая ракета-носитель среднего класса, летно-конструкторские испытания «Союза-7» планируются на 2025 г. Для поддержания эксплуатационных характеристик летательных аппаратов необходимо разработать систему технического обслуживания, обеспечивающую заданную надежность агрегатов летательных аппаратов. Целью данной работы является разработка модели выявления неисправностей в процессе проведения технического обслуживания агрегатов и систем летательных аппаратов. В рамках данной работы разработан алгоритм, в основе которого заложен метод статистических испытаний, позволяющий при небольших затратах машинного времени более детально проанализировать процесс технического обслуживания с учетом длительности выполнения отдельных операций и их эффективности. Данные о длительности и эффективности отдельных операций могут быть получены в процессе специальных испытаний аппаратуры путем хронометража и анализа результатов обслуживания. Для моделирования необходимо иметь следующие исходные данные: закон распределения продолжительности отдельных операций; эффективность выявления неисправностей при проведении отдельных операций. В алгоритме реализуется два вида технического обслуживания: полное и сокращенное. Сокращенное обслуживание предусматривает проведение операций, наиболее эффективных с точки зрения количества устраняемых неисправностей: регулировок, подстроек, поиска неисправных элементов. Разработанная модель позволяет исследовать возможность сокращения времени простоя на обслуживании без существенного снижения качества технического обслуживания, а именно: оценить эффективность технического обслуживания при проведении его по полной и сокращенной схеме; оценить эффективность технического обслуживания при проведении обслуживания в ограниченное время; обосновать наиболее целесообразные пути повышения качества обслуживания при условии, что время простоя на техническом обслуживании ограничено, и прогнозировать вероятность выявления неисправностей в процессе проведения технического обслуживания. Практическая значимость итогов данной работы может быть достигнута в аэрокосмической отрасли, в частности, на этапе проектирования (испытаний и эксплуатации) системы технического обслуживания для многоразовых элементов ракет-носителей.

Ключевые слова: модель выявления неисправностей, техническое обслуживание, восстановление, техническая диагностика, прогнозирование неисправностей, контролируемый параметр.

Development of a model for detecting malfunctions during the maintenance of aircraft units and systems

E. V. Gusev, V. V. Rodchenko

Moscow Aviation Institute (National Research University)
4, Volokolamsk Highway, Moscow, 125993, Russian Federation
E-mail: ccg-gus@mail.ru

Today, we can single out a number of promising reusable launch vehicles “SV Wing” – a reusable cruise stage of a light-class launch vehicle; “Baikal-Angara” reusable booster of the first stage of the Angara launch vehicle; “Soyuz-7” is a reusable two-stage medium-class launch vehicle; flight design tests of “Soyuz-7” are planned for 2025. To maintain the operational characteristics of aircraft, it is necessary to develop a maintenance system that ensures the specified reliability of aircraft assemblies. The purpose of this work is to develop a model for detecting malfunctions in the process of maintenance of units and systems of aircraft. Within the framework of this work, an algorithm has been developed, which is based on the method of statistical testing, which allows, at low computer time, to analyze the maintenance process in more detail, taking into account the duration of individual operations and their effectiveness. Data on the duration and efficiency of individual operations can be obtained in the process of special tests of equipment by timing and analysis of service results. For modeling it is necessary to have the following initial data: the law of distribution of the duration of individual operations; the effectiveness of troubleshooting during individual operations. The algorithm implements two types of maintenance: full and reduced. Reduced maintenance provides for operations that are most effective in terms of the number of faults to be eliminated: adjustments, adjustments, search for faulty elements. The developed model makes it possible to investigate the possibility of reducing the downtime for maintenance without a significant decrease in the quality of maintenance, namely: to assess the effectiveness of maintenance when it is carried out according to the full and reduced scheme; evaluate the effectiveness of maintenance when performing maintenance in a limited time; justify the most appropriate ways to improve the quality of service, provided that the downtime for maintenance is limited and predict the likelihood of detecting malfunctions during the maintenance process. The practical significance of the results of this work can be achieved in the aerospace industry, in particular, at the design stage (testing and operation) of a maintenance system for reusable elements of launch vehicles.

Keywords: fault detection model, maintenance, recovery, technical diagnostics, fault prediction, controlled parameter.

Введение

К летательным аппаратам (ЛА) предъявляют жесткие требования по безопасности, надежности, экономичности и влиянию на окружающую среду. Поэтому при разработке ЛА стараются учесть все возможные факторы, которые будут оказывать воздействие на ЛА, и воздействия самого ЛА на окружающую среду. Также важно учитывать стремление увеличить срок активного существования из-за применения новых материалов и технологий производства, что, в свою очередь, увеличивает затраты на непосредственное производство ЛА и поддержание его в процессе эксплуатации.

Разработка ракет-носителей (РН) с многоразовой первой ступенью – одна из актуальных задач, так как конкуренция на рынке по доставке полезной нагрузки на целевые орбиты возрастает,

стоимость вывода одного килограмма полезной нагрузки уменьшается и некоторые РН, не выдерживая конкуренции, становятся неактуальными. Восстановление ступени РН после полета, обслуживание, ремонт и замена неисправных элементов – это основная задача системы технического обслуживания. Проектирование, испытание и эксплуатация системы технического обслуживания – неотъемлемая часть процесса эксплуатации РН в целом.

Техническое обслуживание агрегатов и систем ЛА

Техническое обслуживание элементов и систем ЛА является основным методом предотвращения неисправностей. При техническом обслуживании проводится поиск неисправностей и их устранение. Для большинства типов аппаратуры ЛА можно выделить следующие характерные этапы технического обслуживания, каждый из которых включает определенные виды работ [1–2].

1. Проведение внешнего осмотра и проверка аппаратуры «без тока»:

- подготовка контрольно-измерительных приборов;
- разборка аппаратуры, осмотр состояния (например, креплений, паек или монтажа);
- проверка качества изоляции монтажа кабелей;
- автономная проверка точности срабатывания отдельных устройств с помощью простейшей контрольно-измерительной аппаратуры.

2. Проверка и испытания узлов и блоков аппаратуры под током:

- регулировка и настройка некоторых элементов и устройств;
- проверка работоспособности элементов и устройств аппаратуры в нормальных и специальных режимах;
- поиск неисправных элементов и устранение неисправностей с заменой или без замены элементов.

3. Регламентные работы:

- проверка состояния (например, контактов реле, механических узлов);
- чистка отдельных узлов и аппаратуры в целом;

4. Проведение контроля функционирования аппаратуры в целом:

- сборка и комплектация аппаратуры;
- контроль параметров аппаратуры в нормальных и специальных режимах;
- комплексная отладка и настройка аппаратуры.

В процессе выполнения технического обслуживания на каждом этапе осуществляются операции по выявлению неисправных элементов, их замене или восстановлению.

На первом этапе обслуживания (внешний осмотр аппаратуры «без тока») такими операциями являются выявление и замена неисправных элементов: обгоревших сопротивлений, износившихся разъемов, проверяется состояние контактов реле и пр.

На втором этапе проводятся испытания аппаратуры «под током». При этом поиск и восстановление неисправных элементов осуществляется лишь в том случае, когда не удастся установить исходные режимы работы или пределы срабатывания отдельных устройств аппаратуры с помощью органов регулировки.

На третьем этапе (регламентные работы) проводятся мероприятия (чистка, замена смазок и т. д.), направленные на устранение условий, способствующих появлению неисправностей.

На четвертом этапе (проверка функционирования аппаратуры в целом, отладка и настройка ее в соответствии с заданными техническими условиями) также может проводиться поиск и устранение неисправностей. При этом часть работ, проводимых ранее, повторяется, например, настройка отдельных узлов, проверка монтажа, регулировка контактов и т. д. Ориентировочное распределение выявляемых неисправностей по видам операций, связанных с устранением неисправностей, и этапам технического обслуживания приведено в табл. 1 [2–3]. Из таблицы видно, что на отдельных этапах технического обслуживания некоторые операции проводятся (знак «+»), не проводятся (знак «-») или проводятся не всегда (знак «±»).

Все операции технического обслуживания делятся на три типа:

- операции, связанные с выявлением неисправностей (поиск неисправных элементов);
- операции, связанные с устранением неисправностей (регулировка, настройка, замена);
- вспомогательные операции (подготовка контрольно-измерительной аппаратуры, разборка, сборка, отбраковка запасных элементов).

На основе анализа статистических данных по эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры ЛА можно ориентировочно распределить общее время технического обслуживания по видам операций (табл. 2) [2–3].

Как следует из табл. 1 и 2, почти на всех этапах технического обслуживания выполняются работы, связанные с поиском, выявлением и устранением неисправностей, время выполнения которых случайно и составляет основную часть времени обслуживания.

Аналитический метод оценки вероятности выявления неисправностей

Из приведенных в табл. 1 данных следует, что мероприятия ТО могут предотвратить значительную часть отказов. При этом статистическая оценка вероятности предотвращения отказов $P_{ПВ}$ в общем случае может быть оценена отношением:

$$P_{ПВ} = \frac{n_{ПВ}}{n_{П}}, \quad (1)$$

где $P_{ПВ}$ – статистическая оценка вероятности предотвращения отказов при проведении ТО; $n_{П} = n_{ПВ} + n_{ПН}$ – общее число предотвращаемых отказов, которое определяется неисправностями, накопленными к моменту проведения ТО; $n_{ПВ}$, $n_{ПН}$ – число неисправностей, выявленных и не выявленных в процессе ТО, соответственно (предполагается, что все выявленные неисправности могли привести к отказу агрегатов и систем ЛА).

Таким образом, $P_{ПВ}$ – является одним из основных показателей количественной оценки эффективности технического обслуживания.

Таблица 1

Операции, проводимые на различных этапах ТО

Операции, связанные с устранением неисправностей	Выявление неисправности, %	Этапы технического обслуживания			
		Проверка без тока, 1	Проверка под током, 2	Регламентные работы, 3	Комплексная отладка, 4
Устранение неисправностей путем замены элементов или без замены	20–40	±	±	±	±
Чистка, смазка	10–20	–	–	+	–
Регулировка и настройка	40–70	–	+	–	+

Таблица 2

Распределение времени обслуживания по видам операций

Операция ТО	Время, затрачиваемое на ТО, %	Закон распределения длительности операции
Поиск неисправностей	60–80	Экспоненциальный
Устранение неисправностей	10–20	Релеевский, нормальный
Вспомогательные операции	10–20	Нормальный

В модели прогнозирования отказов элемента выявление неисправностей представляет собой упорядоченный процесс и $P_{ПВ}$ в основном зависит от метода прогнозирования и времени, отводимого на этот процесс.

Примем, что вероятность пропуска неисправного элемента из-за неточного измерения параметра β и вероятность пропуска неисправного элемента из-за недостатка времени $Q(T_{П})$ являются независимыми. Тогда вероятность предотвращения отказов при проведении ТО может быть представлена в виде произведения:

$$P_{ПВ}(T_{П}) = (1 - \beta)[1 - Q(T_{П})], \quad (2)$$

$$\text{где } Q(T_{П}) = \begin{cases} 1 - LT_{П}, & 0 \leq T_{П} \leq T_{П0}, \\ 0, & T_{П} \geq T_{П0}. \end{cases}$$

Здесь $L = \frac{1}{T_{П0}}$, а $T_{П0}$ – среднее время, требуемое для обслуживания; $\beta = \frac{\sigma_{\beta}}{\alpha(t)}$ – относительная погрешность, где σ_{β} среднеквадратическая ошибка; $\alpha(t)$ – значение параметра α в момент времени t .

С учетом принятых обозначений (2) преобразуется к виду

$$P_{ПВ}(T_{П}) = (1 - \beta)LT_{П}. \quad (3)$$

Соотношение (3) может быть использовано для ориентировочной оценки вероятности выявления неисправностей при проведении технического обслуживания и прогнозирования.

Оценка вероятности выявления неисправности при техническом обслуживании

В основе модели выявления неисправностей в процессе проведения ТО агрегатов и систем ЛА заложен алгоритм, который реализует метод статистических испытаний [4–6].

При рассмотренной выше аналитической оценке $P_{ПВ}$ не учитывается эффективность отдельных операций технического обслуживания.

Метод статистического моделирования позволяет при небольших затратах машинного времени более детально проанализировать процесс технического обслуживания с учетом длительности выполнения отдельных операций и их эффективности (табл. 1 и 2). Данные о длительности и эффективности отдельных операций могут быть получены в процессе специальных испытаний аппаратуры путем хронометража и анализа результатов ТО.

Для моделирования необходимо иметь следующие исходные данные:

- закон распределения продолжительности отдельных операций;
- эффективность выявления неисправностей при проведении отдельных операций (доля выявленных неисправностей из общего числа накопленных к началу ТО).

В алгоритме реализуется два вида ТО: полное и сокращенное, блок-схема алгоритма представлена на рис. 1 Сокращенное обслуживание предусматривает проведение операций, наиболее эффективных с точки зрения количества устраняемых неисправностей: регулировок, подстроек, поиска неисправных элементов (табл. 1).

Процесс технического обслуживания оценивается: $P_{ПВ} = f(T_{П}, T_{П0})$, где $T_{П}$ – время, отводимое для ТО; $T_{П0} = M[\tau_{П}]$ – среднее время проведения ТО.

Для оценки $P_{ПВ}$ предусматривается N -кратное моделирование процесса проведения ТО.

При этом количество реализаций алгоритма определяется относительной погрешностью результатов $\varepsilon_{ТР}$ при заданной доверительной вероятности α и дисперсией оцениваемых величин [7–9].

Одна реализация алгоритма заключается в моделировании с помощью случайных чисел длительностей отдельных операций ТО (табл. 2) и оценке их эффективности. Считается, что если общее время ТО τ_{Π} в i -й реализации не превосходит отводимого T_{Π} , то все неисправности, накопленные к началу ТО, в данной реализации выявляются.

В блок-схеме алгоритма приняты следующие обозначения:

N_p – количество реализаций алгоритма;

ξ – случайное число, равномерно распределенное в интервале $(0,1)$;

P_{Π} – статистическая оценка вероятности того, что в процессе регулировок и подстроек удается установить исходные значения контролируемых параметров и не требуется проводить поиск и устранение неисправности;

$P_{\text{ВО}}$ – статистическая оценка вероятности выявления неисправности при проведении внешнего осмотра;

τ_{Π} – общая продолжительность ТО в i -й реализации;

$n_{\text{ПВ}}^{(\Pi)}$, $n_{\text{ПВ}}^{(\text{C})}$ – количество неисправностей, выявленных при полном и сокращенном ТО соответственно;

$\sum \tau_p$ – счетчик числа реализаций, в которых общее время ТО τ_{Π} не превосходит отводимого T_{Π} ;

$\sum \tau_{\Pi}$ – счетчик суммарного времени простоя аппаратуры на ТО в N_p реализациях [10–12].

Результатами решения задачи являются следующие величины:

1. Статистическая оценка вероятности выявления неисправностей:

$$P_{\text{ПВ}}^* = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} r_{pi}}{N_p} \frac{n_{\text{ПВ}}}{n_{\Pi}}, \quad (4)$$

где r_{pi} в i -й реализации принимает значение 0 и 1.

2. Математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение длительности проведения ТО:

$$T_{\text{ПО}}^* = M^*[\tau_{\Pi}] = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} \tau_{\Pi i}}{N_p}, \quad (5)$$

$$\sigma^*[\tau_{\Pi}] = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_p} (\tau_{\Pi i} - T_{\text{ПО}}^*)^2}{N_p - 1}}. \quad (6)$$

3. Гистограмма случайной величины τ_{Π} – длительности ТО:

$$p_i^* = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} r_{ij}}{N_p} \quad i = 1, 2, \dots, k, \quad (7)$$

где p_i^* – частота, соответствующая i -му разряду гистограммы; k – количество разрядов гистограммы;

$\sum_{i=1}^{N_p} r_{ij}$ – счетчик числа попаданий случайной величины τ_{Π} в i -й разряд.

Для реализации рассмотренного алгоритма необходимо задать численные значения следующих исходных данных:

– математического ожидания и среднеквадратического отклонения длительностей выполнения отдельных операций (вспомогательных T_{BC} , σ_{BC} ; регулировок и подстроек T_{RP} , σ_{RP} ; устранения неисправностей T_y , σ_y ; внешнего осмотра, чистки, смазки T_{BO} , σ_{BO});

– среднего времени поиска неисправности $\left(T_{ПН} = \frac{1}{v_{ПН}} \right)$;

– $T_{П}$ (время ТО);

– P_{RP} и P_{BO} ;

– среднего количества неисправностей, устраняемых при проведении сокращенного и полного ТО ($n_{ПВ}^{(C)}$ и $n_{ПВ}^{(П)}$);

– требуемой погрешности результатов ($\varepsilon_{ТР}$) и величины t_α .

Величину ε можно оценить по соотношению:

$$\varepsilon = 2t_\alpha \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^{N_p} x_i^2}{\left(\sum_{i=1}^{N_p} x_i \right)^2} - \frac{1}{N_p} \right] * \frac{N_p}{N_p - 1}}; \quad (8)$$

– требуемого количества реализаций алгоритма ($N_{p\ TR}$) [13–15].

Пример оценки вероятности выявления неисправностей при проведении ТО

При проведении опытной эксплуатации определены параметры ТО:

1) по результатам хронометрирования отдельных операций ТО:

– математические ожидания и среднеквадратические отклонения времени выполнения вспомогательных операций $T_{BC} = 0,2$ час, $\sigma_{BC} = 0,07$ час; регулировок и подстроек $T_{RP} = 0,15$ час, $\sigma_{RP} = 0,05$ час; устранения неисправностей $T_y = 0,1$ час, $\sigma_y = 0,04$ час; внешнего осмотра $T_{BO} = 1,0$ час; $\sigma_{BO} = 0,3$ час;

– среднее время поиска неисправностей $T_{ПН} = 0,5$ час;

2) результатам обработки статистических данных по оценке эффективности отдельных операций ТО:

– эффективность предусмотренных в аппаратуре регулировок и подстроек. Оценивается соотношением: $P_{RP} = \frac{n_{RP}^{(+)}}{n_{RP}^{(+)} + n_{RP}^{(-)}}$, где $n_{RP}^{(+)}$ – число неисправностей, устраненных за счет регулировок и подстроек; $n_{RP}^{(-)}$ – число неисправностей, которое не удалось устранить регулировками, $P_{RP} = 0,3$;

– эффективность обслуживания при проведении внешнего осмотра. Оценивается соотношением $P_{BO} = \frac{n_{BO}^{(+)}}{n_{BO}^{(+)} + n_{BO}^{(-)}}$, где $n_{BO}^{(+)}$ и $n_{BO}^{(-)}$ – число неисправностей, выявленных и пропущенных при осмотре соответственно, $P_{BO} = 0,2$.

Подконтрольная эксплуатация проводилась для двух видов ТО: полного и сокращенного. Среднее количество неисправностей, выявленных при проведении полного и сокращенного ТО соответственно равны $n_{ПВ}^{(П)} = 12$; $n_{ПВ}^{(C)} = 5$.

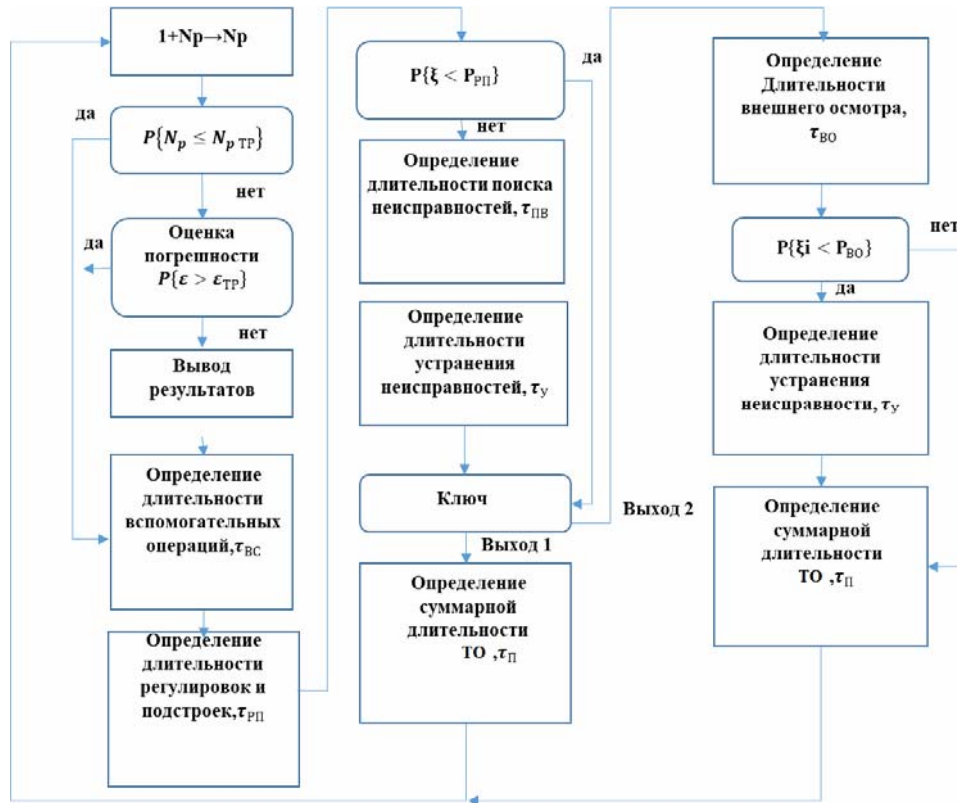


Рис. 1. Блок-схема алгоритма для оценки процесса выявления неисправностей при техническом обслуживании

Fig. 1. Block diagram of the algorithm for evaluating the process of troubleshooting during maintenance

Проанализировать возможность сокращения времени простоя на ТО без существенного снижения эффективности ТО, значит:

- оценить эффективность ТО в зависимости от вида;
- оценить эффективность ТО при проведении его в ограниченное время ($T_{\text{п}} \leq 1$ час).

Для решения указанных вопросов необходимо оценить значение $P_{\text{пв}}$ при изменении времени, отводимого на техническое обслуживание $T_{\text{п}}$, для случаев полного и сокращенного ТО.

Поставленная задача решена с помощью разработанного алгоритма при следующих исходных данных: $N_{\text{ртр}} = 200$; $\varepsilon_{\text{тр}} = 0,1$; $t_{\alpha} = 1,96$.

Рассмотрим полученные результаты.

На рис. 2 и 3 приведены графики зависимости $P_{\text{пв}}^*$ от времени $T_{\text{п}}$, отводимого на ТО, и среднего времени их поиска.

Анализ графиков на рис. 2 и 3 позволяет сделать следующие выводы:

1. Максимальное значение $P_{\text{пв}}^*$ достигается при проведении полного ТО при условии, что на проведение ТО отводится не менее $T_{\text{п}} = 2$ ч ($P_{\text{пв}}^* \geq 0,98$).

2. Проведение ТО по сокращенному графику нецелесообразно ($P_{\text{пв}}^* \leq 0,46$). Однако при условии ограниченного времени проведения технического обслуживания ($T_{\text{п}} = 1$ час) лучше проводить сокращенное ТО, так как при этом $P_{\text{пв}}^* = 0,3$, а при полном ТО $P_{\text{пв}}^* = 0,1$.

Рассмотренный алгоритм является составным элементом программно-методического комплекса (ПМК) с пользовательским интерфейсом, реализованным в среде Matlab [16]. ПМК позво-

ляет прогнозировать параметры технического обслуживания для агрегатов и элементов ЛА с различными системами технического обслуживания и проводить оптимизацию этих параметров с целью увеличения коэффициента готовности ЛА. При практическом использовании ПМК для агрегатов и узлов ЛА с комплексной моделью технического обслуживания путем оптимизации параметров системы ТО удалось увеличить значение коэффициента готовности на 2,41 % [17].

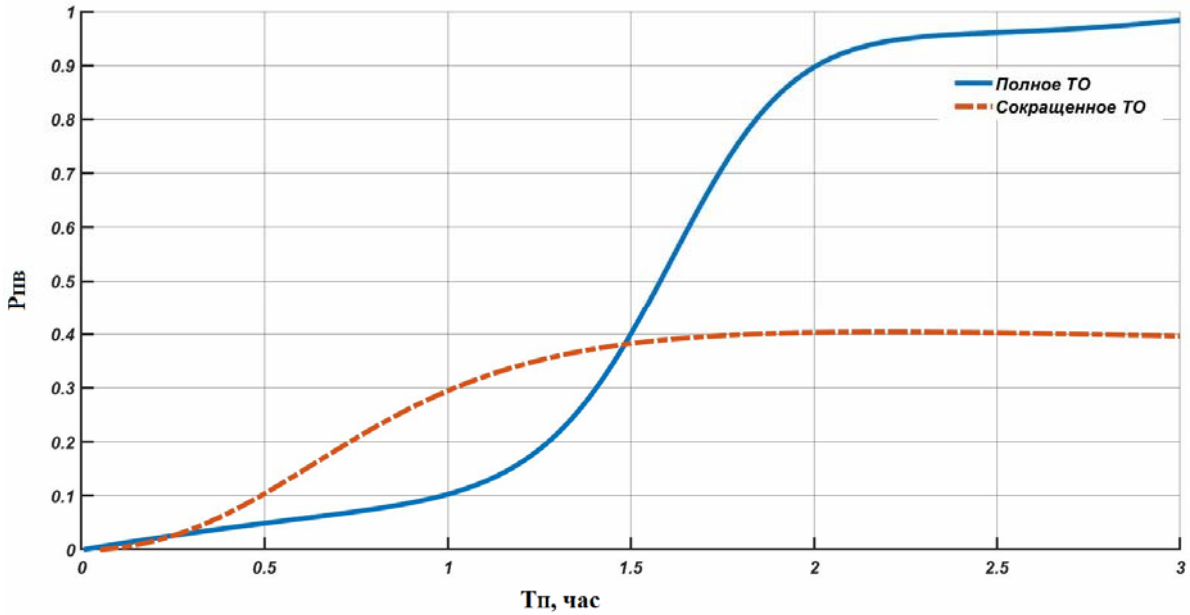


Рис. 2. Графики зависимости вероятности выявления неисправностей от времени, отводимого на ТО

Fig. 2. Graphs of the dependence of the probability of detecting faults on the time allocated for maintenance

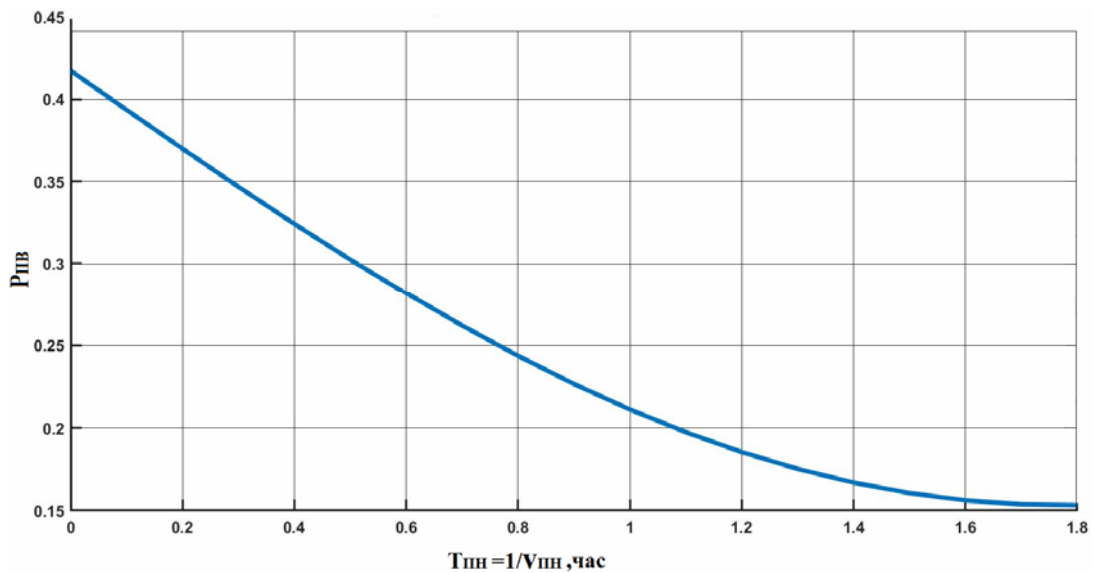


Рис. 3. График зависимости вероятности выявления неисправностей от среднего времени их поиска

Fig. 3. Graph of the dependence of the probability of detecting faults on the average time of their search

Заключение

При проведении ТО в течение ограниченного времени $T_{\text{п}} \leq 1$ час необходимо предусматривать специальные методы сокращения времени поиска неисправностей (системы поиска неисправ-

правный элемент, повышение квалификации обслуживающего персонала). При этом сокращение времени с $T_{\text{ПН}} = 0,5$ ч до $T_{\text{ПН}} = 0,1$ ч повышает вероятность выявления неисправностей в 1,5 раза и сокращает простой на ТО в среднем в 2 раза.

Таким образом, из результатов проведенного расчета очевидно, что для рассмотренной системы технического обслуживания нельзя сократить время простоя на ТО без существенного снижения качества восстановления.

Библиографические ссылки

1. Миронычев В. П. Методы и способы поиска неисправностей в радиоэлектронных системах // Вологодские чтения. 2009. № 73. С. 74–77.
2. Надежность технических систем / Е. В. Сугак и др. Красноярск : НИИ СУВПТ, МГП «Раско», 2001. 608 с.
3. Ксендз С. П. Диагностика и ремонтпригодность радиоэлектронных средств. М. : Радио и связь, 1989. 248 с.
4. Выявление причин отказов РЭА / под ред. Л. Г. Дубицкого. М. : Радио и связь, 1983. 232 с.
5. Дмитриевский Е. С. Конструкторско-технологическое обеспечение эксплуатационной надежности авиационного радиоэлектронного оборудования. СПб., 2001. 88 с.
6. Патраев В. Е., Шангина Е. А. Надежность технических систем космических аппаратов / Сиб. федер. ун-т, Ин-т инж. физики и радиоэлектроники. Красноярск : СФУ, 2019. 64 с.
7. Патраев В. Е. Методы обеспечения и оценки надежности космических аппаратов с длительным сроком активного существования : монография. Красноярск : Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2010. 136 с.
8. Золотов А. А., Нурулаев Э. Д. Методы повышения эффективности контроля агрегатов изделий ракетно-космической техники // Вестник МАИ. 2015. Т. 22, № 4. С. 46–52.
9. Эксплуатация испытательных комплексов ракетно-космических систем / А. Г. Галлеев и др. М. : Изд-во МАИ, 2007. 260 с.
10. Гусев Е. В., Золотов А. А., Родченко В. В. Методика оптимизации параметров технического обслуживания и показателей безотказности сложных технических систем, функционирующих на кислородно-водородном топливе // Альтернативная энергетика и экология. 2017. № 1-3. С. 22–33.
11. Эксплуатация радиотехнических комплексов / А. И. Александров и др. М. : Советское радио, 1976. 280 с.
12. Гусев Е. В., Золотов А. А., Родченко В. В. Прогнозирование показателей технического обслуживания сложных технических систем // Полет. 2021. № 8. С. 37–44.
13. Fitch E. S. Proactive maintenance for mechanical system. Amsterdam: Elsevier Science, 2013. 339 p.
14. Panday B. K. Failure Spase X Falcon 9 // Sps-aviation. Aug 2015. P. 10–12.
15. Никушкин Н. В., Кацура А. В. Решение задачи моделирования систем технического обслуживания летательных аппаратов // Вестник СибГАУ. 2006. № 4(11). С. 46–49.
16. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ 2021619616 Российская Федерация. Программа расчета параметров системы технического обслуживания / Е. В. Гусев ; заявитель и правообладатель Гусев Е. В. №2021618549; заявл. 02.07.2021; опубл. 15.07.2021.
17. Гусев Е. В. Разработка программного комплекса для прогнозирования параметров технического обслуживания сложных систем // Перспективы науки. 2021, № 7(142). С. 31–35.

References

1. Mironychev V. P. [Methods and methods of troubleshooting in radio electronic systems]. *Vologdinskie chteniya*. 2009, No. 73, P. 74–77 (In Russ.).

2. Sugak E. V. et al. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem* [Reliability of technical systems]. Krasnoyarsk, NII SUVPT, MGP Rasko Publ., 2001, 608 p.
3. Ksendz S. P. *Diagnostika i remontoprigradnost' radioelektronnykh sredstv* [Diagnostics and maintainability of radio-electronic equipment]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1989, 248 p.
4. *Vyyavlenie prichin otkazov REA* [Revealing the causes of REE failures]. Ed. L. G. Dubitsky, Moscow, Radio i svyaz Publ., 1983, 232 p.
5. Dmitrievsky E. S. *Konstruktorsko-tekhnologicheskoe obespechenie ekspluatatsionnoy nadezhnosti aviatsionnogo radioelektronnoy oborudovaniya* [Design and technological support for the operational reliability of aviation radio-electronic equipment]. St. Petersburg, 2001, 88 p.
6. Patraev V. E., Shangina E. A. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem kosmicheskikh apparatov* [Reliability of technical systems of spacecraft: a tutorial]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2019, 64 p.
7. Patraev V. E. *Metody obespecheniya i otsenki nadezhnosti kosmicheskikh apparatov s dlitel'nyim srokom aktivnogo sushchestvovaniya* [Methods for ensuring and assessing the reliability of spacecraft with a long active life]. Krasnoyarsk, Sib. state aerospace un-t Publ., 2010, 136 p.
8. Zolotov A. A., Nurulaev E. D. [Methods for increasing the efficiency of control of units of rocket and space technology]. *Vestnik MAI*. 2015, Vol. 22, No. 4, P. 46–52 (In Russ.).
9. Galleev A. G., Zolotov A. A., Perminov A. N., Rodchenko V. V. *Ekspluatatsiya ispytatel'nykh kompleksov raketno-kosmicheskikh sistem* [Operation of test complexes of rocket-space systems]. Moscow, MAI Publ., 2007, 260 p.
10. Gusev E. V., Zolotov A. A., Rodchenko V. V. [Technique for optimization of maintenance parameters and reliability indicators of complex technical systems operating on oxygen-hydrogen fuel]. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya*. 2017, No. 1–3, P. 22–33 (In Russ.).
11. Aleksandrov A. I. et al. *Ekspluatatsiya radiotekhnicheskikh kompleksov* [Operation of radio engineering complexes]. Moscow, Soviet radio Publ., 1976, 280 p.
12. Gusev E. V., Zolotov A. A., Rodchenko V. V. [Forecasting indicators of maintenance of complex technical systems]. *Polet*. 2021, No. 8, P. 37–44 (In Russ.).
13. Fitch E. S. Proactive maintenance for mechanical system. Amsterdam: Elsevier Science, 2013, 339 p.
14. Panday B. K. Failure Spase X Falcon 9. Sps-aviation, 2015, p. 10–12.
15. Nikushkin N. V., Katsura A. V. [Solution of the problem of modeling aircraft maintenance systems]. *Vestnik SibGAU*. 2006, No. 4 (11), P. 46–49 (In Russ.).
16. Gusev E. V. *Svid. o gos. reg. programmy dlya EVM 2021619616 Rossiyskaya Federatsiya. Programma rascheta parametrov sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya* [Certificate of state registration of a computer program 2021619616 Russian Federation. Program for calculating the parameters of the maintenance system]. No. 2021618549; app. 07/02/2021; publ. 07.15.2021.
17. Gusev E. V. [Development of a software package for predicting the parameters of maintenance of complex systems]. *Perspektivy nauki*. 2021, No. 7 (142), P. 31–35 (In Russ.).

© Гусев Е. В., Родченко В. В., 2021

Родченко Владимир Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры 610 «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем»; Московский авиационный институт. E-mail: rodchenko47@mail.ru.

Гусев Евгений Владимирович – старший преподаватель кафедры 610 «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем»; Московский авиационный институт. E-mail: ccg-gus@mail.ru.

Rodchenko Vladimir Viktorovich – Dr. Sc., Professor of the Department. 610 Operational management of rocket and space systems; Moscow Aviation Institute. E-mail: rodchenko47@mail.ru.

Gusev Evgeny Vladimirovich – senior lecturer of the department. 610 Management of the operation of rocket and space systems; Moscow Aviation Institute. E-mail: ccg-gus@mail.ru.

УДК 517.977.5-629.783

Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-649-659

Для цитирования: Оптимальное управление разведением спицы трансформируемого рефлектора при наличии возмущений / С. А. Кабанов, Д. С. Кабанов, Е. Н. Никулин, Ф. В. Митин // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 4. С. 649–659. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-649-659.

For citation: Kabanov S. A., Kabanov D. S., Nikulin E. N., Mitin F. V. Optimal control of deployment of the spoke of a transformable reflector in the presence of disturbance. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 4, P. 649–659. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-649-659.

Оптимальное управление разведением спицы трансформируемого рефлектора при наличии возмущений*

С. А. Кабанов, Д. С. Кабанов, Е. Н. Никулин, Ф. В. Митин¹

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова»
Российская Федерация, 199005, г. Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., 1

¹E-mail: fedor28@list.ru

Одним из перспективных видов космических аппаратов являются крупногабаритные трансформируемые рефлекторы. Такие аппараты доставляются на заданную орбиту в сложенном виде, а затем разворачиваются до рабочего состояния. Большая апертура позволяет значительно расширить возможности антенны. При этом возникают задачи плавного и надёжного раскрытия, настройки формы радиоотражающего сетеполотна, регулировка орбитального положения. Ввиду того что процесс раскрытия занимает длительное время, учёт возмущающих воздействий является важной проблемой. Наличие радиации, большого перепада температур, солнечного ветра оказывает влияние на всю систему и, главным образом, на диаграмму направленности. Также необходимо плавно раскрыть элементы конструкции, так как с увеличением диаметра радиоотражающей поверхности возрастают моменты инерции антенны, что приводит к длительным колебаниям. В данной работе рассмотрен процесс разведения спицы рефлектора при наличии возмущений и ошибок измерений. Решение задачи представлено с использованием теоремы разделения. Для оценивания параметров системы при наличии шумов измерений применен фильтр Калмана. Показана его работоспособность при различных значениях интенсивности шума. В качестве внешних возмущений и шумов измерений выбран случайный процесс типа белого шума. Задача управления решается при использовании алгоритма оптимального управления по иерархии целевых критериев. Показана возможность минимизации энергетических затрат путем интервального включения измерительных датчиков. Представлены результаты численного моделирования.

Ключевые слова: алгоритм последовательной оптимизации, крупногабаритный трансформируемый рефлектор, оптимальная фильтрация, математическая модель, моделирование.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00646а.
The reported study was funded by RFBR according to the research project No 20-08-00646a.

Optimal control of deployment of the spoke of a transformable reflector in the presence of disturbances

S. A. Kabanov, D. S. Kabanov, E. N. Nikulin, F. V. Mitin¹

Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D. F. Ustinov
1, 1 Krasnoarmeyskaya St., St. Petersburg, 199005, Russian Federation

¹E-mail: fedor28@list.ru

One of the promising types of spacecrafts is large-size transformable reflectors. Such apparatuses are delivered to a target orbit folded, and then deployed to a working condition. The large aperture allows you to significantly expand the capabilities of the antenna. In this case, the tasks arise of a smooth and reliable deployment, adjusting the shape of a radio-reflecting net, and adjusting the orbital position. Due to the fact that the deployment process takes a long time, accounting for disturbing influences is an important problem. The presence of radiation, large temperature differences, solar wind affects the entire system and mainly on the directional diagram. It is also necessary to smoothly deployment the structural elements, since with an increase in the diameter of the radio-reflecting surface, the moments of inertia of the antenna increase, which leads to prolonged oscillations. In this paper, the process of deployment of the reflector spokes in the presence of disturbances and measurement errors is considered. The solution to the problem is presented using the separation theorem. To estimate the parameters of the system in the presence of measurement noise, the Kalman filter is applied. Its performance is shown at various values of the noise intensity. A random process such as white noise was selected as external disturbances and measurement noises. The control problem is solved using the optimal control algorithm according to the hierarchy of target criteria. The possibility of minimizing energy costs by means of interval switching on of measuring sensors is shown. The results of numerical simulation are presented.

Keywords: sequential optimization algorithm, large-size transformable reflector, optimal filtration, mathematical model, modeling.

Введение

Космические антенны играют незаменимую роль в воздушно-космической связи, военной разведке, зондировании дальнего космоса, глобальном вещании, дистанционном зондировании Земли и прогнозировании климата. Из-за ограничений, накладываемых ракетоносителем, широко используются разворачиваемые антенны [1–3]. Они размещаются в обтекателе на этапе запуска, после выхода на орбиту начинается процесс развертывания и, наконец, образуются параболические отражающие поверхности. Стабильное и надежное развертывание рефлектора во многом обеспечивает успех космической миссии.

С конца 1960-х гг. крупногабаритные трансформируемые антенны стали активно применяться из-за их большой апертуры и малой массы. В настоящее время Astro Mesh рефлектор является наиболее совершенной и надежной из доступных разворачиваемых антенн [4; 5]. Процесс развертывания завершается фиксацией фермы и формированием необходимой формы отражающей поверхности.

Для подавляющего большинства таких конструкций раскрытие необратимо и отсутствуют эффективные способы обслуживания и активной корректировки на орбите радиоотражающего сетеполотна. Важно изучить и смоделировать процесс развертывания на стадии проектирования, чтобы получить глубокое представление о динамике развертывания [6]. Сложное кинематическое и динамическое поведение системы, высокие нелинейные напряжения и различные топологии кабельных сетей, а также рассеяние энергии, вызванное трением, демпфированием, и зазоры приводят к значительным воздействиям на динамику развертывания крупногабарит-

ных трансформируемых антенн. Активно ведутся исследования в области динамического моделирования при раскрытии различных типов конструкций [7; 8].

Рассмотрим реализацию крупногабаритной космической конструкции с применением вантовой системы для создания необходимой формы радиоотражающей поверхности рефлектора (рис. 1) [9–12]. Крупногабаритный трансформируемый рефлектор (КТР) состоит из космического аппарата (КА) 1. К нему прикреплены разворачиваемые элементы, такие как солнечные батареи 2, облучающая система 3. Для обеспечения заданной диаграммы направленности штанга 4 выдвигает рефлектор 5 на необходимое фокусное расстояние. Отражающей поверхностью является сетеполотно 6.

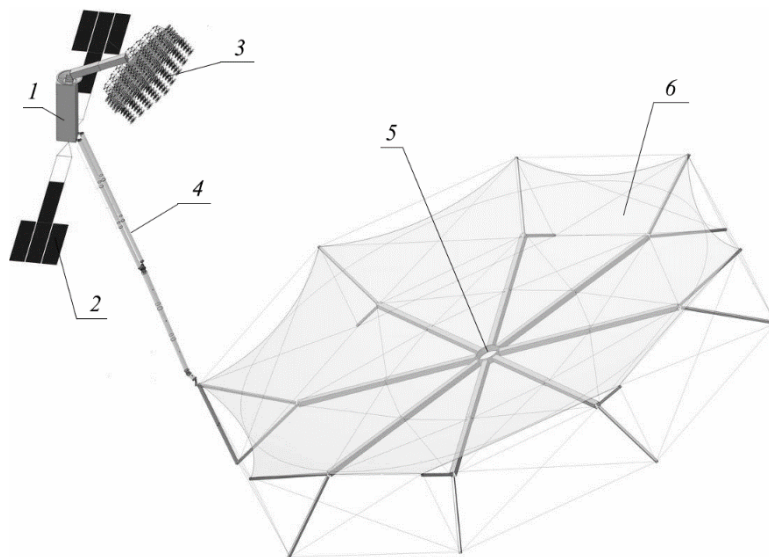


Рис. 1. Конструкция КТР

Fig. 1. The design of the LTR (Large-sized transformable reflector)

Важной проблемой при раскрытии КТР из сложенного положения в заданное с высокой точностью выхода к упорам является учёт возмущающих воздействий. Также необходимо плавно раскрыть элементы конструкции, так как с увеличением диаметра радиоотражающей поверхности возрастают моменты инерции антенны, что приводит к длительным затухающим колебаниям. Наличие радиации, большого перепада температур, солнечного ветра оказывает влияние на всю систему, и главным образом на диаграмму направленности [13; 14]. Поэтому необходимо решать задачи фильтрации и управления раскрытием рефлектора.

Математическое описание задачи

Рассмотрим процесс прямого раскрытия спицы КТР. Необходимо изменить положение спицы на заданный угол φ под действием силы M (рис. 2). Спица жестко закреплена одним концом к КА, вращение осуществляется под действием электрического двигателя.

Математическая модель, описывающая данный процесс, имеет вид $\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}(\mathbf{X}, u, t) + \xi_x$, где $\mathbf{X} = (\varphi \ \omega \ a_1 \ V_{1a})^T$ – вектор состояния; $\xi_x = [\xi_{x1} \ \xi_{x2} \ \xi_{x3} \ \xi_{x4}]^T$ – воз-

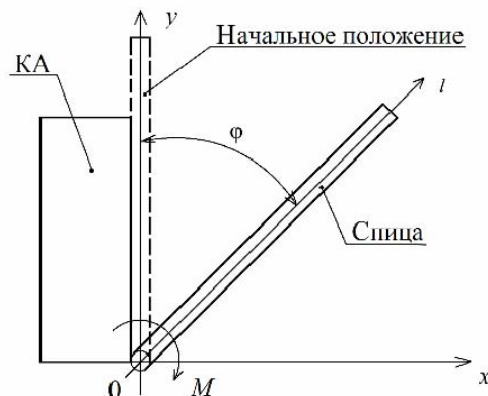


Рис. 2. Разведение спицы рефлектора

Fig. 2. Spreading of the reflector spoke

мущения с интенсивностью $\mathbf{B}_x = \text{diag}(B_{x1}, B_{x2}, B_{x3}, B_{x4})$; u – вектор управления; t – время; φ – угол поворота спицы; ω – угловая скорость поворота спицы; a_1 и V_{1a} – зависящие от времени изгиб и скорость изгиба спицы соответственно. В поэлементном виде система представляется следующим образом [15]:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi} &= \omega + \xi_{x1}, \\ \dot{\omega} &= \frac{M(U, \varphi, \omega)}{I} + \xi_{x2}, \\ \dot{a}_1(t) &= V_{1a}(t) + \xi_{x3}, \\ \dot{V}_{1a}(t) &= -\frac{EI_{\text{изг}}}{\rho S} q_1^4 [a_1(t) + \gamma V_{1a}(t)] + \frac{2}{\rho S b_1(L)} \frac{M(U, \varphi, \omega)}{R_d} + \xi_{x4}, \end{aligned} \quad (1)$$

где I – момент инерции спицы; E – модуль упругости; $I_{\text{изг}}$ – изгибной момент инерции; ρ – плотность материала спицы; S – площадь спицы в поперечном сечении; l – координата длины спицы; γ – коэффициент затухания; M – общий момент, действующий на спицу: $M(U, \varphi, \omega) = M_{\text{п}}(U) - M_{\text{тр}} - M_{\text{упор}}(\varphi, \omega) - M_{\text{ф}}(\varphi, \omega)$; $M_{\text{п}}$ – полезный момент, создаваемый бесколлекторной машиной; U – напряжение питания бесколлекторной машины; $M_{\text{тр}}$ – момент трения; $M_{\text{упор}}$ – момент, создаваемый упором; $M_{\text{ф}}$ – момент, создаваемый фиксатором; $h(t, l) = a_1(t)b_1(l)$ – изгиб спицы [10; 11; 15; 16]; $a_1(t)$ – функции только времени t ; $b_1(l)$ – функции только координаты l ; $q_1 = Z/L$, где $Z_1 = 1,875$, L – полная длина спицы; R_d – радиус вала двигателя.

Управление осуществляется за счёт изменения напряжения питания бесколлекторной машины U , $|U| \leq U_{\text{max}}$ ($U_{\text{max}} = 12,5$ В). Полезный момент зависит от управления U [10] $M_{\text{п}} = m_{\text{ф}} p E_0 U \sin \vartheta / (\omega_p X_c)$, где $m_{\text{ф}}$ – число фаз ротора; p – число пар полюсов магнитного поля; E_0 – действующее значение электродвижущей силы (ЭДС) на обмотке статора; ϑ – угол рассогласования (между U и E_0 , для двигателя находится в пределах $[0, \pi/2]$)); ω_p – угловая скорость вращения ротора двигателя; X_c – синхронное сопротивление.

Рассмотрим спицу как цилиндрическую трубу. Примем её за однозвенную конструкцию. Измерению доступны угол поворота спицы и изгиб на ее конце. Для задачи разведения спиц уравнения наблюдения рассмотрим в виде

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(x, t) + \xi_z, \quad (2)$$

где $\mathbf{z} = [z_1 \ z_2]^T$, $\mathbf{h}(x, t) = [\varphi \ d(L)]^T$, $(d(L) = a(t)b(L))$, $\xi_z = [\xi_{z1} \ \xi_{z2}]^T$ – случайные процессы типа белого шума с интенсивностью $\mathbf{B}_z = \text{diag}(B_{z1}, B_{z2})$.

В соответствии с принципом разделения, задаче управления предшествует задача оценивания вектора состояния по неполным данным, заданным уравнением (2) [17–19]. Оптимальную оценку можно получить с помощью фильтра Калмана, уравнения которого для данной задачи будут иметь вид

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{\varphi}}{dt} &= \hat{\omega} + R_{11} B_{z1}^{-1} (z_1 - \hat{\varphi}) + R_{13} b_1(L) B_{z2}^{-1} (z_2 - \hat{d}), \\ \frac{d\hat{\omega}}{dt} &= \frac{M}{I} + R_{21} B_{z1}^{-1} (z_1 - \hat{\varphi}) + R_{23} b_1(L) B_{z2}^{-1} (z_2 - \hat{d}), \\ \frac{d\hat{a}_1}{dt} &= \hat{V}_{1a} + R_{31} B_{z1}^{-1} (z_1 - \hat{\varphi}) + R_{33} b_1(L) B_{z2}^{-1} (z_2 - \hat{d}), \\ \frac{d\hat{V}_{1a}}{dt} &= -\frac{EI_{\text{изг}}}{\rho S} q_1^4 (\hat{a}_1 + \gamma \hat{V}_{1a}) + \frac{2}{\rho S b_1(L)} \frac{M}{R_d} + \\ &+ R_{41} B_{z1}^{-1} (z_1 - \hat{\varphi}) + R_{43} b_1(L) B_{z2}^{-1} (z_2 - \hat{d}), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{R}} &= \mathbf{f}_x \mathbf{R} + \mathbf{R} \mathbf{f}_x^T - \mathbf{R} \mathbf{h}_x^T \mathbf{B}_z^{-1} \mathbf{h}_x \mathbf{R} + \mathbf{B}_x, \\ \mathbf{R}(t_0) &= \mathbf{R}_0. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь

$$\mathbf{f}_x = \partial \mathbf{f} / \partial x, \quad \mathbf{h}_x = \partial \mathbf{h} / \partial x, \quad \mathbf{h}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_1(L) & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{f}_x = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{EI_{изг}}{\rho S} q_1^4 & -\frac{EI_{изг}}{\rho S} q_1^4 \gamma \end{bmatrix}, \quad R_{ii}(t_0) = 9\sigma_{xi}^2, \quad i = \overline{1, n},$$

остальные элементы матрицы начальных ковариаций ошибок оценивания принимались равными нулю.

Спица приводится в движение приводом, в качестве которого рассмотрен бесколлекторный электродвигатель Phyttron серии phySPACE [20]. Точность 3–5 % для 1,8°. Для измерения прогиба спицы h используется лазерный сканер RangeVision Standard Plus с точностью $\pm 0,03$ мм [21]. В качестве датчика углового положения используется энкодер ЛИР-МА208 [22] с точностью $\pm 1^\circ$.

Требуется перевести спицу из начального положения $\mathbf{X}(0) = (0 \ 0 \ 0 \ 0)^T$ в конечное $\mathbf{X}(t_f) = (\pi/2 \ 0 \ 0 \ 0)^T$ с отсутствием перерегулирования по углу разворота φ за время $t_f = 90$ с при наличии внешних возмущений ξ_x и шумов измерений ξ_z .

Постановка задачи управления

Рассмотрим иерархию целевых функционалов вида

$$J_1 = \mathbf{V}_{f1}(\mathbf{X}, t_f), \quad (5)$$

$$J_2 = \mathbf{V}_{f2}(\mathbf{X}, t_f) + \int_{t_0}^{t_f} [f_0(\mathbf{X}, t) + 0,5(u^2 + u_0^2)^2 k^{-2}] dt, \quad (6)$$

где $V_{f1} = 0,5\beta_1[\omega(t_f) - \omega_f]^2$; $V_{f2} = 0,5\Delta \mathbf{X}_f^T \mathbf{p}_k \Delta \mathbf{X}_f$; $f_0 = 0,5\beta_2[\varphi(t) - \varphi_f]^2 + 0,5\beta_3 h^2$; $\mathbf{a} = \text{diag}(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)$; $\beta_1, \beta_2, \beta_3, k$ – заданные коэффициенты; $\Delta \mathbf{X}_f = \mathbf{X}(t_f) - \mathbf{X}_f$; $\mathbf{X}_f = (\varphi_f \ \omega_f \ a_{1f} \ V_{1af})^T$ – заданные конечные значения соответствующих переменных в (1). Так как $h(t, L) = a_1(t)b_1(L)$, $V_{1a}(t, L) = V_{1a}(t)b_1(L)$, то $a_1(t) = h(t, L) / b_1(L)$ и $a_1(t_f) = h(t_f, L) / b_1(L)$.

Решение задачи управления разведением спицы по иерархии критериев в детерминированной постановке подробно представлено в работе [16]. Задача управления также решалась алгоритмами управления по принципу максимума с использованием численных методов Ньютона и Крылова – Черноушко, алгоритмом на основе ПИД-структуры регулирования, алгоритмом коррекции параметров структуры управления [10; 11; 15]. Применение алгоритма последовательной оптимизации по иерархии целевых критериев позволяет решать задачу в режиме реального времени с отсутствием длительных затухающих колебаний после достижения спицей заданного угла разворота. С помощью данного алгоритма удаётся добиться необходимой точности и качества регулирования системы.

Моделирование

Примем время раскрытия спицы $t_f = 90$ с, максимальная допустимая амплитуда прогиба $h_{\max} = 10$ мм. Значение коэффициента затухания $\gamma = 0,04$ с. Число фаз ротора $m_s = 2$, число пар

полюсов магнитного поля $p = 2$, действующее значение ЭДС на обмотке статора $E_0 = 2,5$ В, синхронное сопротивление $X_s = 22 \cdot 10^{-3}$ Ом, угол рассогласования между полем ротора и статора $\vartheta = \pi/10$ при любой нагрузке, $\omega_p = 247$ рад/с.

Были приняты следующие параметры спицы при моделировании [10]: материал АБС пластик QHF – 0140: плотность материала $\rho = 1600$ кг/м³, модуль упругости (Юнга) $E = 1,2 \cdot 10^{11}$ Па, длина спицы $a = 9,75$ м, масса спицы (всех вложенных звеньев) $m = 32$ кг. Рассматривается спица с сечением в виде кольца с внешним радиусом $R = 0,26$ м и внутренним радиусом $r = 0,25$ м. Момент инерции I будет равняться $I = mR^2/2 + ma^2/3 = 1015,4$ кг·м². Изгибной момент инерции $I_{изг} = \pi R^3 \delta = 5,52 \cdot 10^{-4}$ м⁴, где δ – толщина стенки трубы (спицы).

Примем, что возмущения не превышают ± 1 % от максимальных значений соответствующих переменных. В расчетах шумы ξ_x и ξ_z принимались белыми с интенсивностями $\mathbf{B}_x = \text{diag}(0,02, 0, 0,0001, 0)$, $\mathbf{B}_z = \text{diag}(0,02, 0,0005)$ соответственно. Начальные значения ошибок оценивания задавались в виде: $\hat{\varphi}(t_0) = \varphi(t_0) + \Delta\varphi(t_0)$, $\hat{\omega}(t_0) = \omega(t_0) + \Delta\omega(t_0)$, $\hat{a}_1(t_0) = a_1(t_0) + \Delta a_1(t_0)$, $\hat{V}_{1a}(t_0) = V_{1a}(t_0) + \Delta V_{1a}(t_0)$, где $\Delta\varphi(t_0) = 0,1$ рад, $\Delta\omega(t_0) = 0,002$ рад/с, $\Delta a_1(t_0) = 5 \cdot 10^{-5}$ м, $\Delta V_{1a}(t_0) = 0,01$ м/с.

На рис. 3 представлены результаты моделирования: графики зависимостей $\varphi(t)$ (на всем интервале оптимизации) и $h(t)$ (на первых 10 с). Видно, что удалось решить поставленную задачу, т. е. раскрыть спицу из начального положения на заданный угол $\pi/2$.

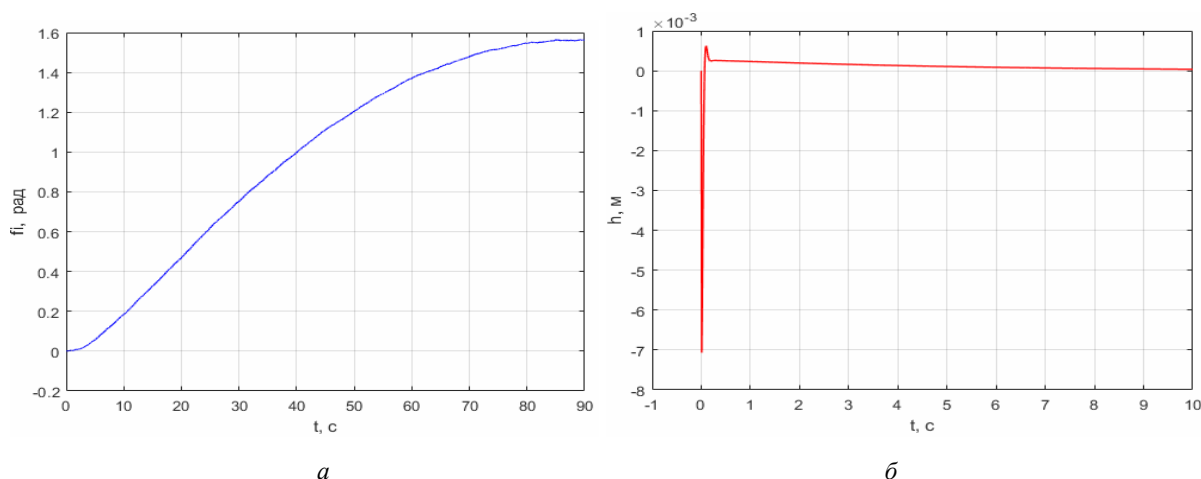


Рис. 3. Графики: а – $\varphi(t)$; б – $h(t)$

Fig. 3. Graphics: a – $\varphi(t)$; b – $h(t)$

Максимальный прогиб спицы $h(t) = 7 \cdot 10^{-3}$ м наблюдается в начальный момент времени, в дальнейшем он плавно стримится к нулю. При использовании алгоритма последовательной оптимизации по иерархии из двух целевых критериев механизмы упора и фиксатора из-за плавного подхода к конечному состоянию не приводят к дополнительным колебаниям развернутой антенны.

При выбранных возмущениях и шумах измерений алгоритмы оптимальной фильтрации и управления успешно решают поставленную задачу. Отклонения начальных значений переменных величин допустимо выбирать из диапазона ± 7 % от максимальных значений соответствующих величин, в противном случае требуется корректировка весовых коэффициентов.

На рис. 4, а показан график изменения ошибки оценивания $\Delta\varphi$ при $\mathbf{B}_z = \text{diag}(0,02, 0,0005)$ и при отсутствии внешних возмущений. На рис. 4, б показана аналогичная кривая при увеличении интенсивности \mathbf{B}_z втрое. Наибольшая ошибка достигается в начале моделирования, затем

она стремится к нулю (в том числе и для других $\Delta\varphi(t_0)$). При наличии внешних возмущений ошибки имеют математическое ожидание равное нулю и дисперсию, не превышающую дисперсию возмущений.

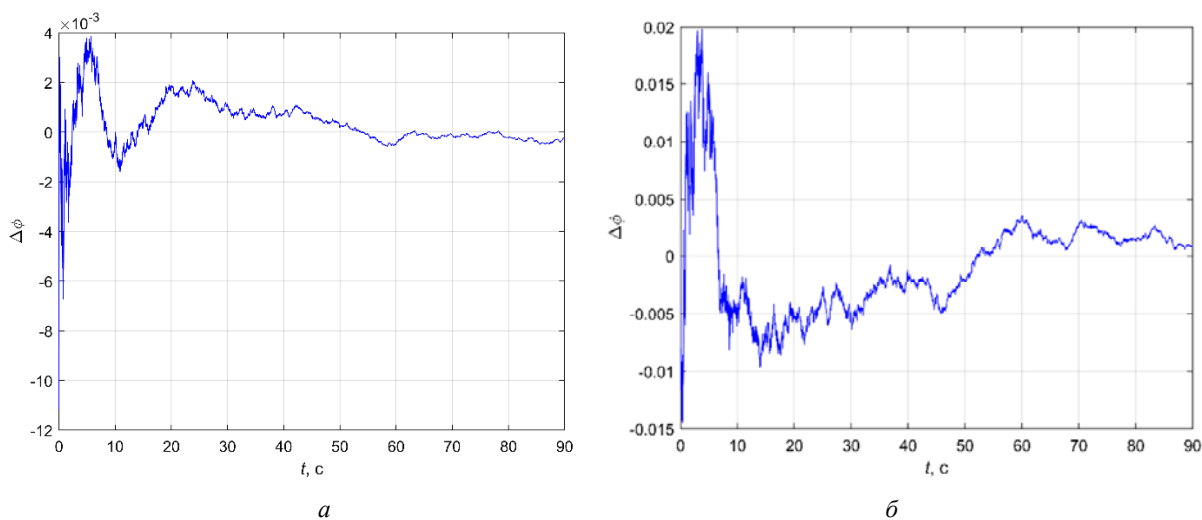


Рис. 4. Графики $\Delta\varphi$ при различных уровнях интенсивности шума

Fig. 4. Graphics of $\Delta\varphi$ at different levels of noise intensity

На рис. 5 представлены диагональные элементы матрицы ковариации при $R_{11}(0) = 0,017$; $R_{22}(0) = 0,0002$; $R_{33}(0) = 0,001$; $R_{44}(0) = 0$. Достаточно быстро они приходят к установившемуся значениям. Было проведено моделирование при различных начальных значениях диагональных элементов матрицы ковариации и разной интенсивности шумов измерений, фильтр Калмана успешно обработал все варианты.

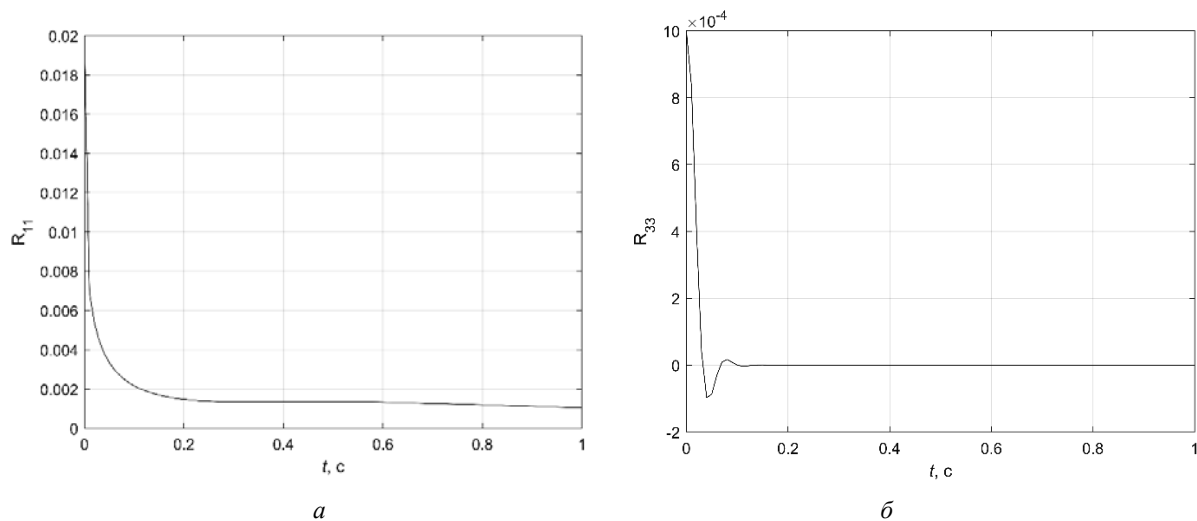


Рис. 5. Графики: а – $R_{11}(t)$; б – $R_{33}(t)$

Fig. 5. Graphics: a – $R_{11}(t)$; b – $R_{33}(t)$

Для минимизации энергетических затрат было предложено периодически отключать работу датчиков и оценку состояния на этих участках вычислять путем прогнозирования с использованием уравнений (3), (4) при $B_{z1}^{-1} = 0$ и $B_{z2}^{-1} = 0$. Это позволило успешно решать задачу управления при меньших энергетических затратах. При отключении датчиков не затрачивается энергия на их функционирование и передачу данных.

На рис. 6 представлен график $R_{11}(t)$

$$\dot{R}_{11} = -R_{11}^2 B_{z1}^{-1} - R_{13}^2 b_1 B_{z2}^{-1} + 2R_{12} + B_{x1}$$

при периодическом отключении измерений с датчиков. Каждый раз при включении измерений элементы ковариационной матрицы достигают установившегося значения. В уравнении для \dot{R}_{11} слагаемые $R_{11}^2 B_{z1}^{-1}$ и $R_{13}^2 b_1 B_{z2}^{-1}$ характеризуют скорость поступления информации, их отсутствие при отключении измерений приводит к возрастанию R_{11} .

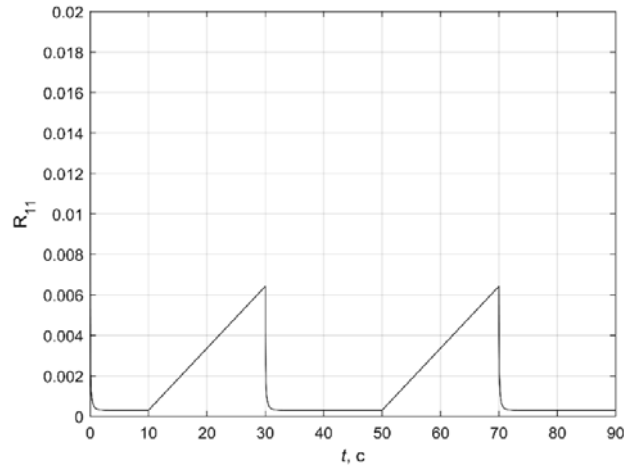


Рис. 6. График $R_{11}(t)$

Fig. 6. Graphic $R_{11}(t)$

Для успешного решения задачи и точного выполнения терминальных условий необходимо включение датчиков измерения состояния системы на конечном отрезке интервала оптимизации. Чем больше время включения датчиков в конце моделирования, тем точнее удаётся решить поставленную задачу. Определение оптимального интервала включения измерений является самостоятельной научно-технической задачей. При возрастании интенсивности внешних возмущений \mathbf{V}_x необходимо измерять состояние системы более длительное время. При заданном $\mathbf{V}_x = \text{diag}(0,02, 0, 0,0001, 0)$ для успешного решения задачи достаточно включения датчиков на участке с 85 по 90 с. При увеличении значений возмущений вдвое необходимо увеличить время наблюдений на конечном участке до 15 с. Время работы датчиков зависит от вида и интенсивности внешних возмущений, требований к величине допустимых энергетических затрат. В результате статистического моделирования оценка математического ожидания критерия (5) $M(J_1) = 0$, критерия (6) $M(J_2) = 0,035$, где для одного из вариантов получено следующее значение $\varphi(t_f) = 1,576$.

Отдельной задачей стоит определение времени отключения датчиков измерения углового положения спицы и величины прогиба независимо друг от друга. Так, для выполнения терминального условия по углу φ при заданных возмущениях необходимо осуществлять наблюдение последние 5 с моделирования, тогда как для выполнения требований для прогиба h достаточно 3 с наблюдений. Величины φ и h зависят от приложенного момента M . Значение h в конце раскрытия при выбранном управлении не превышает $5 \cdot 10^{-5}$ м, что соответствует точности датчика. Поэтому значением прогиба в конечный момент времени можно пренебречь.

Заключение

В результате проделанной работы было подтверждено решение задачи оптимального управления стохастической моделью раскрытия спицы КТР по неполным данным с использованием принципа разделения. Использование алгоритма последовательной оптимизации при полученных оцененных с помощью фильтра Калмана данных позволило решить поставленную задачу

при различных интенсивностях возмущений и шумов измерений. Интервальное выключение измерений позволяет снизить энергозатраты на питание датчиков и обработку измерений. Дальнейшие работы предполагают поставить и решить задачу оптимизации интервалов наблюдений для минимизации энергетических затрат [23].

Представленные исследования доложены на XXII Международной научной конференции «Системный анализ, управление и навигация» [24].

Библиографические ссылки

1. Puig, L., Barton, A., Rando, N. A review on large deployable structures for astrophysics missions. *Acta Astronautica*. 2019. Vol. 67(1). P. 12–26.
2. Полянский И. С., Архипов Н. С., Мисюрин С. Ю. О решении проблемы оптимального управления адаптивной многолучевой зеркальной антенной // *Автомат. и телемех.* 2019. № 1. С. 83–100.
3. Статический и модальный анализ силовой конструкции прецизионного крупногабаритного антенного рефлектора из полимерных композиционных материалов / А. Ю. Власов, Н. А. Амельченко, К. А. Пасечник и др. // *Сибирский журнал науки и технологий*. 2017. № 4. С. 897–901.
4. Nie R., He B., Zhang L. Deployment dynamics modeling and analysis for mesh reflector antennas considering the motion feasibility // *Nonlinear Dyn.* 2018. Vol. 91. P. 549–564.
5. Thomson M. W. The AstroMesh Deployable Reflector. IUTAM-IASS Symposium on Deployable Structures: Theory and Applications. 2000. P. 435–446.
6. Dynamics of a deployable mesh reflector of satellite antenna: form finding and modal analysis / P. Li, C. Liu, Q. Tian // *J Comput. Nonlinear Dyn.* 2016. Vol. 11(4). P. 549–564.
7. Резник С. В., Чубанов Д. Е. Моделирование динамики раскрытия крупногабаритного трансформируемого рефлектора космической антенны из композиционного материала // *Вестник Рос. ун-та дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2018. Т. 19, № 4. С. 411–425.
8. Бакулин В. Н., Борзых С. В. Моделирование динамики процесса раскрытия крупногабаритных трансформируемых космических конструкций // *Изв. высш. учебн. завед. Авиационная техника*. 2020. № 4. С. 50–56.
9. Разработка расчетно-экспериментального метода модального анализа / В. А. Бернс, В. Е. Левин, Д. А. Красноруцкий и др. // *Космические аппараты и технологии*. 2018. Т 2, № 3(25). С. 125–133.
10. Кабанов С. А., Зимин Б. А., Митин Ф. В. Разработка и анализ математических моделей раскрытия подвижных частей трансформируемых космических конструкций. Ч. I // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2020. Т. 20, № 1. С. 51–64.
11. Kabanov S. A., Mitin F. V. Optimization of the stages of deploying a large-sized space-based reflector // *Acta Astronautica, Special Issue on 6th SFS 2019*. 2020. Vol. 176. P. 717–724.
12. Development for petal-type deployable solid-surface reflector by uniaxial rotation mechanism / H. Huang, Q. Cheng, L. Zheng, Y. Yang // *Acta Astronautica*. 2021. No. 178. P. 511–521.
13. Ишков В. Н. Воздействие солнечных активных явлений на околоземное космическое пространство и возможность их прогноза // *Сложные системы*. 2012. № 4 (5). С. 21–41.
14. Влияние солнечной активности на магнитосферу Земли / Б. Б. Михалыев, С. Б. Дертеев, И. Ю. Лагаев, Т. Т. Осмонов // *Актуальные проблемы современной физики и математики*. 2017. С. 92–97.
15. Кабанов С. А., Митин Ф. В. Оптимизация процессов раскрытия и создания формы трансформируемого рефлектора космического базирования // *Изв. РАН. ГиСУ*. 2021. № 2. С. 106–125.
16. Кабанов С. А., Кабанов Д. С. Управление разведением спиц крупногабаритного трансформируемого рефлектора с использованием алгоритма последовательной оптимизации // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2021. № 22(8). С. 433–441.

17. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. М. : Наука, 1987. 712 с.
18. Кабанов С. А. Оптимизация динамики систем при действии возмущений. М. : Физматлит, 2008. 200 с.
19. Кабанов Д. С. Оптимальное управление ядерным реактором с учетом случайных возмущений // Приборостроение. 2009. № 5. С. 27–30.
20. Микропривод [Электронный ресурс]. URL: <http://www.microprivod.ru/catalog/phytron/seriya-vssspase-dlya-raboty-i-v-kosmose,diametr-19-125-mm.html> (дата обращения 10.10.2021).
21. Пинтер-Плоттер.ру [Электронный ресурс]. URL: <https://printer-plotter.ru/3d-oborudovanie/3d-scanners/rangevision/?yclid=5975775935832053836> (дата обращения 10.10.2021).
22. СКБ ИС [Электронный ресурс]. URL: <http://www.skbis.ru/index.php?p=3&c=18&d=128> (дата обращения 10.10.2021).
23. Малышев В. В., Красильщиков М. Н., Карлов В. И. Оптимизация наблюдения и управления летательных аппаратов. М. : Машиностроение, 1989. 312 с.
24. Оптимальное управление разведением спицы трансформируемого рефлектора при наличии возмущений / С. А. Кабанов, Д. С. Кабанов, Е. Н. Никулин, Ф. В. Митин // Системный анализ, управление и навигация : тез. докладов. М. : Изд-во МАИ, 2021. С. 168–169.

References

1. Puig L., Barton A., Rando N. A review on large deployable structures for astrophysics missions. *Acta Astronautica*. 2019, Vol. 67(1), P. 12–26.
2. Polyanskij I. S., Arhipov N. S., Misyurin S. Y. [On the solution of the problem of optimal control of an adaptive multi-beam reflector antenna]. *Avtomat. i telemekh.* 2019, No. 1, P. 83–100 (In Russ.).
3. Vlasov A. Y., Amel'chenko N. A., Pasechnik K. A., Titov M. A., Serzhantova M. V. [Static and modal analysis of the power construction of the precision large-sized antenna reflector from polymer composite materials]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2017, No. 4, P. 897–901 (In Russ.).
4. Nie R., He B., Zhang L. Deployment dynamics modeling and analysis for mesh reflector antennas considering the motion feasibility. *Nonlinear Dyn.* 2018, Vol. 91, P. 549–564.
5. Thomson M. W. The AstroMesh Deployable Reflector. *IUTAM-IASS Symposium on Deployable Structures: Theory and Applications*. 2000, P. 435–446.
6. Li P., Liu C., Tian Q., Hu H., Song Y. Dynamics of a deployable mesh reflector of satellite antenna: form finding and modal analysis. *J Comput. Nonlinear Dyn.* 2016, Vol. 11(4), P. 549–564.
7. Reznik S. V., Chubakov D. E. [Large-sized transformable space antenna reflector made of composite materials dynamic modeling process]. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2018, Vol. 19(4), P. 411–425 (In Russ.).
8. Bakulin V. N., Borzyh S. V. [Modeling the dynamics of the process of deployment large-sized transformable space structures]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Aviacionnaya tekhnika*. 2020, No. 4, P. 50–56 (In Russ.).
9. Berns V. A., Levin V. E., Krasnorutsky D. A., Marinin D. A., Zhukov E. P., Malenkova V. V., Lakiza P. A. [Development of a calculation and experimental method for modal analysis of large transformable space structures]. *Spacecrafts & Technologies*. 2018, Vol. 2, No. 3, P. 125–133 (In Russ.).
10. Kabanov S. A., Zimin B. A., Mitin F. V. [Development and Research of Mathematical Models of Deployment of Mobile Parts of Transformable Space Construction. Part I]. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2020, Vol. 21, No. 1, P. 51–64 (In Russ.).
11. Kabanov S. A., Mitin F. V. Optimization of the stages of deploying a large-sized space-based reflector. *Acta Astronautica, Special Issue on 6th SFS 2019*. 2020, 176, P. 717–724.
12. Huang H., Cheng Q., Zheng L., Yang Y. Development for petal-type deployable solid-surface reflector by uniaxial rotation mechanism. *Acta Astronautica*. 2021, No. 178, P. 511–521.

13. Ishkov V. N. [Solar geoeffective phenomena: Action on the near-earth outer space and the possibility of the forecast]. *Slozhnye sistemy*. 2012, No. 4 (5), P. 21–41 (In Russ.).
14. Mihalyaev B. B., Derteev S. B., Lagaev I. Y., Osmonov T. T. [Vliyanie solnechnoj aktivnosti na magnitosferu Zemli]. *V sbornike: Aktual'nye problemy sovremennoj fiziki i matematiki. trudy*. 2017, P. 92–97 (In Russ.).
15. Kabanov S. A., Mitin F. V. Optimization of the Processes of Deployment and Shape Generation for a Transformable Space-Based Reflector. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2021, Vol. 60, No. 2, P. 283–302.
16. Kabanov S. A., Kabanov D. S. [Deployment the Spoke of a Large-Sized Transformable Reflector Using a Sequential Optimization Algorithm]. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2021, Vol. 22(8), P. 433–441 (In Russ.).
17. *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravlenija. Pod red. A. A. Krasovskogo* [Handbook on the theory of automatic control. Ed. by A. A. Krasovskij]. Moscow, Nauka Publ., 1987, 712 p.
18. Kabanov S. A. *Optimizaciya dinamiki sistem pri dejstvii vozmushchenij* [Optimization of the dynamics of systems under the action of disturbances]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008, 200 p.
19. Kabanov D. S. [Optimal control of a nuclear reactor taking into account random disturbances]. *Journal of instrument engineering*. 2009, No. 5, P. 27–30 (In Russ.).
20. *Mikroprivod* [Microdrive]. Available at: <http://www.microprivod.ru/catalog/phytron/seriya-vssspase-dlya-raboty-v-kosmose,diametr-19-125-mm.html> (accessed: 10.10.2021).
21. *Pinter-Plotter.ru* [Pinter Plotter.ru]. Available at: <https://printer-plotter.ru/3d-oborudovanie/3d-scanners/rangevision/?yclid=5975775935832053836> (accessed: 10.10.2021).
22. *SKB IS* [SKB IS]. Available at: <http://www.skbis.ru/index.php?p=3&c=18&d=128> (accessed: 10.10.2021).
23. Malyshev V. V., Krasil'shchikov M. N., Karlov V. I. *Optimizaciya nablyudeniya i upravleniya letatel'nyh apparatov* [Optimization of surveillance and control of aircraft]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, 312 p.
24. Kabanov S. A., Kabanov D. S., Nikulin E. N., Mitin F. V. [Optimal control of deployment of the spoke of a transformable reflector in the presence of disturbance]. *Sistemnyj analiz, upravlenie i navigaciya: Tezisy dokladov*. Moscow, Izd-vo MAI Publ., 2021, P. 168–169.

© Кабанов С. А., Кабанов Д. С., Никулин Е. Н., Митин Ф. В., 2021

Кабанов Сергей Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры систем управления и компьютерных технологий; БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. E-mail: kaba-sa@mail.ru.

Кабанов Дмитрий Сергеевич – кандидат технических наук, научный сотрудник; НИЛ РИУС БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. E-mail: kabanovds@mail.ru.

Никулин Евгений Николаевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора Института систем вооружения; БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. E-mail: nikulin_en@voenmeh.ru.

Митин Фёдор Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры систем управления и компьютерных технологий; БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. E-mail: fedor28@list.ru.

Kabanov Sergey Aleksandrovich – Dr. Sc., Professor; Department of Control Systems and Computer Technologies, Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D. F. Ustinov. E-mail: kaba-sa@mail.ru.

Kabanov Dmitriy Sergeevich – Cand. Sc., researcher, NIL RIUS; Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D. F. Ustinov. E-mail: kabanovds@mail.ru.

Nikulin Evgeniy Nikolaevich – Dr. Sc., Professor, Deputy Director of the Institute of Weapon Systems; Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D. F. Ustinov. E-mail: nikulin_en@voenmeh.ru.

Mitin Fedor Vasilyevich – Cand. Sc., Associate Professor, Department of Control Systems and Computer Technologies; Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D. F. Ustinov. E-mail: fedor28@list.ru.

УДК 621.454.2

Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-660-671

Для цитирования: Сравнительный анализ верифицированного численного моделирования кавитации на основе модели Рэлея – Плессета к насосам ТНА жидкостного ракетного двигателя / А. С. Торгашин, Д. А. Жуйков, В. П. Назаров и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 4. С. 660–671. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-660-671.

For citation: Torgashin A. S., Zhujkov D. A., Nazarov V. P., Begishev A. M., Vlasenko A. V. Comparative analysis of verified numerical simulation of cavitation based on the Rayleigh – Plesset model for liquid propellant rocket engine pumps. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 4, P. 660–671. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-660-671.

Сравнительный анализ верифицированного численного моделирования кавитации на основе модели Рэлея – Плессета к насосам ТНА жидкостного ракетного двигателя

А. С. Торгашин^{*}, Д. А. Жуйков, В. П. Назаров, А. М. Бегишев, А. В. Власенко

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

^{*}E-mail: ttarg23@yandex.ru

Турбонасосный агрегат (ТНА) – один из основных агрегатов жидкостного ракетного двигателя (ЖРД). Обеспечение работоспособности и возможности непрерывной подачи компонентов горючего и окислителя с заданным расходом и давлением на протяжении всего цикла работы ЖРД – одна из основных задач при проектировании ТНА. Негативным эффектом, проявляющимся в случае местного понижения давления до давления насыщенного пара, является кавитация.

В настоящее время в связи с ростом вычислительных мощностей современных компьютерных систем все чаще применяются методы вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD) для отработки антикавитационных параметров насоса в различных областях общего машиностроения. Применительно к ракетно-космической отрасли, отличающейся особыми требованиями к надежности, необходимо большее количество статистических данных. На данный момент нет модели кавитации, способной полностью смоделировать весь процесс зарождения, роста и схлопывания кавитационного пузыря. Однако существует ряд упрощённых моделей данного процесса, среди которых можно выделить численную модель Zwart – Gerber – Belamri, предназначенную для моделирования кавитационного потока в насосах. Упомянутая модель является наиболее подходящей и применяется во всех рассмотренных далее работах.

В данной работе проведён анализ экспериментальных данных и результатов численного моделирования насосов с различными параметрами расхода, давления и геометрии. В ходе работ с моделью расчёты произведены в среде ANSYS. В заключительной части сделан вывод о взаимосвязи характеристик и применимости модели Zwart – Gerber – Belamri к проектированию кавитационного потока в ТНА ЖРД с учетом особенности работы насоса.

Ключевые слова: кавитация, ТНА, ЖРД, CFD моделирование.

Comparative analysis of verified numerical simulation of cavitation based on the Rayleigh – Plesset model for liquid propellant rocket engine pumps

A. S. Torgashin^{*}, D. A. Zhujkov, V. P. Nazarov, A. M. Begishev, A. V. Vlasenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
^{*}E-mail: ttarg23@yandex.ru

The turbopump unit is one of the main units of a liquid propellant rocket engine. Ensuring the operability and the possibility of continuous supply of fuel and oxidizer components with a given flow rate and pressure throughout the entire operation cycle of a liquid-propellant rocket engine is one of the main tasks in the design of a heat pump. A negative effect that manifests itself in the case of a local decrease in pressure to the pressure of saturated steam is cavitation.

Currently, in connection with the growth of the computing power of modern computer systems, the methods of computational fluid dynamics (Computational Fluid Dynamics, CFD) are increasingly being used to test the anti-cavitation parameters of the pump in various areas of general mechanical engineering. For the rocket and space industry, which has special requirements for reliability, more statistical data is needed. At the moment, there is no cavitation model capable of fully simulating the entire process of nucleation, growth and collapse of a cavitation bubble. However, there are a number of simplified models of this process, among which we can single out the numerical model Zwart – Gerber – Belamri, designed to simulate the cavitation flow in pumps. The mentioned model is the most suitable and is applied in all the works discussed below.

This paper analyzes the experimental data and the results of numerical simulation of pumps with various parameters of flow, pressure and geometry. In the course of work with the model, calculations were performed in the ANSYS environment. In the final part, a conclusion was made about the relationship between the characteristics and applicability of the Zwart – Gerber – Belamri model to the design of the cavitation flow in the HPA LPRE taking into account the peculiarities of the pump operation.

Keywords: Cavitation, TNA, LRE, CFD modeling.

Введение

Работа турбонасосного агрегата (ТНА) в составе жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) отличается повышенными требованиями к обеспечению работоспособности и поддержанию основных параметров при заданном ресурсе. Основное назначение ТНА – обеспечение непрерывной подачи компонентов топлива в камеру сгорания двигателя. На обеспечение работы ТНА может повлиять ряд факторов, например, локальное понижение давления жидкости, возникающее при обтекании профиля лопатки насоса. Данная область насоса может являться местом зарождения кавитации. Кавитацией называют фазовый переход жидкости в газ внутри жидкости при определенных температуре и давлении, который возникает в движущейся жидкости вследствие местных понижений давления до давления насыщенного пара. Нестабильность работы ТНА при кавитационном режиме за счет нарушения режима сплошности среды может повлиять на КПД и создаваемый удельный импульс ракетного двигателя [1].

При проектировании ТНА возникает необходимость проведения ряда модельных испытаний с целью отработки параметров насоса, а также подтверждения антикавитационных качеств насосов. Отработка режимов работы насоса при воздействии кавитации может проводиться как на испытательных установках с отработкой на модельной жидкости, так и при помощи различных методов численного моделирования в программах вычислительной гидродинамики (CFD).

На данный момент представлено достаточно большое количество различных программных пакетов, позволяющих численно смоделировать кавитацию при обтекании лопаток насосов, турбин, гидрокрыла водного судна или же при течении жидкости в различных сложных геометриях. Моделирование кавитационного потока может хорошо дополнить натурные испытания. Однако, несмотря на большую базу данных по уже проведенным испытаниям, повышенная энергонапряженность ТНА, как агрегата ЖРД, ставит вопрос об аппроксимации текущих данных к моделированию течения в насосе.

В пакете ANSYS для моделирования кавитационного течения представлен ряд моделей, основанных на уравнении Рэлея – Плессета. В данной работе рассматриваются результаты, основанные на применении модели кавитации Zwart – Gerber – Belamri, совместимой со всеми доступными в пакете ANSYS моделями турбулентности. Как и все модели физического явления, она обладает рядом ограничений [2]:

- предполагается, что происходит массообмен между жидкой и паровой фазами. В модели кавитации учитывается как образование пузырьков (испарение), так и схлопывание (конденсация);
- модель кавитации учитывает рост одиночного пузырька пара в жидкости;
- модель по умолчанию не учитывает влияние неконденсирующихся газов.

Теоретическая модель

Перед анализом данных рассмотрим уравнения, входящие в модель Zwart – Gerber – Belamri, основанные на уравнении Рэлея – Плессета. Впервые данное уравнение, описывающее полное превращение работы (совершаемой массой при схлопывании каверны) в кинетическую энергию, было представлено в работе [3]:

$$\rho \left(RR_{TT} + \frac{3}{2} R_T^2 \right) = -p, \quad (1)$$

где p – давление; R – радиус пузырька; ρ – плотность жидкости вокруг пузырька пара; R_T и R_{TT} – производные радиуса по времени. В работе [4] Плессет привел уравнение, описывающее рост газового пузырька в жидкости и выводимое из уравнений моментов:

$$R_B \frac{d^2 R_B}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR_B}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{\rho_f R_B} = \frac{p_v - p}{\rho_f}, \quad (2)$$

где R_B – радиус пузырька; p_v – давление в пузырьке (предполагается, что это давление пара при температуре жидкости); p – давление в жидкости, окружающей пузырь; ρ_f – плотность жидкости; σ – коэффициент поверхностного натяжения между жидкостью и паром.

В программном пакете ANSYS данная модель упрощается [2]. В ней не учитывается сила поверхностного натяжения и все уравнения второго порядка, так как данные уравнения используются для низкочастотных колебаний

$$\frac{d\mathfrak{R}_B}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P_v - P}{\rho_f}}. \quad (3)$$

Именно данную модель рассматривали авторы Philip J. Zwart, Andrew G. Gerber, Thabet Belamri в статье [5]. Выражая через N_B количество пузырьков, объемную долю пара на единицу объема можно выразить как

$$r_v = V_B N_B = \frac{4}{3} \pi R_B^3 N_B, \quad (4)$$

где R_B – радиус пузырька в жидкости. Общая скорость межфазного массопереноса из-за кавитации на единицу объема будет равна

$$S_{lv} = \frac{3r_v \rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P_v - P}{\rho_l}}. \quad (5)$$

Для случая конденсации уравнение выражается следующим образом:

$$S_{lv} = F \frac{3r_v \rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|P_v - P|}{\rho_l}} \text{sign}(P_v - P), \quad (6)$$

где F – эмпирический калибровочный коэффициент. Предполагая, что кавитационные пузырьки не взаимодействуют друг с другом, авторы статьи [5] заменили r_v на $r_{nuc} (1 - r_v)$ для случая испарения, где r_{nuc} – объемная доля центра образования пузырьков кавитации. Окончательный вид модели кавитации:

$$S_{lv} = \begin{cases} F_{vap} \frac{3r_{nuc}(1-r_v)\rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P_v - P}{\rho_l}} & \text{if } P < P_v, \\ F_{cond} \frac{3r_v \rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P - P_v}{\rho_l}} & \text{if } P > P_v. \end{cases} \quad (7)$$

Для данной модели применяются следующие значения: $R_B = 10^{-6}$ м, $r_{nuc} = 5 \cdot 10^{-4}$, $F_{vap} = 50$ и $F_{cond} = 0,01$.

Вышеописанная модель кавитации включается в уравнение переноса пара:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha p_v) + \nabla(\alpha p_v \vec{V}_v) = R_e - R_c, \quad (8)$$

где α – объемная доля пара; ρ_v – плотность пара; V_v – скорость паровой фазы; R_e , R_c – источники массообмена, связанные с ростом и схлопыванием пузырьков пара соответственно (моделируются на основе уравнения Рэлея – Плессета).

Также рассмотрим уравнения, входящие в модель турбулентности. Известно, что течение жидкостей и газов в природе можно разделить на два вида: ламинарное и турбулентное. Если первое течение характеризуется стабильностью параметров или, в крайнем случае, плавностью их изменения, то для турбулентного течения П. Брэндшоу приводит следующее определение турбулентности [6]: «Турбулентность – это трехмерное нестационарное движение, в котором вследствие растяжения вихрей создается непрерывное распределение пульсаций скорости в интервале длин волн от минимальных, определяемых вязкими силами, до максимальных, определяемых граничными условиями течения. Она является обычным состоянием движущейся жидкости, за исключением течений при малых числах Рейнольдса».

В основе моделей турбулентного потока, используемых в ANSYS, лежит теория Л. Прандтля и работы А. Н. Колмогорова. Теория Прандтля основана на вычислении смещения потока через отношение скорости переноса количества движения между соседними слоями к длине элементарной площадки, причем скоростью переноса служит поперечная пульсационная скорость. Колмогоров в статье [7] предложил систему уравнений для турбулентного режима, легшую в основу описываемой далее модели. В статье [8] авторы В. Е. Launder и D. В. Spalding описали модель турбулентности, основанную на системе из уравнения для кинетической энергии турбулентности k :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - p\varepsilon - Y_M + S_k. \quad (9)$$

Уравнение для значения ε (скорость диссипации энергии турбулентности) можно получить из уравнения Навье – Стокса, но данное уравнение получается незамкнутым. Для замыкания необходимо представить уравнение в следующей записи:

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon. \quad (10)$$

В данных уравнениях, $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$ – коэффициент турбулентной вязкости; G_k – прирост кинетической энергии турбулентности из-за градиентов средней скорости; G_b – прирост кинетической энергии турбулентности за счет плавучести; Y_M – вклад флуктуирующей дилатации в сжимаемой турбулентности в общую скорость диссипации. $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$ и $C_{\varepsilon 3}$ – константы; σ_k и σ_ε – турбулентные числа Прандтля для k и ε соответственно; S_k и S_ε – задаваемые значения. В ANSYS [2] для констант принимаются следующие значения: $C_{\varepsilon 1} = 1,44$, $C_{\varepsilon 2} = 1,92$ и $C_\mu = 0,009$, $\sigma_k = 1,0$ и $\sigma_\varepsilon = 1,3$.

Важно отметить, что в статье [5] обращается внимание на то, что стандартные модели турбулентности не могут правильно предсказать колебательное поведение потока. Для этого авторы использовали модифицированную формулу коэффициента турбулентной вязкости

$$\mu_{tm} = f(\rho) C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (11)$$

где $f(\rho) = \rho_v + ((\rho_v - \rho_m) / (\rho_v - \rho_l))^n \cdot (\rho_l - \rho_v)$.

Рассмотрение статистики по испытаниям различных насосов

Необходимо отметить, что в рассматриваемых геометрических моделях не применялся преднасос для повышения антикавитационных качеств насоса (в статье [9] он применялся при эксперименте, но не в модели). В модельных испытаниях ТНА ЖРД преднасос устанавливался, что также необходимо отразить в геометрической модели при численном моделировании кавитационного потока.

В статье [5], в которой впервые представлена модель Zwart – Gerber – Belamri, авторы также рассматривают применение данной модели к геометрии, схожей с рассматриваемыми насосами (случай кавитации в преднасосе). Проводится сравнение экспериментальных данных с моделированием. Авторы отмечают, что вблизи номинального режима работы ($Q / Q_n = 1,03$), падение напора на кривой происходит быстрее и одновременно с экспериментальными измерениями.

В статье [9] авторы рассматривают вопрос численного моделирования колебаний в центробежном насосе при малом расходе. В качестве модели турбулентности применяется модель RNG k- ε . Расчетные параметры также приведены в таблице. Результаты гидравлических испытаний показаны на рис. 1. Авторы проводят расчёты в среде ANSYS CFX с числом ячеек 1562765, а также проводят сравнение полученных напоров H при числах ячеек 1562765, 1837613, 2129429, 2375885, 2629005. Напор при числе ячеек 1562765 отличится от напора при числе ячеек 2629005 в 1,008535 раза, что говорит о малом влиянии числа ячеек на точность расчета, при превышении их суммы определённого предела.

Значение NPSH (Net Positive Suction Head) на рис. 1 – чистый гидравлический напор или кавитационный запас, измеряемый высотой столба жидкости на входе в насос, NPSHa – располагаемое значение напора на входном патрубке насоса за вычетом давления насыщенного пара жидкости

$$NPSHa = \frac{p_{in}}{\rho_l g} + \frac{u_{in}^2}{2g} - \frac{p_v}{\rho_l g}, \quad (12)$$

где p_{in} – давление на входе в насос; u_{in} – скорость на входе в насос; p_v – давление насыщенного пара.

В статье [10] авторы берут за основу для сравнения данные гидравлического пролива спроектированного центробежного насоса, расчетные параметры для которого представлены

в таблице. В качестве модели турбулентности выбирают модель турбулентности RNG k-ε, модифицированную на основе идеи Йохансена. Полученные параметры для номинального режима представлены на рис. 2. Анализ параметров показывает хорошую сходимость экспериментальных данных с результатами моделирования. Причиной же расхождения авторы считают:

- отсутствие учета зазора между лопатками и корпусом, потерь на расширения воды в коллекторе выхода;
- принятые допущения в доступной модели кавитации.

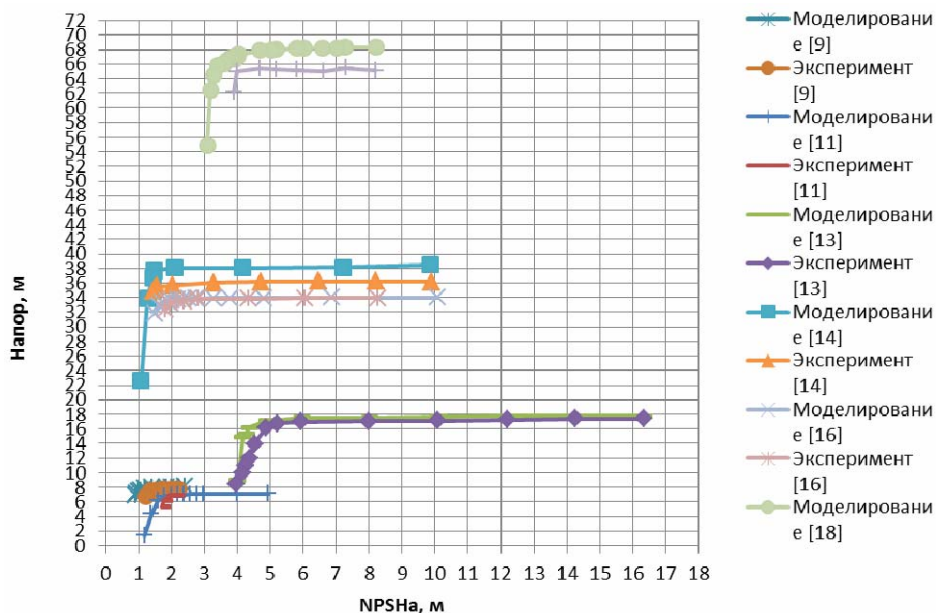


Рис. 1. Сводный график напоров

Fig. 1. Summary head graph

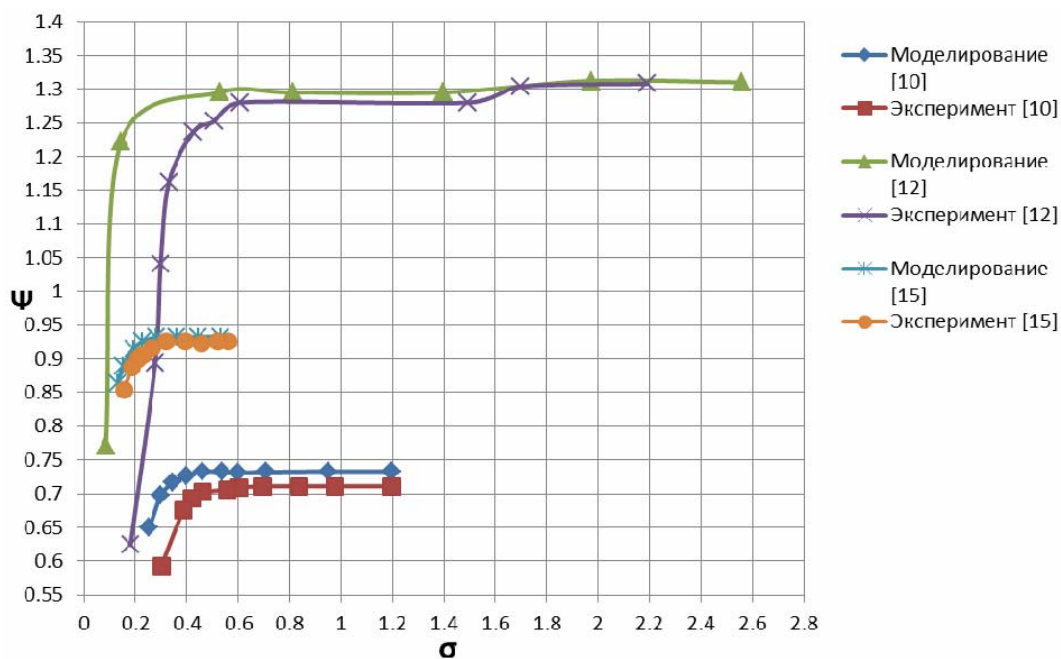


Рис. 2. Сводный график чисел кавитации

Fig. 2. Summary graph of cavitation numbers

Значение Ψ – коэффициент напора, выражается формулой

$$\Psi = \frac{H}{\frac{u_2^2}{2g}}, \quad (13)$$

где H – напор насоса; u_2 – окружная скорость на выходе. Число кавитации σ выражается формулой

$$\sigma = \frac{P_{in} - P_v}{0,5\rho_l u_2^2}. \quad (14)$$

В статье [11] исследуются колебания давления в насосе при кавитационном режиме. В качестве модели турбулентности используется модель RNG k- ϵ . В работе приведена геометрическая модель насоса, аналогичная модели из статьи [9], но режим работы рассматривался при номинальном расходе. Данные о результатах реального эксперимента и численного моделирования приведены на рис. 1. Используемая для расчетов сетка состоит из 1,56 млн элементов.

В статье [12] также исследуются кавитационные явления в центробежном насосе. В качестве модели турбулентности применяется модель SST k- ϵ . При исследовании, авторы выбрали модель центробежного насоса с малым значением коэффициента быстроходности, расчетные параметры которого приведены в таблице. Результаты гидравлических испытаний показаны на рис. 2 (значение Ψ было рассчитано по имеющимся данным в статье, так как в статье приводится только значение напора). Используемая для расчетов сетка состоит из 1180228 элементов.

В статье [13] исследуется влияние кавитации на производительность насоса. Авторы выбрали для исследования насос AP1400, отличающийся высокими показателями расхода. Используемая модель турбулентности – RNG k- ϵ . Данные о результатах реального эксперимента и числового моделирования также приведены на рис. 1. Расчетная сетка состоит из 5,9 млн элементов.

В статье [14] исследуется производительность и кавитационное течение в насосе. Авторы использовали геометрическую модель насоса, расчетные характеристики которого представлены в таблице. В качестве модели турбулентности применяется модель SST k- ϵ . График численного моделирования и эксперимента представлен на рис. 1 (в работе [14] по оси y указано отношение напоров, для графика взято значение напора из статьи, умноженное на H_d). Расчетная сетка состоит из 3,02 млн элементов.

В статье [15] проводится исследование влияния кавитации на усовершенствованную лопатку колеса насоса. Авторы использовали геометрическую модель насоса, расчетные характеристики которого представлены в таблице. График численного моделирования и эксперимента представлен на рис. 2. Авторы также провели сравнение полученного напора при различном числе элементов в геометрической модели: 5, 9,1, 12 и 20 млн. Результаты показывают максимальное отклонение коэффициента напора в 1,12 %. Используемая сетка состоит из 12 млн элементов.

В статье [16] исследуется вопрос моделирования кавитации в насосе. В качестве модели турбулентности применяется модель SST k- ϵ . График численного моделирования и эксперимента представлен на рис. 1. Аналогично рассмотренной ранее работе [14], в работе [16] по оси y указано отношение напоров. Для графика на рис. 1 взято значение напора из статьи, умноженное на H_d . Расчетные характеристики насоса представлены в таблице. На основании работ, проведенных авторами в [17], утверждается об относительной независимости решения от количества элементов сетки. В связи с этим, в расчетной модели насоса в статье [16] используется сетка из 5207832 элементов. Авторы также заявляют о хорошей сходимости практических результатов с результатами моделирования.

В статье [18] рассматривается кавитация в насосах двустороннего входа. Данное исполнение рабочего колеса насоса также применяется и при проектировании ТНА для ЖРД ракет. Авто-

рами выбран для исследования насос двустороннего входа ES8-300KPS. В качестве модели турбулентности применяется модель k-ε. График численного моделирования и эксперимента представлен на рис. 1, расчетные характеристики насоса двустороннего входа представлены в таблице. Расчетная сетка состоит из 4198349 элементов.

Сравнительная таблица насосов

№ п/п	Статья/ насос	Наименование характеристики	Значение параметра
1	Спроектированный насос из статьи [10]	Номинальный расход	32,8 м ³ /ч
		Коэффициент быстроходности	135
		Угловая скорость	1450 об/мин
		Число лопаток	5
		Внешний диаметр D ₂	0,169 м
		Ширина колеса на выходе	0,014 м
2	Спроектированный насос из статьи [9] и [11]	Номинальный расход	25 м ³ /ч
		Напор	7 м
		Угловая скорость	1450 об/мин
		Число лопаток	7
		Внутренний диаметр D ₁	50 мм
		Внешний диаметр D ₂	160 мм
3	Спроектированный насос из статьи [12]	Номинальный расход	8,6 м ³ /ч
		Коэффициент быстроходности	32
		Угловая скорость	500 об/мин
		Число лопаток	6
		Внешний диаметр D ₂	310 мм
		Внутренний диаметр D ₁	80 мм
4	Насос AP1400 [13]	Номинальный расход	1385 м ³ /ч
		Напор	17,8 м
		Угловая скорость	1485 об/мин
		Число лопаток	18
5	Спроектированный насос из статьи [14]	Номинальный расход	25 м ³ /ч
		Напор	36 м
		Коэффициент быстроходности	60
		Угловая скорость	2900 об/мин
		Число лопаток	5
		Внешний диаметр D ₂	172 мм
		Внутренний диаметр D ₁	65 мм
		Ширина колеса на выходе	12 мм
6	Спроектированный насос из статьи [15]	Номинальный расход	200 м ³ /ч
		Напор	20 м
		Угловая скорость	1450 об/мин
		Число лопаток	6
		Внешний диаметр D ₂	270 мм
		Внутренний диаметр D ₁	150 мм
		Ширина колеса на выходе	30 мм
7	Спроектированный насос из статьи [16]	Номинальный расход	50 м ³ /ч
		Напор	34 м
		Угловая скорость	2900 об/мин
		Число лопаток	6
		Коэффициент быстроходности	88,6
8	Спроектированный насос ES8-300KPS из статьи [18]	Номинальный расход	820 м ³ /ч
		Напор	64 м
		Угловая скорость	1480 об/мин
		Число лопаток	6

Рассмотрим графики на рис. 1. Если принять за начало кавитации 3 % падение напора, то можно сделать следующие выводы.

1. Начало кавитации для моделирования фиксируется при меньшем значении NPSHa по сравнению с экспериментом, но большем напоре для [9; 13; 14; 16; 18].

2. Начало кавитации для моделирования фиксируется при большем значении NPSHa по сравнению с экспериментом и большем напоре для [11].

3. В точке начала кавитации отличие NPSHa относительно эксперимента меньше для статей [9] на 10 %, [13] на 6 %, [14] на 6 %, [16] на 15 %, [18] на 10 %.

4. В точке начала кавитации отличие NPSHa относительно эксперимента больше для статьи [11] на 6 %.

5. В точке начала кавитации отличие напоров относительно эксперимента больше для статей [9] на 5 %, [11] на 3 %, [13] на 2 %, [14] на 6 %, [16] на 0,3 %, [18] на 4,5 %.

Также рассмотрим графики на рис. 2. Если принять за начало кавитации 3 % падение напора, то можно сделать следующие выводы:

1. Начало кавитации для моделирования фиксируется меньшим значением σ , но большем Ψ для [10; 12; 15].

2. В точке начала кавитации отличие σ относительно эксперимента меньше для [10] на 18 %, [12] на 62 %, [15] на 8 %;

3. В точке начала кавитации отличие Ψ относительно эксперимента больше для [10] на 3 %, [12] на 0,2 %, [15] на 0,7 %.

Заключение

По результатам рассмотрения упомянутых работ, представленных выше графических материалов и данных о расчетных сетках можно сделать следующие выводы:

1. Численное моделирование кавитационного потока показывает удовлетворительную сходимость для значений напоров насосов. Данные показатели остаются стабильными и для больших значений напора. Расхождение параметров при моделировании кавитации в насосе двустороннего входа аналогичны расхождению параметров для моделей с одним входом.

2. Данные по значениям σ и NPSHa относительно напора отличаются в худшую сторону, так как некоторые работы показали большое расхождение экспериментальных данных и данных моделирования течения.

3. Число элементов сетки оказывает меньшее влияние на точность численного моделирования, так как отличие моделей с большим и меньшим числом ячеек незначительно.

Упомянутые выше выводы необходимо учитывать при применении модели Zwart – Gerber – Belamri для численного расчета гидравлического кавитационного потока в насосах ТНА ЖРД.

Библиографические ссылки

1. Краев М. В., Рыбакова В. Е. Срывные кавитационные режимы работы высокооборотных насосов // Решетневские чтения : материалы XVI Междунар. науч.-практ. конф. / СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2012. Ч. 1. С. 109–110.

2. ANSYS FLUENT Theory Guide / Chapter 16.7.4: Cavitation Models. ANSYS Inc. Release 12.0.

3. Rayleigh, Lord. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity // Phil. Mag. 1917. No. 34 (200). P. 94–98.

4. Plesset M. S. The dynamics of cavitation bubbles // J. Appl. Mech. 1949. No. 16. P. 228–231

5. Zwart Philip, Gerber A. G., Belamri Thabet. A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics // Fifth International Conference on Multiphase Flow, 2004.

6. Бредшоу П. Введение в турбулентность и ее измерение. М. : Мир, 1974.
7. Краткое резюме доклада на Общем собрании Отделения физ.-мат. наук Академии наук СССР 26–28 января 1942. Казань // Изв. АН ССР. Сер. физ; 1942. Т. 3, № 1-2. С. 56–58.
8. Launder B. E., Spalding D. B. The numerical computation of turbulent flows // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1974. No. 3 (2). P. 269–289.
9. Yan X., Meng G. Pressure fluctuation characteristics of centrifugal pump at low flow rate // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. No. 163. P. 012023. Doi: 10.1088/1755-1315/163/1/012023.
10. Experimental investigation and numerical analysis of unsteady attached sheetcavitating flows in a centrifugal pump / Liu Hou-lin, Liu Dong-xi, Wang Yong et al. // *Journal of Hydrodynamics*. 2013. No. 25(3). P. 370–378.
11. Wang W., Lu H., Meng G. Pressure fluctuation characteristics induced by cavitation in a centrifugal pump // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. No. 163. P. 012040. Doi: 10.1088/1755-1315/163/1/012040.
12. Zhao G., ZhaoWeiguo. Investigation of cavitation instabilities in a centrifugal pump based on one-element theory // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. No. 163. P. 012042. Doi: 10.1088/1755-1315/163/1/012042.
13. Cheng X., Zhang S. Study on the influence of cavitation development on the performance of nuclear main pump // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. No. 240. P. 062031. Doi: 10.1088/1755-1315/240/6/062031.
14. Cui Baoling, Zhu Kaicheng, Zhang Yuliang, Lin Peifeng. Experimental and numerical study of the performance and cavitation flow of centrifugal pump with jetting device // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2019. No. 33. P. 10.1007/s12206-019-0925-6.
15. Song Pengfei, Zhang Yongxue, Xu Coolsun, Zhou X., Zhang Jinya. Numerical studies in a centrifugal pump with the improved blade considering cavitation // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2015. No. 72. P. 032021. Doi: 10.1088/1757-899X/72/3/032021.
16. Li Xiaojun, Yuan ShouQi, Pan Zhongyong, Yuan JianPing, Fu Yanxia. Numerical simulation of leading edge cavitation within the whole flow passage of a centrifugal pump // *Science China Technological Sciences*. 2013. No. 56. P. 10.1007/s11431-013-5311-5.
17. Effects of the near-wall mesh quality on the accuracy of numerical analysis in centrifugal pumps (in Chinese) / Li X. J., Yuan S. Q., Pan Z. Y. et al. // *Trans CSAE*. 2012. No. 28(16). P. 67–72.
18. Numerical simulation and analysis of cavitation flows in a double suction centrifugal pump / Meng Guixuan, Tan L., Cao S. et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2015. No. 72. P. 032020. Doi: 10.1088/1757-899X/72/3/032020.

References

1. Kraev M. V., Rybakova V. E. [Disruptive cavitation modes of operation of high-speed pumps]. *Reshetnevskie chteniya*. 2012. P. 109–110.
2. ANSYS FLUENT Theory Guide / Chapter 16.7.4: Cavitation Models. ANSYS Inc. Release 12.0.
3. Rayleigh, Lord. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity. *Phil. Mag.* 1917, No. 34 (200), P. 94–98.
4. Plesset M. S. The dynamics of cavitation bubbles. *J. Appl. Mech.* 1949, No. 16, P. 228–231
5. Zwart Philip, Gerber A. G., Belamri Thabet. A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics. *Fifth International Conference on Multiphase Flow*, 2004.
6. Bredshou P. *Vvedenie v turbulentnost' i ee izmerenie* [Introduction to turbulence and its measurement]. Moscow, Mir Publ., 1974.

7. Izv. AN SSR. Ser. fiz; 1942. Vol. 3, № 1-2, P. 56–58. Kratkoe rezyume doklada na Obshechm sobranii Otdeleniya fiz.-mat. nauk Akademii nauk SSR 26–28 yanvary 1942. Kazan’.
8. Launder B. E., Spalding D. B. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1974, No. 3 (2), P. 269–289.
9. Yan X., Meng G. Pressure fluctuation characteristics of centrifugal pump at low flow rate. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018, No. 163, P. 012023. Doi: 10.1088/1755-1315/163/1/012023.
10. Liu Hou-lin, Liu Dong-xi, Wang Yong et al. Experimental investigation and numerical analysis of unsteady attached sheetcavitating flows in a centrifugal pump. *Journal of Hydrodynamics*. 2013, No. 25(3), P. 370–378.
11. Wang W., Lu H., Meng G. Pressure fluctuation characteristics induced by cavitation in a centrifugal pump. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018, No. 163, P. 012040. Doi: 10.1088/1755-1315/163/1/012040.
12. Zhao G., ZhaoWeiguo. Investigation of cavitation instabilities in a centrifugal pump based on one-element theory. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018, No. 163, P. 012042. Doi: 10.1088/1755-1315/163/1/012042.
13. Cheng X., Zhang S. Study on the influence of cavitation development on the performance of nuclear main pump. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, No. 240, P. 062031. Doi: 10.1088/1755-1315/240/6/062031.
14. Cui Baoling, Zhu Kaicheng, Zhang Yuliang, Lin Peifeng. Experimental and numerical study of the performance and cavitation flow of centrifugal pump with jetting device. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2019, No. 33, P. 10.1007/s12206-019-0925-6.
15. Song Pengfei, Zhang Yongxue, Xu Coolsun, Zhou X., Zhang Jinya. Numerical studies in a centrifugal pump with the improved blade considering cavitation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2015, No. 72, P. 032021. Doi: 10.1088/1757-899X/72/3/032021.
16. Li Xiaojun, Yuan ShouQi, Pan Zhongyong, Yuan JianPing, Fu Yanxia. Numerical simulation of leading edge cavitation within the whole flow passage of a centrifugal pump. *Science China Technological Sciences*. 2013, No. 56, P. 10.1007/s11431-013-5311-5.
17. Li X. J., Yuan S. Q., Pan Z. Y. et al. Effects of the near-wall mesh quality on the accuracy of numerical analysis in centrifugal pumps (in Chinese). *Trans CSAE*. 2012, No. 28(16), P. 67–72.
18. Meng Guixuan, Tan L., Cao S., Jian W., Liu W., Jiang D. Numerical simulation and analysis of cavitation flows in a double suction centrifugal pump. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2015, No. 72, P. 032020. Doi: 10.1088/1757-899X/72/3/032020.

© Торгашин А. С., Бегишев А. М., Власенко А. В., Назаров В. В., Жуйков Д. А., 2021

Бегишев Алексей Михайлович – аспирант; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: alex-beg95@mail.ru.

Жуйков Дмитрий Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры двигателей летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: d_zhuikov@sibsau.ru.

Назаров Владимир Павлович – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой двигателей летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: nazarov@sibsau.ru.

Торгашин Анатолий Сергеевич – аспирант; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ttarg23@gmail.com.

Власенко Алексей Владимирович – аспирант; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: lesha.vlasenko.94@mail.ru.

Begishev Aleksej Mihajlovich – postgraduate student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: alex-beg95@mail.ru.

Zhujkov Dmitrij Aleksandrovich – Cand. Sc., Associate Professor, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: d_zhuikov@sibsau.ru.

Nazarov Vladimir Pavlovich – Cand. Sc., Professor, Head of the Department of Aircraft Engines; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: nazarov@sibsau.ru.

Torgashin Anatolij Sergeevich – postgraduate student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: ttarg23@gmail.com.

Vlasenko Alesksej Vladimirovich – postgraduate student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: lescha.vlasenko.94@mail.ru.

УДК 621.32; 629.78

Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-672-686

Для цитирования: Шевчук А. А. Альтернативный метод имитации солнечного излучения для термовакуумных испытаний космических аппаратов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 4. С. 672–686. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-672-686.

For citation: Shevchuk A. A. Alternative method of solar simulation for thermal vacuum tests of spacecraft. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 4, P. 672–686. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-672-686.

Альтернативный метод имитации солнечного излучения для термовакуумных испытаний космических аппаратов

А. А. Шевчук

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662970, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина 52
E-mail: shevchukaa@iss-reshetnev.ru

Имитаторы солнечного излучения на основе газоразрядных ксеноновых ламп, применяемые для получения теплового состояния объектов термовакуумных испытаний – космических аппаратов, являются одними из ключевых, наиболее сложных и энергозатратных элементов испытательного оборудования. Сложность оптической системы, большое число оптических элементов, необходимость постоянного контроля их состояния, настройки и юстировки высококвалифицированным персоналом значительно усложняют получение требуемых световых характеристик, главным образом – пространственной равномерности энергетической освещенности. Другим общим недостатком является низкая энергоэффективность, не превышающая 10 %. Предложен альтернативный метод имитации солнечного излучения с использованием твердотельных световых источников – высокоэффективных светодиодов с их размещением без громоздкой и сложной оптической системы непосредственно в термовакуумной камере. При этом одной из наиболее сложных проблем адаптации к условиям термовакуумных испытаний является обеспечение требуемых световых характеристик. Необходимый диапазон длин волн и спектральное соответствие получены при помощи комбинирования высокоэффективных светодиодных сборок из светодиодов шести различных длин волн с галогенными лампами. Проведен ряд экспериментов, включающий измерение световых характеристик альтернативных световых источников и математическое моделирование матричного излучателя. В результате подтверждена возможность применения предлагаемого метода для термовакуумных испытаний космических аппаратов; световые характеристики модели соответствуют предъявляемым требованиям, а в части равномерности энергетической освещенности и энергоэффективности – значительно превосходят аналогичные характеристики традиционных имитаторов солнечного излучения.

Ключевые слова: термовакуумные испытания космических аппаратов, имитатор солнечного излучения, светоизлучающий диод, галогенная лампа.

Alternative method of solar simulation for thermal vacuum tests of spacecraft

A. A. Shevchuk

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

Solar simulators based on gas-discharge xenon lamps, used to obtain the thermal state of objects for thermal vacuum testing of spacecraft, are one of the key, most complex and energy-consuming elements of test equipment. The complexity of the optical system, the large number of optical elements, the need for constant monitoring of their condition, tuning and adjustment by highly qualified personnel significantly complicate the obtaining of required luminous characteristics, mainly the spatial uniformity of the irradiance. Another common drawback is their low energy efficiency, which does not exceed 10 %. We proposed an alternative method of solar simulation using solid-state luminous sources – high-efficiency LEDs, with their placement without a bulky and complex optical system directly in a thermal vacuum chamber. At the same time, one of the most difficult problems of adapting to the conditions of thermal vacuum tests is to provide the necessary luminous characteristics. The required wavelength range, spectral match are obtained by combining assemblies of high-efficiency LEDs of six different wavelengths and halogen lamps. We carried out a number of experiments, including measuring the luminous characteristics of alternative luminous sources and mathematical modeling of the matrix emitter. As a result, the possibility of using the proposed method for thermal vacuum tests of spacecraft was confirmed; the luminous characteristics of the model meet the requirements, and in terms of uniformity of irradiance and energy efficiency, they significantly exceed those of traditional solar simulators.

Keywords: thermal vacuum tests of spacecraft, solar simulator, light emitting diode, halogen lamp.

Введение

Имитаторы солнечного излучения (ИСИ) создают поток импульсного или непрерывного излучения, характеристики которого близки к характеристикам солнечного излучения как заатмосферных (АМ0, англ. Air Mass 0), так и наземных (АМ1, АМ1,5 и др.) условий. Наиболее сложными, энергозатратными и дорогостоящими из них являются ИСИ постоянного излучения, применяемые в термовакуумных испытаниях (ТВИ) космических аппаратов (КА). В ходе ТВИ имитируются условия вакуума и температур, близкие к условиям околоземного космического пространства, а ИСИ, как один из ключевых элементов испытательного оборудования, используется для получения теплового состояния объектов термовакуумных испытаний (ОИ) – КА в целом или их составных частей [1; 2].

Спектр излучения Солнца в условиях открытого космоса близок к спектру излучения абсолютно черного тела (АЧТ) с температурой 5960 К (рис. 1). Тепловое воздействие Солнца во всем диапазоне длин волн, или энергетическая освещенность (ЭО), определяется как количество солнечного излучения на единицу площади:

$$E = \int_0^{\lambda} I(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где E – энергетическая освещенность, Вт/м²; λ – длина волны, нм; $I(\lambda)$ – интенсивность солнечного излучения на единицу длины волны, Вт/м²·нм.

Среднее значение ЭО Солнца в заатмосферных условиях, или солнечная постоянная, составляет 1366 Вт/м².

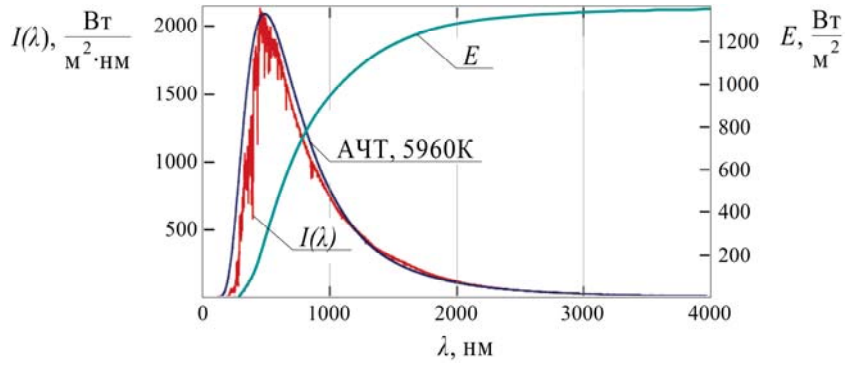


Рис. 1. Спектральное распределение солнечного излучения условий АМ0

Fig. 1. AM0 spectral distribution

В части световых характеристик к действующим в настоящее время крупногабаритным отечественным ИСИ для ТВИ КА предъявляются следующие основные требования:

- уровень ЭО – 1340–1440 Вт/м²;
- неравномерность распределения ЭО в рабочей плоскости до 15 %;
- спектральное распределение, близкое к заатмосферному спектру Солнца, в диапазоне длин волн 200–2500 нм;
- непараллельность светового потока не более 4° [2].

В качестве световых источников ИСИ для ТВИ КА традиционно используются газоразрядные ксеноновые лампы [3], которые в силу своих особенностей не могут быть размещены непосредственно в термовакуумной камере. Поэтому для получения рабочего поля на ОИ применяют громоздкую и сложную оптическую систему из большого количества отражающих и преломляющих элементов. Световые потоки газоразрядных ксеноновых ламп при помощи первичной оптики фокусируются в оптических смесителях, через узлы оптического ввода направляются во внутреннее пространство термовакуумной камеры, где при помощи одного или нескольких коллимирующих зеркал сложной формы снова расфокусируются, образуя однородное рабочее поле на ОИ. При этом уровень достигаемой пространственной равномерности ЭО прямо зависит от точности настройки и юстировки всех элементов оптической системы и постоянного контроля их состояния.

Пример крупногабаритного ИСИ традиционной конструкции показан на рис. 2.

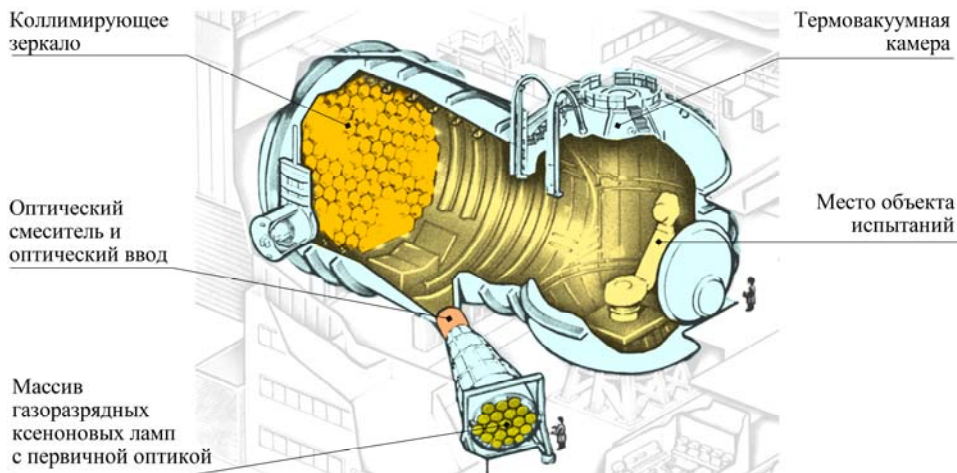


Рис. 2. Крупногабаритный ИСИ Европейского космического агентства

Fig. 2. ESA large-size solar simulator

Постановка задачи

Среди общих недостатков традиционных ИСИ наиболее существенными являются:

- сложность получения высокой точности имитации, в первую очередь, пространственной равномерности ЭО;
- низкая энергоэффективность, обусловленная низким КПД газоразрядных ксеноновых ламп, удаленностью световых источников от ОИ и высокими потерями в сложной оптической системе. Даже при самом тщательном изготовлении и точной юстировке всех оптических элементов энергоэффективность традиционных ИСИ не превышает 10 % [2; 4];
- малый, около 500 ч, ресурс и высокая стоимость световых источников;
- сложность и высокая стоимость эксплуатации с участием высококвалифицированного персонала;
- длительное время подготовки к испытаниям.

Следует отметить, что традиционные ИСИ за несколько десятилетий практически достигли своего совершенства. Дальнейшее улучшение их световых характеристик возможно лишь в небольших пределах и ценой значительного увеличения стоимости и усложнения конструкции.

Несмотря на то, что световые характеристики существующих крупногабаритных отечественных ИСИ отвечают требованиям подавляющего большинства случаев ТВИ, в самое ближайшее время они могут оказаться недостаточными. Например, при происходящем ужесточении требований к автоматическим КА связи, навигации и геодезии, переходе на новые частотные диапазоны возрастают и требования к точностным характеристикам размеростабильных прецизионных конструкций КА, таких как крупногабаритные антенны, антенные панели, ферменные конструкции. При этом на этапе наземной экспериментальной отработки, при подтверждении стабильности их геометрических характеристик в условиях ТВИ, потребуется более высокая точность имитации солнечного излучения, главным образом, в части стабильности и однородности температурного поля.

Следовательно, для радикального повышения точности имитации и снижения стоимости ТВИ с использованием ИСИ необходимы новые, альтернативные методы и решения.

Пути решения

До недавнего времени газоразрядные ксеноновые лампы, в силу хорошего спектрального соответствия и высокой мощности, считались хотя и самым дорогим, но практически безальтернативным световым источником. Однако появление и стремительное развитие новых твердотельных световых источников - высокоэффективных светодиодов, сделало возможным создание на их основе простых и эффективных ИСИ [5; 6]. При использовании в ИСИ для ТВИ КА твердотельные источники могут быть размещены непосредственно в термовакуумной камере без громоздкой и сложной оптической системы, в непосредственной близости от ОИ. Наиболее рациональна конструкция излучателя такого ИСИ в виде двухмерного массива (матрицы) с распределенными параметрами [7; 8], состоящая из множества точечных источников – высокоэффективных светодиодов с простыми первичными оптическими элементами (рис. 3). В случае, если расстояние до ОИ в несколько раз превышает расстояния между соседними точечными источниками матрицы, их световые потоки, многократно смешиваясь, образуют достаточно однородное рабочее поле. При этом также рационально составить излучатель из большого количества световых модулей малого размера. Это позволит использовать только минимально необходимое количество модулей в соответствии с фактической конфигурацией ОИ и дополнительно повысить энергоэффективность ИСИ.

Предварительный анализ показывает преимущество ИСИ на основе светодиодов по подавляющему большинству световых, эксплуатационных, технико-экономических характеристик [8]. Более того, уже существуют серийно выпускаемые зарубежными производителями ИСИ

на основе светодиодов, например, [9; 10]. Однако все они предназначены для испытаний солнечных фотоэлементов в наземных условиях АМ1 или АМ1,5, в узком спектральном диапазоне 400–1100 нм и с уровнем ЭО до 1000 Вт/м². Для адаптации светодиодного ИСИ к условиям ТВИ необходимо решить ряд задач, полностью изменяющих его конструкцию. В первую очередь, необходимо обеспечить:

1. Световые характеристики:

- уровень ЭО, соответствующий солнечной постоянной, не менее 1366 Вт/м²;
- спектральный диапазон, расширенный в инфракрасной области, до 2000 нм;
- значительные, в несколько метров, расстояние до объекта испытаний и размеры рабочего поля;
- высокая направленность светового потока без составляющей рассеянного излучения.

2. Тепловой режим:

- термоизоляция излучателя ИСИ с выводом избыточного тепловыделения за пределы термовакуумной камеры;
- термостабилизация кристаллов светодиодов при любых температурных режимах ТВИ.

3. Выбор материалов с минимальным газовыделением, не влияющих на вакуумный режим ТВИ.

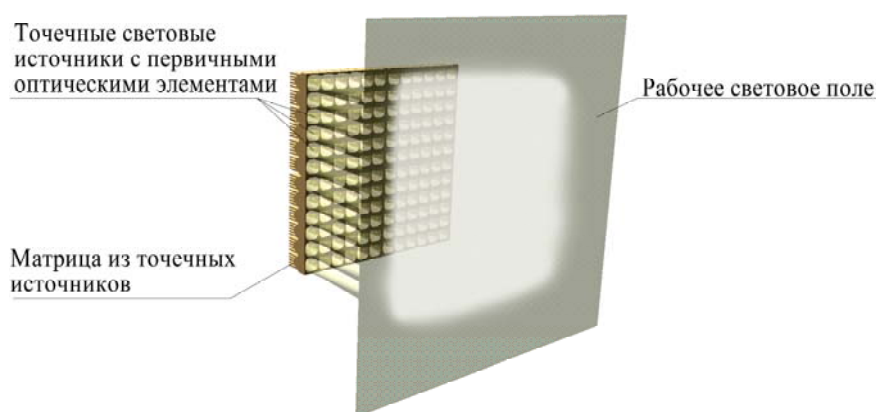


Рис. 3. Излучатель ИСИ в виде матрицы из точечных источников

Fig. 3. Emitter of solar simulator in the form of a matrix of point sources

Наиболее сложной из перечисленных задач является обеспечение необходимых световых характеристик. Поскольку максимум интенсивности излучения монохромных светодиодов сосредоточен в узком диапазоне, для получения непрерывного спектра комбинируют излучение нескольких групп светодиодов различных длин волн. Однако для получения высокой направленности светового потока, необходимой для случая ТВИ, каждый светодиод должен иметь первичный оптический элемент, что не позволит разместить достаточное количество групп в пределах матрицы. С другой стороны, главным препятствием для получения расширенного до 2000 нм спектра ИСИ является высокая стоимость, узкая полоса излучения и низкая эффективность существующих инфракрасных светодиодов.

Для решения проблемы предложен простой и эффективный способ комбинирования светодиодов различных длин волн в видимой области и галогенных ламп накаливания преимущественно инфракрасной области солнечного спектра. Более того, если спектры этих двух видов световых источников имеют область совместного излучения, число необходимых для получения непрерывного спектра светодиодов различных длин волн может быть уменьшено в несколько раз. Это позволяет применить интегральные светодиодные сборки из нескольких

различных светодиодов с минимальными размерами излучающей поверхности совместно с одним общим оптическим элементом [11].

Таким образом, наиболее рационально выполнить излучатель ИСИ на основе комбинирования высокоэффективных светодиодных сборок в преимущественно видимой области и галогенных ламп в преимущественно инфракрасной области, размещенных в матрице с равномерным чередованием. Пример размещения комбинированного излучателя в горизонтальной термовакуумной камере показан на рис. 4.

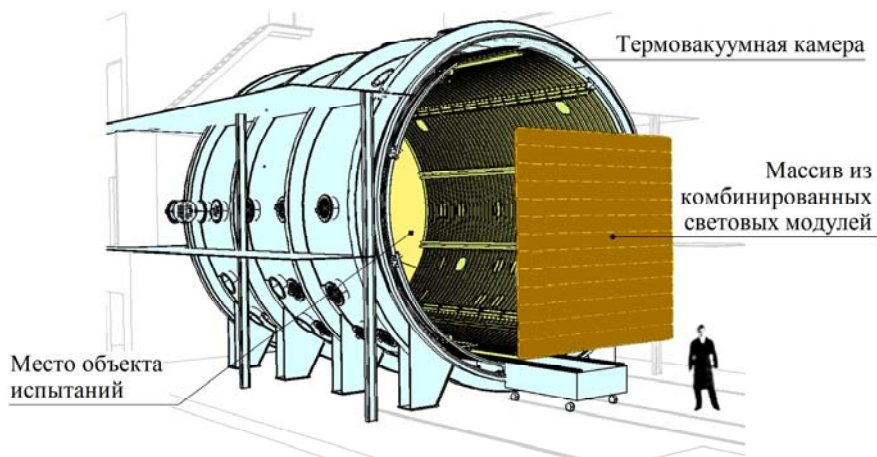


Рис. 4. Размещение комбинированного излучателя ИСИ в термовакуумной камере

Fig. 4. Placement of a combined luminous emitter in a thermal vacuum chamber

Экспериментальная часть

Для проверки соответствия комбинированного матричного излучателя ИСИ предъявляемым требованиям проведено моделирование его световых характеристик.

В качестве световых источников в преимущественно видимой области выбраны высокоэффективные светодиодные сборки LED ENGIN LZ7 производителя OSRAM [12] из светодиодов шести длин волн и размерами излучающей поверхности 7x7 мм (табл. 1). Максимальная потребляемая светодиодной сборкой электрическая мощность достигает 50 Вт.

Таблица 1

Основные параметры интегральной светодиодной сборки LED ENGIN LZ7

Параметр	Кристаллы светодиодной сборки					
	449	495	519	522	600	622
Длина волны, нм	449	495	519	522	600	622
Количество в сборке	1	1	1	2	1	1
Прямое напряжение, В	3,2	3,8	3,5	3,2	3,6	2,4
Максимальный прямой ток, А	3	1	3	2,5	1,5	2,5
Максимальная температура в режиме работы, °С	125					
Температура в неработающем состоянии, °С	-40 ... +150					

Суммарное излучение выбранной светодиодной сборки ограничено красной областью спектра, что предполагает использование в преимущественно инфракрасной области галогенных ламп накаливания с максимумом излучения около 750 нм. Спектр излучения галогенных ламп близок к излучению АЧТ (рис. 5), соответствующая максимуму излучения длина волны и температура АЧТ, или цветовая температура лампы, связаны между собой формулой:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \cdot 10^9, \quad (2)$$

где λ_{\max} – длина волны, соответствующая максимуму излучения, нм; T – цветовая температура, К; b – постоянная Вина, равная $2,89777 \cdot 10^{-3}$ К·м.

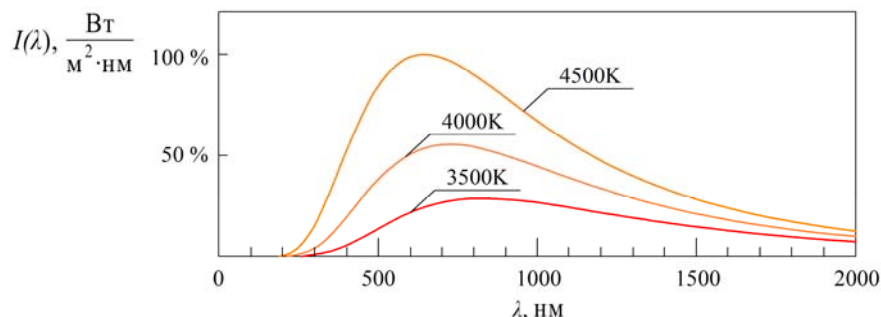


Рис. 5. Спектральные распределения галогенных ламп различных цветовых температур

Fig. 5. Spectral distributions of halogen lamps of different color temperatures

При этом предпочтительны лампы с осевым расположением нити накаливания, что позволяет использовать с ними простые и эффективные первичные оптические элементы – параболические рефлекторы.

Наиболее доступны и полностью отвечают перечисленным требованиям автомобильные галогенные лампы дальнего света H1, значения цветовых температур которых находятся в широком диапазоне (рис. 6).

Fukurou H1 4301F1	3300
Koito H1 Whitebeam v3	3700
Philips H1 VisionPlus +60 %	3200
Philips H1 X-tremeVision +130 %	3400
OSRAM H1 Cool Blue Intense	3700
OSRAM H1 Night Breaker Silver +100 %	3300
OSRAM H1 Night Breaker Laser +150 %	3500
SVS H1 White ver. 2.0	4800
SVS H1 Intense +130 % ver. 2.0	3400
General Electric H1 Megalight Ultra +130 %	3400
OSRAM H1 Original	3200
Philips H1 Vision +30 %	3200
Fukurou H1 4301F1	3100

Рис. 6. Цветовые температуры галогенных ламп H1 различных производителей

Fig. 6. Color temperatures of H1 halogen lamps from different manufacturers

В качестве светового источника в преимущественно инфракрасной области выбраны галогенные лампы H1 производителя OSRAM с цветовой температурой 3700 К и максимальной потребляемой мощностью 55 Вт.

Первичная оптика для световых источников выбрана из числа серийно выпускаемых компактных оптических элементов со световым распределением круглой формы и наименьшим углом распределения 6° . Для светодиодных сборок выбраны TIR оптические элементы, основанные на принципе полного внутреннего отражения (англ. Total Internal Reflection) [13; 14], для галогенных ламп – параболические рефлекторы.

Исходные значения световой мощности и спектральные распределения световых источников измерены в нормальных условиях. Для измерения спектральных распределений использована система измерения спектра на основе двух монохроматоров МДР-206 и ПК со специализированным программным обеспечением, позволяющим определять интегральные значения ЭО. Монохроматоры откалиброваны по эталонным световым источникам на основе лампы накаливания и дейтериевой лампы. Дополнительно для измерений уровней ЭО использован спектрально неселективный тепловой радиометр ФОА 020 с малым, практически точечным размером измерительной поверхности, откалиброванный методом прямых измерений по Государственному вторичному эталону единиц силы излучения и энергетической освещенности непрерывного оптического излучения 2.1.ZZA.0010.2015.

Спектральное распределение, полученное комбинированием светодиодов шести длин волн и галогенной лампы с отдельным регулированием их электрической мощности, показано на рис. 7.

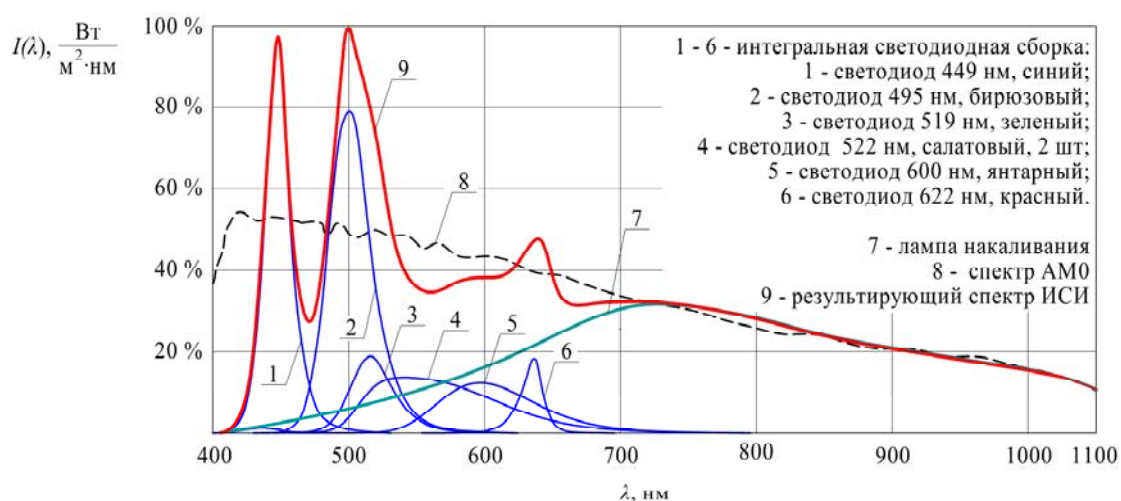


Рис. 7. Спектральное распределение комбинированного светового источника

Fig. 7. Spectral distribution of the combined luminous source

Соответствие спектру АМ0 определено по методике, приведенной в ГОСТ Р МЭК 609040-9 [15]. Следует отметить, что эти требования избыточны для случая ТВИ, поскольку [15] классифицирует характеристики ИСИ для испытаний крайне чувствительных к спектру солнечных фотоэлементов. Однако даже в этом случае спектральное соответствие находится в пределах 0,75–1,25, что соответствует высшему классу А (табл. 2).

Таблица 2

Спектральное соответствие, полученное комбинированием световых источников

Диапазоны длин волн, нм	400–500	500–600	600–700	700–800	800–900	900–1100
Спектральное соответствие	0,79	1,04	0,92	1,05	1,04	0,98

Дальнейшее моделирование характеристик одиночного светового модуля и массива из большого числа световых модулей проведено в специализированном программном обеспечении для оптического проектирования Zemax OpticStudio.

На первом этапе проведено моделирование выбранных одиночных световых источников с первичными оптическими элементами. В качестве исходных данных использованы результаты измерений световых характеристик, 3D-модели световых источников и их первичных оптиче-

ских элементов. Результаты моделирования (рис. 8, 9) показали хорошее, с точностью до 5 %, соответствие между результатами измерений и полученными моделями.

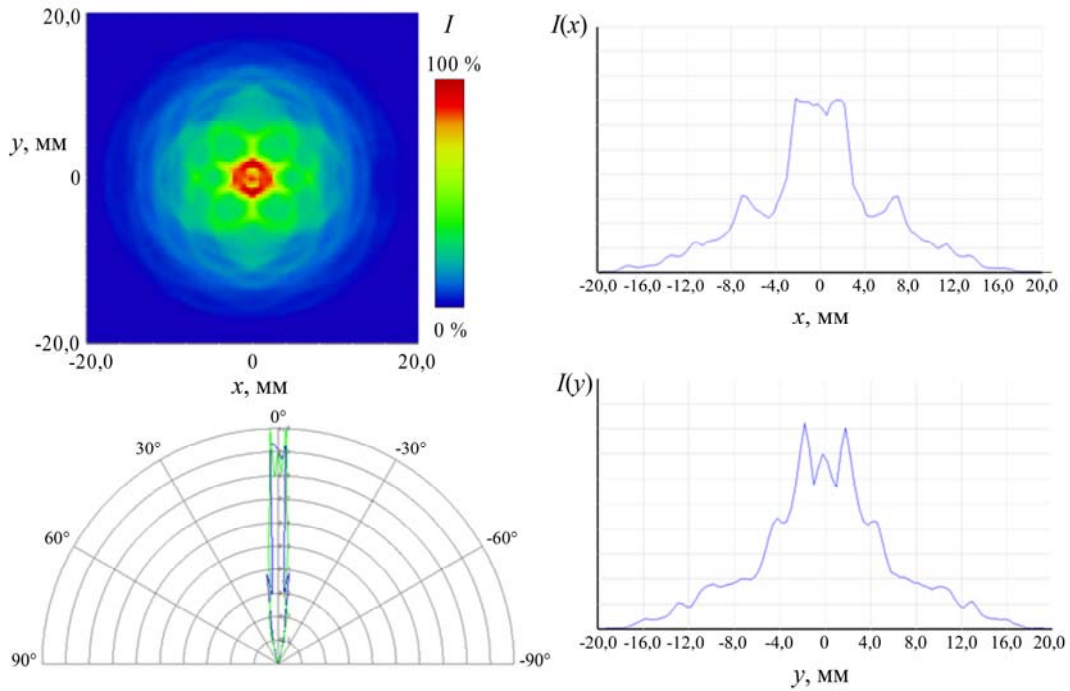


Рис. 8. Результаты моделирования светодиодной сборки с TIR оптическим элементом

Fig. 8. Simulation results for the LED assembly with TIR

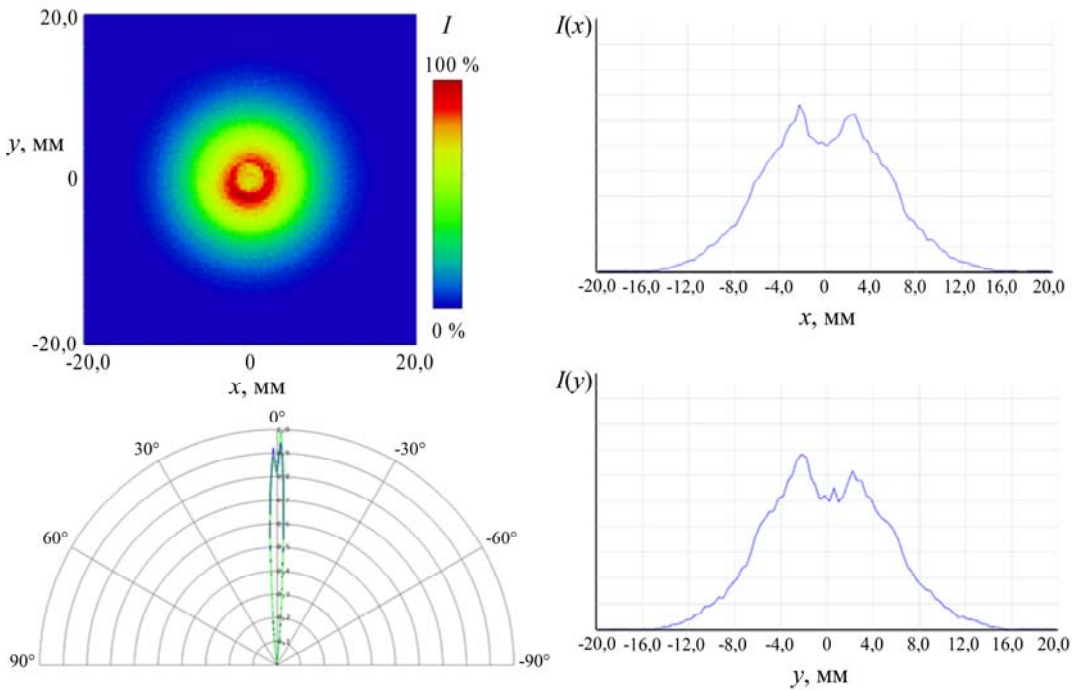


Рис. 9. Результаты моделирования галогенной лампы H1 с параболическим рефлектором

Fig. 9. Simulation results for the H1 halogen lamp with parabolic mirror

На следующем этапе в Zemax OpticStudio смоделированы световые характеристики одиночного светового модуля размерами 310×310 мм, или 0,1 м² (рис. 10), состоящего из 18 светоди-

одных сборок и 18 галогенных ламп накаливания с первичными оптическими элементами. Расчетная потребляемая модулем электрическая мощность по результатам моделирования не превысила 720 Вт, при этом мощность выбранных световых источников находилась в пределах половины от максимальной.

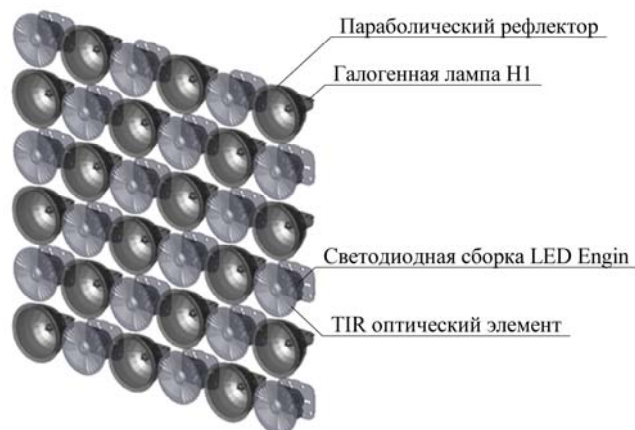


Рис. 10. 3D-модель светового модуля на основе 18 светодиодных сборок и 18 галогенных ламп

Fig. 10. 3D model of a luminous module based on 18 LED assemblies and 18 halogen lamps

Полученные световые характеристики одного модуля использованы далее как исходные данные для моделирования в Zemax OpticStudio массива из 169 световых модулей. Поскольку практический интерес, в силу размерных ограничений большинства термовакуумных камер, представляют расстояния до ОИ не более 3 м, моделировались расстояния от 0,5 до 3 м с шагом 0,5 м.

При определении уровня и неравномерности распределения ЭО рабочая плоскость разбита на сетку размером 20×20 участков (пикселей). Средний уровень ЭО в рабочей плоскости E , Вт/м², рассчитан по формуле

$$E = \frac{\sum_{j=1}^{N_x \cdot N_y} E_{ij}}{N_x \cdot N_y}, \quad (3)$$

где E_{ij} – интегрированное значение ЭО в каждом из 400 участков сетки 20 (x)×20 (y), Вт/м²; N_x – количество измерений по координате x ; N_y – количество измерений по координате y .

Отклонение от среднего уровня ЭО для каждого измеренного участка Q_{ij} , %, рассчитано по формуле

$$Q_{ij} = \left| 100 - \frac{E_{ij} \cdot 100}{E} \right|. \quad (4)$$

Общее значение неравномерности распределения ЭО в рабочей плоскости Q , %:

$$Q = \frac{\sum_{j=1}^{N_x \cdot N_y} Q_{ij}}{N_x \cdot N_y}. \quad (5)$$

Результаты моделирования в части уровня и равномерности распределения ЭО для каждого из шести расстояний показаны в графическом виде на рис. 11 и сведены в общем графике на рис. 12. Результаты в части параллельности светового потока показаны на рис. 13 и в табл. 3.

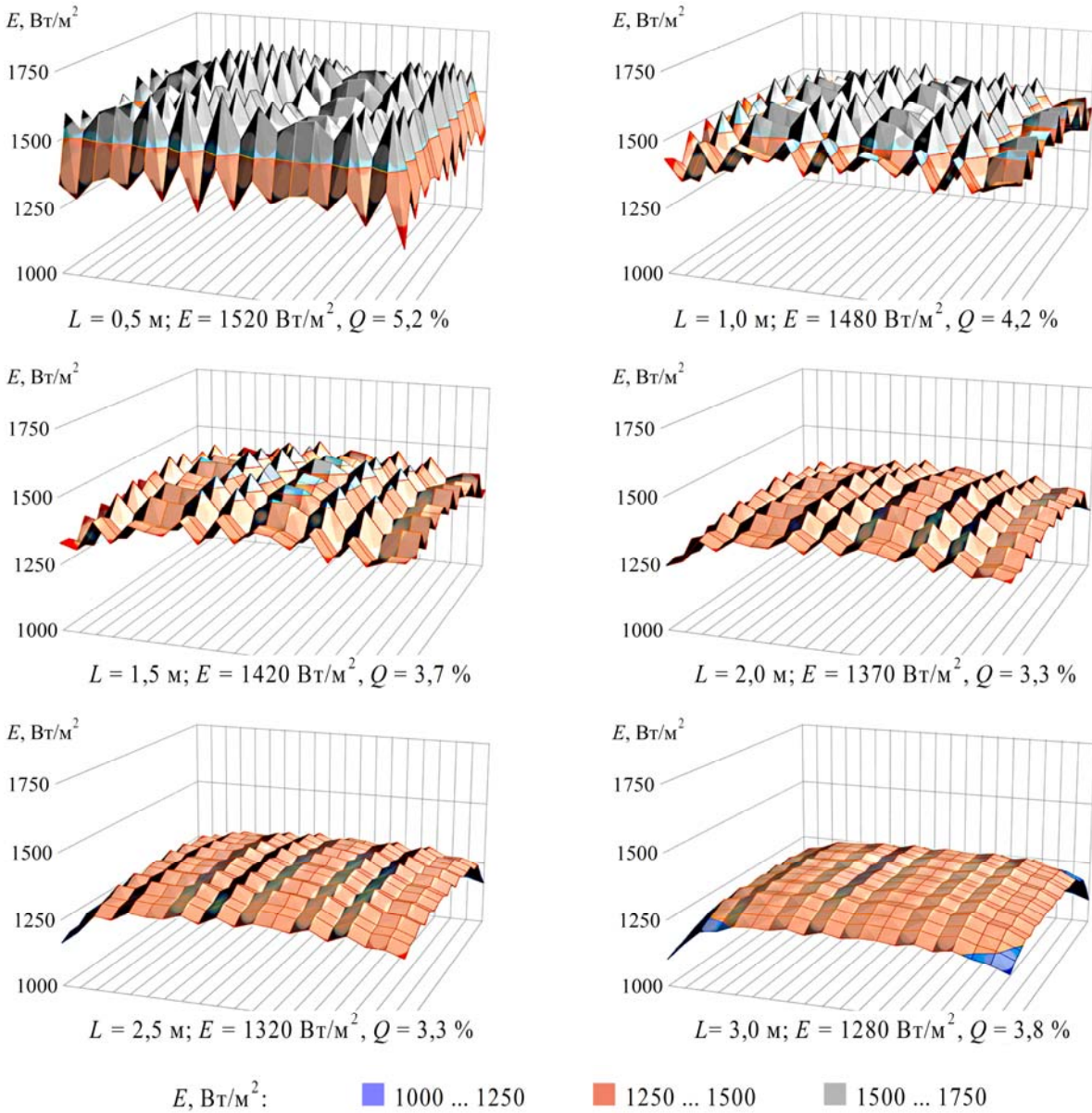


Рис. 11. Моделирование массива из световых модулей на различных расстояниях от 0,5 до 3 м

Fig. 11. Modeling of luminous modules array at different distances

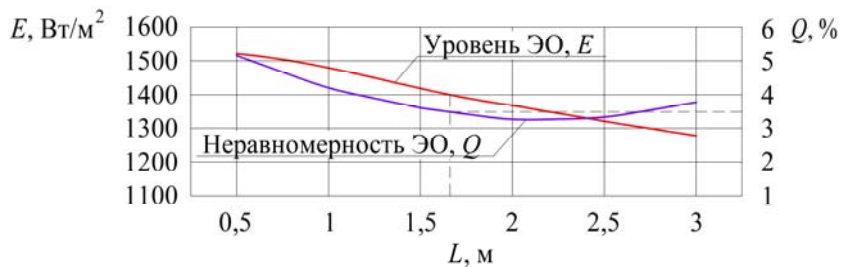


Рис. 12. Зависимость уровня и неравномерности распределения ЭО от расстояния до ОИ

Fig. 12. Dependence of the level and non-uniformity of the irradiance on the distance to the test object

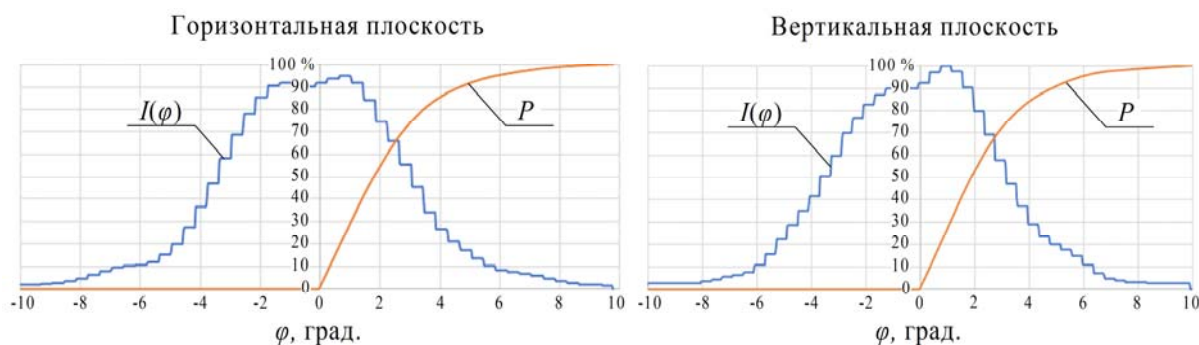


Рис. 13. Зависимость концентрации энергии ИСИ от угла распределения

Fig. 13. Dependence of the energy concentration of solar simulator on the distribution angle

Таблица 3

Зависимость концентрации энергии ИСИ от угла распределения

Концентрация энергии ИСИ P в пределах угла φ , %	Угол φ , град.	
	4	6
Горизонтальная плоскость	85	96
Вертикальная плоскость	84	96

Результаты и обсуждение

Результаты моделирования (рис. 11–13, табл. 2–4) показывают, что полученное значение энергоэффективности не менее чем в два раза превышает аналогичное значение традиционных ИСИ. Значение пространственной неравномерности ЭО, как минимум, в три раза ниже максимально допустимого значения 15 %. Модель оптимизирована для достаточного в большинстве случаев ТВИ расстояния 1,7 м до ОИ, на котором поддерживается уровень ЭО 1400 Вт/м² и низкая неоднородность, равная 3,5 %. Определенное по методике [15] соответствие спектру АМ0 находится в пределах высшего класса А.

Таблица 4

Сравнительные световые характеристики модели и традиционных ИСИ для ТВИ КА

Параметр	Модель	Традиционные ИСИ
Неравномерность распределения ЭО в рабочей плоскости, %	5,2–3,3	до 15
Энергоэффективность, %	19,5	5–10
Спектральное соответствие по методике ГОСТ Р МЭК 60904-9	класс А	

Следует особо отметить, что полученные результаты являются далеко не предельными.

На рис. 11 хорошо видно, что общий уровень ЭО массива световых модулей достигает максимальных значений в центре освещаемой площади, равномерно снижаясь по направлению к краям. Поэтому пространственная равномерность ЭО на уровне всего массива может быть дополнительно повышена отдельной регулировкой мощности световых модулей. Пространственная равномерность ЭО на уровне одного светового модуля может быть также повышена при применении первичных оптических элементов со световыми распределениями не круглой, а прямоугольной или шестиугольной формы.

Также очевидно, что применение первичных оптических элементов с меньшим углом распределения еще больше повысит параллельность светового потока, равномерность распределения ЭО и предельное расстояние до объекта испытаний.

Таким образом, полученные световые характеристики могут быть значительно улучшены при применении изготовленных с учетом перечисленных требований первичных оптических элементов.

Заключение

Появление последних разработок световых источников – высокоэффективных светодиодов открывает возможности для реализации альтернативного метода имитации солнечного излучения. Результаты проведенного моделирования позволяют сделать следующие выводы:

1. Теоретически подтверждается возможность создания имитатора солнечного излучения для термовакуумных испытаний космических аппаратов с размещением световых источников непосредственно в термовакуумной камере.

2. Световые характеристики модели соответствуют предъявляемым требованиям.

3. В части точности имитации солнечного излучения и энергоэффективности полученные характеристики модели значительно превосходят аналогичные характеристики имитаторов солнечного излучения традиционной конструкции.

Следующим логическим этапом становится создание действующей модели альтернативного имитатора солнечного излучения и экспериментальное подтверждение его характеристик в реальных условиях термовакуумных испытаний.

Библиографические ссылки

1. ГОСТ Р 56469–2015. Аппараты космические автоматические. Термобалансные и термовакуумные испытания. Введ. 2015-01-15. М. : Стандартинформ, 2015. 11 с.

2. Подходы к созданию комплексных систем для отработки и испытания космических аппаратов / С. В. Кравченко, С. Б. Нестеров, В. А. Романько и др. // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 1 (13). С. 149–175.

3. Wang W., Laumert B. Simulate a ‘Sun’ for Solar Research : A Literature Review of Solar Simulator Technology. KTH Royal Institute of Technology website. 2014 [Электронный ресурс]. URL: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-154262> (дата обращения: 15.11.2021).

4. Крат С. А. Повышение эффективности имитаторов солнечного излучения // Сибирский журнал науки и технологий. 2011. № 2 (35). С. 124–127.

5. Solid- State Solar Simulator / A. M. Bazzi, Z. Klein, M. Sweeney et al. // IEEE Transactions on Industry Applications. 2012. No. 48. P. 1195–1202.

6. Reynolds K. LED-based sun-simulator design: technical and commercial considerations // Photonics Spectra. March 2015. P. 54–58.

7. Plita F. Optical design of a fully LED-based solar simulator. PhD thesis. Loughborough, Loughborough University, July 2015. 186 p.

8. Анализ возможности создания имитатора солнечного излучения на основе светодиодных источников для наземной отработки космических аппаратов / Г. В. Двирный, А. А. Шевчук, В. В. Двирный и др. // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 2. С. 271–280.

9. Сайт производителя оптического оборудования Newport. Имитатор солнечного излучения VeraSol-2 LED класса AAA [Электронный ресурс]. Irvine, CA 92606, United States, 2021. URL: <https://www.newport.com/f/class-aaa-led-solar-simulators/> (дата обращения: 17.11.2021).

10. Сайт производителя фотоэлектронных преобразователей ECOPROGETTI. Имитатор солнечного излучения Ecosun Plus [Электронный ресурс]. Padova, Italy, 2021 [Электронный ресурс]. URL: <https://ecoprogetti.com/sun-simulator-for-solar-panel-testing-in-led-class-aaa/> (дата обращения: 17.11.2021).

11. Двирный Г. В., Шевчук А. А., Пастушенко О. В. Пути повышения технических и эксплуатационных характеристик имитаторов солнечного излучения для наземной отработки

космических аппаратов // Решетневские чтения : материалы XXIV Междунар. науч.-практ. конф., 10–13 нояб. 2020 г. / СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск, 2020. Ч. 1. С. 268–270.

12. Сайт производителя OSRAM. OSRAM LED Engin LuxiGen™ LED Emitters. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.osram.us/ledengin/products/luxigen/lz7.jsp> (дата обращения: 04.06.2021).

13. Talpur T., Herkommer A. TIR collimator designs based on point source and extended source methods // Proceedings of SPIE. 2015. Vol. 9629. P. 962906–962916.

14. Moiseev M. A., Doskolovich L. L. Design of TIR optics generating the prescribed irradiance distribution in the circle region // Journal of the Optical Society of America A. 2012. Vol. 29(9). P. 1758–1763.

15. ГОСТ Р МЭК 60904-9-2016. Приборы фотоэлектрические. Ч. 9. Требования к характеристикам имитаторов солнечного излучения. Введ. 2017-10-01. М., Стандартинформ, 2017. 12 с.

References

1. GOST R 56469–2015. *Apparaty kosmicheskiye avtomaticheskkiye. Termobalansnyye i termovakuumnyye ispytaniya*. [State Standard R 56469-2015. Automatic spacecrafts. Thermal balance and thermal vacuum tests]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 11 p.

2. Kravchenko S. V., Nesterov S. B., Roman'ko V. A., Testoyedov N. A., Khalimanovich V. I., Khristich V. V. [Approaches to creating integrated systems for optimization and testing of spacecraft]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*. 2013, No. 1 (13), P. 149–175 (In Russ.).

3. Wang W., Laumert B. Simulate a ‘Sun’ for Solar Research : A Literature Review of Solar Simulator Technology. KTH Royal Institute of Technology website. 2014. Available at: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-154262> (accessed: 15.11.2021).

4. Krat S. A. [Increase of solar radiation simulator efficiency]. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii*. 2011, No. 2 (35), P. 124–127 (In Russ.).

5. Bazzi A. M., Klein Z., Sweeney M. et al. Solid-State Solar Simulator. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2012, No. 48, P. 1195–1202.

6. Reynolds K. LED-based sun-simulator design: technical and commercial considerations. *Photonics Spectra*. March 2015, pp. 54-58.

7. Plita F. Optical design of a fully LED-based solar simulator. PhD thesis. Loughborough, Loughborough University, July 2015. 186 p.

8. Dvirniy G. V., Shevchuk A. A., Dvirniy V. V., Elfimova M. V., Krushenko G. G. [Analysis of LED-based solar simulator development capability for spacecraft ground testing applications]. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii*. 2018, Vol. 19, No. 2, P. 271–280 (In Russ.).

9. VeraSol-2 LED Class AAA Solar Simulator. Newport, Irvine, CA 92606, United States, 2021. Available at: <https://www.newport.com/f/class-aaa-led-solar-simulators> (accessed: 17.11.2021).

10. Sun Simulator For Solar Panel Testing In LED Class A+A+A+. ECOPROGETTI, Padova, Italy, 2021. Available at: <https://ecoprogetti.com/sun-simulator-for-solar-panel-testing-in-led-class-aaa> (accessed: 17.11.2021).

11. Dvirniy G. V., Shevchuk A. A., Pastushenko O. V. [Ways to improve the technical and operational characteristics of solar simulators for ground testing of spacecraft]. *Reshetnevskiy chteniya : materialy XXIV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Materials XIV Int. scient. and pract. conf. “Reshetnev readings”]. Krasnoyarsk, 2020, Vol. 1, P. 268–270 (In Russ.).

12. OSRAM LED Engin LuxiGen™ LED Emitters. OSRAM, 2021. URL: <https://www.osram.us/ledengin/products/luxigen/lz7.jsp> (accessed: 04.06.2021).

13. Talpur T., Herkommer A. TIR collimator designs based on point source and extended source methods. Proceedings of SPIE. 2015, Vol. 9629, P. 962906–962916.

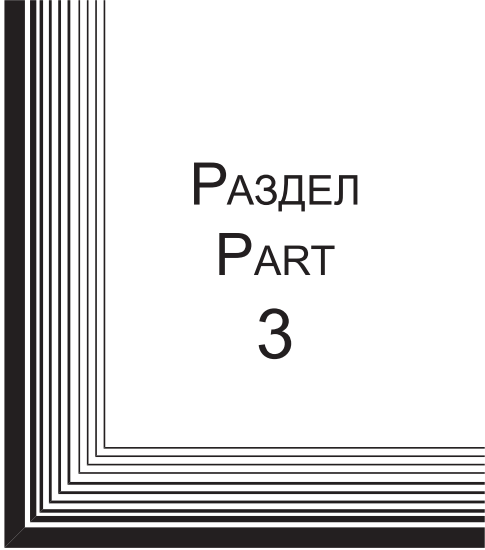
14. Moiseev M. A., Doskolovich L. L. Design of TIR optics generating the prescribed irradiance distribution in the circle region. *Journal of the Optical Society of America A*. 2012, Vol. 29(9), P. 1758–1763.

15. *GOST R MEK 60904–9–2016. Pribory fotoelektricheskie. Chast' 9. Trebovaniya k harakteristikam imitatorov solnechnogo izlucheniya.* [State Standard R IEC 60904–9–2016. Photovoltaic devices. Part 9. Solar simulator performance requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2017. 12 p.


© Шевчук А. А., 2021

Шевчук Андрей Александрович – инженер по наладке и испытаниям отдела термовакуумных испытаний, Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: shevchukaa@iss-reshetnev.ru.

Shevchuk Andrey Alexandrovich – testing engineer of the thermal vacuum tests department, JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: shevchukaa@iss-reshetnev.ru.



РАЗДЕЛ
PART
3



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ
И МАТЕРИАЛЫ

TECHNOLOGICAL
PROCESSES
AND MATERIALS SCIENCE



УДК 621.785.53

Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-688-699

Для цитирования: Формирование структуры, механических и трибологических свойств высокохромистой стали электронно-ионно-плазменным азотированием / С. П. Ереско, Ю. Ф. Иванов, Е. А. Петрикова и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 4. С. 688–699. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-688-699.

For citation: Eresko S. P., Ivanov Yu. F., Petrikova Ye. A., Teresov A. D., Klopotov A. A. Formation of the structure, mechanical and tribological properties of high chrome steel by electronic-ion-plasma nitrogen. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 4, P. 688–699. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-688-699.

Формирование структуры, механических и трибологических свойств высокохромистой стали электронно-ионно-плазменным азотированием*

С. П. Ереско^{1**}, Ю. Ф. Иванов², Е. А. Петрикова², А. Д. Тересов², А. А. Клопотов³

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

²Институт сильноточной электроники СО РАН

Российская Федерация, 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/3

³Томский государственный архитектурно-строительный университет

Российская Федерация, 634002, г. Томск, пл. Соляная, 2

**E-mail: eresko07@mail.ru

Целью настоящей работы является обнаружение закономерностей формирования структуры, механических и трибологических свойств высокохромистой стали, подвергнутой комплексной обработке, сочетающей облучение импульсным электронным пучком и последующее азотирование в плазме газового разряда низкого давления с использованием плазмогенератора с накаливаемым катодом «ПИНК». Объектом исследования являлась жаропрочная коррозионностойкая сталь аустенитного класса марки 20X23N18. Актуальность и практическая значимость исследований обусловлены сравнительно низким уровнем твердости и износостойкости сталей данного класса, имеющих широкий спектр применения в современной промышленности, в том числе, в ракетно-космической отрасли. Облучение стали 20X23N18 импульсным электронным пучком осуществляли на установке «СОЛО», последующее азотирование – на установке «КВИНТА». Показано, что максимальная микротвердость 19 ГПа (превышает твердость стали перед модифицированием в 11,2 раза и твердость стали после облучения электронным пучком в 8 раз) и минимальный параметр износа $k = 0,7 \times 10^{-6}$ мм³/Н·м (меньше параметра износа стали перед модифицированием более чем в 700 раз и меньше параметра износа стали после облучения электронным пучком более чем в 750 раз) наблюдаются на образцах, подвергнутых облучению при плотности энергии пучка электронов 30 Дж/см², 200 мкс, 3 имп. и последующему азотированию при температуре 793 К в течение 3 ч. Толщина упрочненного слоя составляет 40 мкм. Установлено, что данные образцы имеют в поверхностном слое максимальное (90,6 %) содержание нитридных фаз (нитриды хрома и железа). Установлено, что после азотирования при температуре 723 К в поверхностном слое стали нитриды железа и хрома формируются в виде наноразмерных частиц округлой формы. При температурах азотирования 793 и 873 К в поверхностном слое стали формируется структура

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках научного проекта № 19-48-700010.

The research was carried out with the financial support of the RFBR and the Administration of the Tomsk region within the framework of the scientific project No. 19-48-700010.

пластинчатого типа, образованная чередующимися параллельными друг другу пластинами нитрида железа и нитрида хрома.

Ключевые слова: комплексная обработка, импульсный электронный пучок, плазма газового разряда, высоколегированная сталь, структура, свойства.

Formation of the structure, mechanical and tribological properties of high chrome steel by electronic-ion-plasma nitrogen

S. P. Eresko^{1**}, Yu. F. Ivanov², Ye. A. Petrikova², A. D. Teresov², A. A. Klopotov³

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

²Institute of High Current Electronics SB RAS
2/3, Academic prospect, Tomsk, 634055, Russian Federation

³Tomsk State University of Architecture and Building
2, Solyanaya square, Tomsk, 634002, Russian Federation

**E-mail: eresko07@mail.ru

The purpose of this work is to detect the regularities of the formation of the structure, mechanical and tribological properties of high-chromium steel subjected to complex treatment combining irradiation with a pulsed electron beam and subsequent nitriding in a low-pressure gas discharge plasma using a plasma generator with an incandescent cathode "PINK". The object of the study was heat-resistant corrosion-resistant austenitic steel grade AISI 310. The relevance and practical significance of the research is due to the relatively low level of hardness and wear resistance of steels of this class, which have a wide range of applications in modern industry, including in the rocket and space industry. Irradiation of AISI 310 steel with a pulsed electron beam was carried out at the SOLO installation, subsequent nitriding (the QUINT installation). It was found that irradiation of samples at an electron beam energy density of 30 J/cm², 200 microseconds, 3 pulses and subsequent nitriding at a temperature of 793 K for 3 hours led to the following changes in mechanical properties. The maximum microhardness reached values of 19 GPa (exceeds the hardness of steel before modification by 11.2 times and the hardness of steel after electron beam irradiation by 8 times). The wear parameter has changed to values $k = 0.7 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N} \times \text{m}$ (less than the wear parameter of steel before modification by more than 700 times and less than the wear parameter of steel after electron beam irradiation by more than 750 times). The thickness of the hardened layer is 40 microns. It was found that the samples that have the maximum (90.6 %) content of nitride phases (chromium and iron nitrides) in the surface layer. Shown that after nitriding at a temperature of 723 K in the surface layer of steel, iron and chromium nitrides are formed in the form of nanoscale particles of rounded shape. At nitriding temperatures of 793 K and 873 K, a plate-type structure formed by alternating parallel plates of iron nitride and chromium nitride is formed in the surface layer of steel.

Keywords: complex processing, pulsed electron beam, gas discharge plasma, high-alloy steel, structure, properties.

Введение

Специальные, а также коррозионностойкие и нержавеющие стали являются вторым, после сплавов на основе алюминия, по применению материалом в ракетно-космической отрасли. Сравнительно низкая твердость и износостойкость являются отрицательными характеристиками нержавеющих аустенитных сталей, снижая срок службы изделий из данного материала. Модификация поверхности металлов и сплавов путем комплексной обработки, сочетающей

в различной последовательности насыщение поверхностного слоя атомами газовых элементов (азот, углерод, кислород), напыление тонких пленок различных металлов с последующим перемешиванием под действием высокоэнергетических импульсных электронных пучков, нанесение твердых и сверхтвердых износостойких покрытий и т. д. является одним из наиболее перспективных методов повышения служебных характеристик материала [1–3]. Наиболее распространенным в промышленности ионно-плазменным методом азотирования, в том числе и нержавеющей сталей, является метод, основанный на использовании аномального тлеющего разряда [1; 2; 4; 5]. Преимуществом данного метода является относительная простота как устройств, так и реализации процесса. Основные его недостатки связаны с достаточно большим давлением, при котором он реализуется, что не позволяет проводить эффективную ионную очистку обрабатываемой поверхности в процессе азотирования, существенно увеличивая длительность обработки.

Другой способ получения газовой плазмы с целью проведения процессов химико-термической обработки основан на использовании дуговых разрядов (концентрация плазмы $(10^{15}–10^{18})\text{ м}^{-3}$ в объемах до нескольких м^3). Наиболее перспективным на настоящий момент является метод формирования разряда низкого давления с накаливаемым катодом, который обеспечивает генерацию плазменного потока без микрокапель [6–9]. С использованием комбинированного катода, включающего накаливаемый и полярный катоды в Институте сильноточной электроники СО РАН был разработан плазмогенератор «ПИНК» [9].

В последние годы активно развиваются методы комбинированной обработки поверхности деталей и изделий. Одним из перспективных вариантов комбинированной обработки является использование, дополнительно к азотированию, облучения материала импульсным электронным пучком [10]. Широкое распространение получили электронные источники на основе взрывоэмиссионного катода [11; 12] и с плазменными катодами [13; 14]. Установка «СОЛО» УНУ «УНИКУУМ», которая была использована при исследованиях, рассмотренных в настоящей работе, оснащена электронным источником с плазменным катодом на основе импульсного дугового разряда низкого давления с сеточной стабилизацией границы катодной плазмы и открытой границей анодной плазмы, позволяет генерировать электронный пучок с током до 300 А, энергией электронов до 25 кВ, длительностью импульса (20–200) мкс, плотностью энергии в импульсе до 80 Дж/см^2 , частотой следования импульсов до 15 с^{-1} [15–17]. Все параметры можно регулировать плавно и независимо друг от друга. Использование ускоряющего напряжения до 25 кВ не требует наличия дополнительной радиационной защиты.

Цель настоящей работы – обнаружение закономерностей формирования структуры, механических и трибологических свойств высокохромистой стали, подвергнутой комплексной обработке, сочетающей облучение импульсным электронным пучком и последующее азотирование в плазме газового разряда низкого давления с использованием плазмогенератора с накаливаемым катодом «ПИНК».

Материал и методики исследования

Материалом исследования являлись образцы стали 20Х23Н18 (аналог США AISI 310). Образцы имели форму пластинок размерами $(15\times 15\times 5)$ мм. Облучение стали осуществляли на установке «СОЛО» [17] (18 кВ, $(10\text{ и }30)\text{ Дж/см}^2$, 200 мкс, 3 имп., $0,3\text{ с}^{-1}$, остаточное давление аргона 0,02 Па). Азотирование (723–873 К, 1–5 ч) проводили на установке «КВИНТА», оснащенной плазмогенератором «ПИНК». Исследования структуры и фазового состава материала осуществляли методами сканирующей и просвечивающей дифракционной электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа. Свойства модифицированного слоя характеризовали микротвердостью и износостойкостью.

Результаты исследования и обсуждение

Показано, что облучение стали импульсным электронным пучком приводит к существенному преобразованию структуры поверхностного слоя стали. При плотности энергии пучка электронов 10 Дж/см^2 (200 мкс, 3 имп.), во-первых, в пределах одного зерна выявляется несколько систем микродвойникования (рис. 1, а); во-вторых, увеличивается количество изгибных контуров экстинкции, что свидетельствует об увеличении амплитуды внутренних полей напряжений и росте количества концентраторов напряжений (рис. 1, б); в-третьих, в 1,5 раза (относительно исходного состояния) увеличивается скалярная плотность дислокаций.

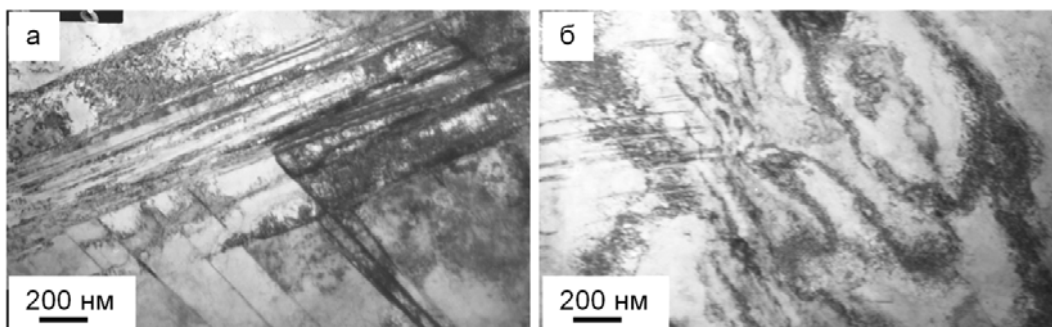


Рис. 1. Структура поверхностного слоя стали, облученной импульсным электронным пучком (10 Дж/см^2 , 200 мкс, 3 имп.)
 Fig. 1. Structure of the surface layer of steel irradiated with a pulsed electron beam (10 J/cm^2 , 200 microseconds, 3 pulses).

Увеличение плотности энергии пучка электронов до 30 Дж/см^2 приводит к плавлению поверхностного слоя и формированию структуры ячеистой кристаллизации (рис. 2, а).

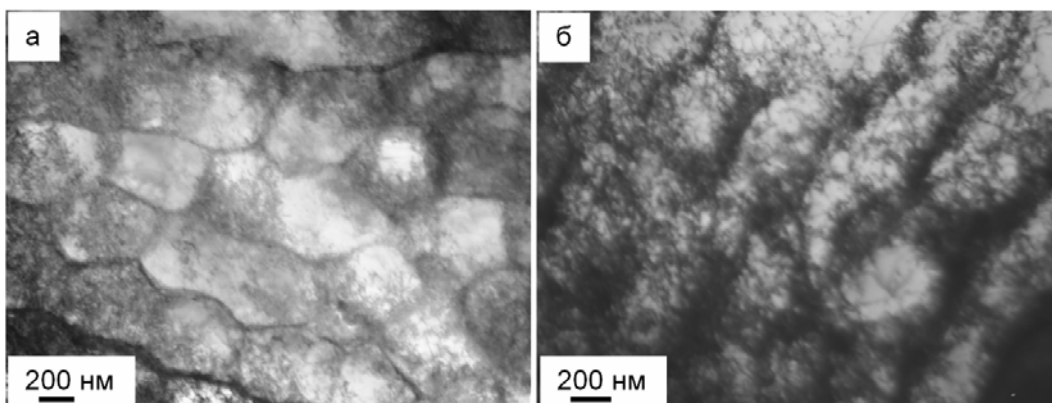


Рис. 2. Структура поверхностного слоя стали, облученной импульсным электронным пучком (30 Дж/см^2 , 200 мкс, 3 имп.)
 Fig. 2. Structure of the surface layer of steel irradiated with a pulsed electron beam (30 J/cm^2 , 200 microseconds, 3 pulses)

Размер ячеек изменяется в пределах 300–400 нм. В объеме ячеек присутствует дислокационная субструктура (рис. 2, б). Скалярная плотность дислокаций $2,3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, т. е. ниже скалярной плотности дислокаций поверхностного слоя стали, облученной электронным пучком в режиме твердофазной модификации материала (10 Дж/см^2 , 200 мкс, 3 имп.). Вдоль границ и в стыках границ ячеек кристаллизации выявляются частицы второй фазы. Анализ микроэлектроннограмм позволяет утверждать, что данные частицы являются преимущественно карбидом хрома.

Установлено методами рентгеноструктурного анализа, что независимо от режима облучения и последующего азотирования в поверхностном слое стали формируется многофазная поликристаллическая структура (рис. 3). Основными фазами исследуемых образцов являются α -Fe и γ -Fe, а также нитрид железа состава Fe_4N и нитрид хрома состава CrN . Максимальное (90,6 %) содержание нитридных фаз выявлено в поверхностном слое стали, прошедшей предварительную обработку импульсным электронным пучком (30 Дж/см², 200 мкс, 3 имп.) и последующее азотирование при 793 К в течение 3 ч.

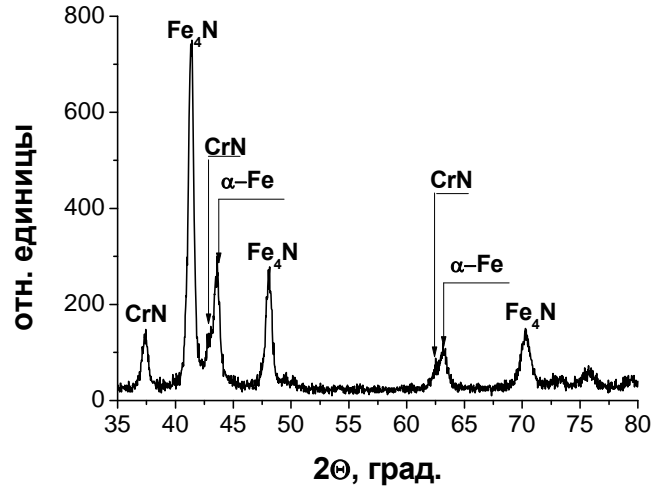


Рис. 3. Участок рентгенограммы образца стали 20Х23Н18, подвергнутой комплексной обработке (30 Дж/см², 200 мкс, 3 имп. + 793 К, 3 ч)

Fig. 3. X-ray section of a AISI 310 steel sample subjected to complex treatment (30 J/cm², 200 microseconds, 3 pulses + 793 K, 3 hours)

Морфологию фаз и дефектную субструктуру модифицированного слоя стали 20Х23Н18 изучали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (прибор JEM 2100F, JEOL). На рис. 4, а приведено электронно-микроскопическое изображение структуры поперечного сечения поверхностного слоя образца стали, подвергнутой комплексной обработке (30 Дж/см², 200 мкс, 3 имп. + 793 К, 3 ч). Отчетливо видно, что формирующаяся структура является многослойной. Выявляются поверхностный слой (рис. 4, слой № I), имеющий столбчатую (пластинчатую) структуру, переходный слой (рис. 4, слой № II), имеющий наноразмерную структуру зеренного типа, и слой термо-диффузионного влияния (рис. 4, слой № III), имеющий структуру зеренного типа с наноразмерными частицами второй фазы. Толщина слоя I достигает 3,5–4 мкм, толщина слоя II – 0,35–0,45 мкм; толщина слоя III – ≈35 мкм. Методами микродифракционного анализа с использованием темнопольной методики установлено, что поверхностный слой стали сформирован чередующимися пластинами нитридов железа и хрома. Данный тип структуры формируется после азотирования при температурах 793 и 873 К. Азотирование при температуре 723 К приводит к формированию в поверхностном слое стали многофазной зеренной структуры субмикронных размеров (рис. 5). В объеме зерен наблюдаются наноразмерные (5–12 нм) включения нитридов железа и хрома.

Механические (микротвердость) и трибологические (износостойкость при сухом трении) испытания образцов стали 20Х23Н18, подвергнутой комплексной обработке, позволили выявить для каждой из температур азотирования режимы модифицирования, показавшие наилучшие свойства. Наиболее высокий комплекс свойств выявлен у образцов, подвергнутых облучению (30 Дж/см², 200 мкс, 3 имп.) и последующему азотированию (793 К, 3 ч). Толщина упрочненного слоя данных образцов составляет 40 мкм, твердость на поверхности модифицирования

19 ГПа (превышает твердость стали перед модифицированием в 11,2 раза и твердость стали после облучения импульсным электронным пучком в 8 раз); параметр износа (величина, обратная износостойкости) – $0,7 \times 10^{-6}$ мм³/Н×м (меньше параметра износа стали перед модифицированием, равного 495×10^{-6} мм³/Н×м, более чем в 700 раз и меньше параметра износа стали после облучения электронным пучком, равного 520×10^{-6} мм³/Н×м, более чем в 750 раз).

Анализ изотермических сечений тройных диаграмм систем Cr–Fe–N, Cr–Ni–N, Fe–Ni–N и Cr–Fe–Ni позволил установить, что в системе Fe–Ni–N существует узкая область твердого раствора на основе фазы γ (Fe, Ni), а в системе Cr–Fe–Ni – обширная область трехкомпонентного твердого раствора (Cr, Fe, Ni) (рис. 6) [21]. Все это позволило предположить, что в четырехкомпонентной системе Cr–Fe–Ni–N возможно образование четырехкомпонентного твердого раствора (Cr, Fe, Ni, N) на основе γ (Fe, Ni) фазы.

Следует отметить, что представленный в данной статье метод модификации поверхности металлов и сплавов интенсивным импульсным электронным пучком, позволяющий значительно улучшить физико-механические свойства поверхностных слоев металлов и сплавов, достаточно подробно рассмотрен в работах [22–28].

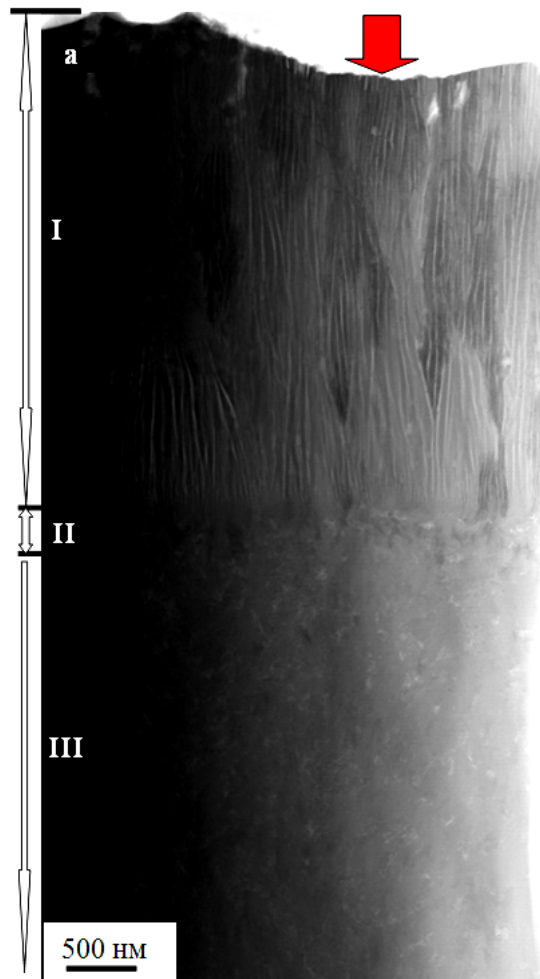


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение структуры поперечного сечения образца стали 20Х23Н18, подвергнутой комплексной обработке (30 Дж/см², 200 мкс, 3 имп. + 793 К, 3 ч); изображение, полученное методами STEM

Fig. 4. Electron microscopic image of the cross-sectional structure of a AISI 310 steel sample subjected to complex processing (30 J/cm², 200 microseconds, 3 pulses. + 793 K, 3 hours); image obtained by STEM methods

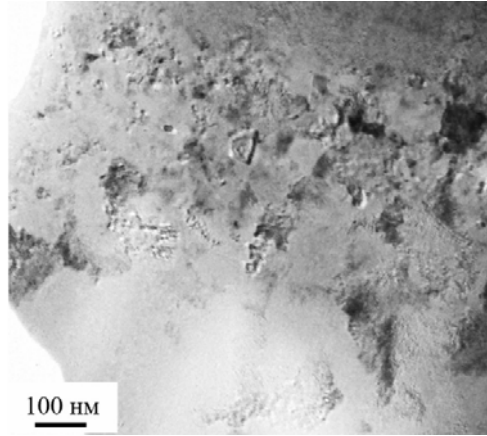


Рис. 5. Электронно-микроскопическое изображение структуры поперечного сечения образца стали 20Х23Н18, подвергнутой комплексной обработке (30 Дж/см², 200 мкс, 3 имп. + 723 К, 3 ч)

Fig. 5. Electron microscopic image of the cross-sectional structure of a AISI 310 steel sample subjected to complex processing (30 J/cm², 200 microseconds, 3 pulses + 723 K, 3 hours)

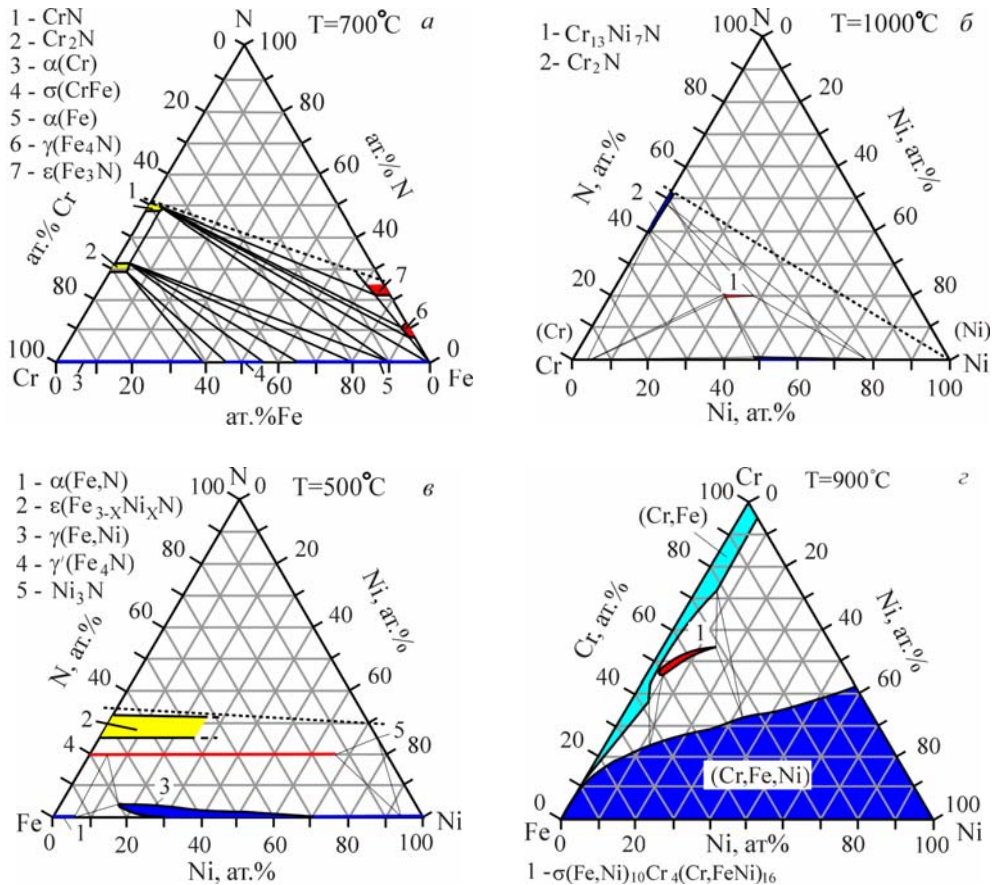


Рис. 6. Изотермические сечения тройных систем Cr-Fe-N [18], Cr-Ni-N [19], Fe-Ni-N [20] и Cr-Fe-Ni [21]

Fig. 6. Isothermal sections of triple systems Cr-Fe-N [18], Cr-Ni-N [19], Fe-Ni-N [20] и Cr-Fe-Ni [21]

Заключение

Комплексным методом, совмещающим в определенной последовательности облучение импульсным электронным пучком и азотирование в плазме газового разряда низкого давления с использованием плазмогенератора с накаливаемым катодом «ПИНК», осуществлена обработка поверхности образцов стали 20Х23Н18. Установлено, что после азотирования при температуре 723 К в поверхностном слое облученных образцов стали нитриды железа и хрома формируются в виде наноразмерных частиц округлой формы. При температурах азотирования 793 и 873 К в поверхностном слое стали формируется структура пластинчатого типа, образованная чередующимися параллельными друг другу пластинами нитрида железа и нитрида хрома. Показано, что максимальная микротвердость, 19 ГПа (превышает твердость стали перед модифицированием в 11,2 раза и твердость стали после облучения электронным пучком в 8 раз) и минимальный параметр износа, $k = 0,7 \times 10^{-6}$ мм³/Н·м (меньше параметра износа стали перед модифицированием более чем в 700 раз и меньше параметра износа стали после облучения электронным пучком более чем в 750 раз), наблюдаются на образцах, подвергнутых облучению при плотности энергии пучка электронов 30 Дж/см², 200 мкс, 3 имп. и последующему азотированию при температуре 793 К в течение 3 ч. Толщина упроченного слоя составляет 40 мкм. Установлено, что образцы, продемонстрировавшие наиболее высокие значения твердости и износостойкости, имеют в поверхностном слое максимальное (90,6 %) содержание нитридных фаз (нитриды хрома и железа).

Библиографические ссылки

1. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Б. Н. Арзамасов, А. Г. Братухин, Ю. С. Елисеев, Т. А. Панайоти. М. : МГТУ, 1999. 400 с.
2. Берлин Е. В., Коваль Н. Н., Сейдман Л. А. Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей. М. : Техносфера, 2012. 464 с.
3. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки / Н. Н. Коваль, Ю. Ф. Иванова и др. Томск : НТЛ, 2016. 304 с.
4. Lie Sh., Liang W., Yizuo W., Chunhua W. Plasma nitriding of AISI 304 austenitic stainless steel with pre-shot penning // *Surface and Coatings Technology*. 2010. Vol. 204, No. 20, P. 3222–3227.
5. Mirjani M., Shafyei A., Ashrafizadeh F. Plasma and gaseous nitrocarburizing of C60W steel for tribological applications // *Vacuum*. 2009. Vol. 83, No. 7, P. 1043–1048.
6. Meletis E. I. Intensified plasma-assisted processing: science and engineering // *Surface and Coatings Technology* // *Surface and Coatings Technology*. 2002. Vol. 149, No. 2-3, P. 95–113.
7. Wei R., Benn C. R., Cooper C. V. High Intensity Plasma Ion Nitriding of AerMet 100 Martensitic Steel // *Plasma Process. Polym.* 2007. Vol. 4, No. 1, P. 700–706.
8. A new high-temperature plasma immersion ion implantation system with electron heating / R. M. Oliveira, J. A. N. Goncalves, M. et al. Ueda // *Surface and Coatings Technology*. 2010. Vol. 204, No. 18-19. P. 3009–3012.
9. Генерация объемной плазмы дуговым разрядом с накаливаемым катодом / П. М. Щанин, Н. Н. Коваль, И. М. Гончаренко, С. В. Григорьев // *Физика и химия обработки материалов*. 2001. № 3. С. 16–19.
10. Грибков В. А., Григорьев Ф. И., Калинин Б. А. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов. М. : Круглый стол, 2001. 528 с.
11. Nazarov D. S., Ozur G. E., Proskurovsky D. I. Production of Low-Energy, High-Current Electron Beams in a Reflected Discharge Plasma-Anode Gun // *Proc. of 11th IEEE Int. Pulsed Power Conference*. Baltimore. USA. 1997. Vol. II. P. 1335–1340.

12. Engelko V., Mueller G., Bluhm H. Influence of particle fluxes from target on characteristics of intense electron beams // *Vacuum*. 2001. Vol. 62/2-3. P. 97–103.
13. Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером / Н. В. Гаврилов, В. И. Гушенец, Н. Н. Коваль др. Екатеринбург : УИФ Наука, 1993. 148 с.
14. Effect of intensified emission during the generation of a submillisecond low-energy electron beam in a plasma-cathode diode / S. V. Grigoriev, N. N. Koval, V. N. Devjatkov, A. D. Teresov // *Proc. 9th Intern. Conf. On Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows*. Tomsk. 2008. P. 19–22.
15. Koval N. N., Ivanov Yu. F. Nanostructuring of surfaces of metaloceramic and ceramic materials by electron-beams // *Russian Physics Journal*. 2008. Vol. 51. P. 505–516.
16. Complex electron-ion-plasma treatment of titanium: methods, structure, properties / Yu. F. Ivanov, O. V. Krygina, E. A. Petrikova et al. // *High Temperature Material Processes*. 2017. Vol. 21(1). P. 53–64.
17. Коваль Н. Н., Иванова Ю. Ф. Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов. Томск : НТЛ, 2016. 312 с.
18. Raghavan V. The Cr-Fe-N System in Phase Diagrams of Ternary Iron Alloys // *Indian Inst. Metals, Calcutta*. 1987. Vol. 1. P. 171–182.
19. Hertzman S. A. Study of Equilibria in the Fe-Cr-Ni-Mo-C-N System at 1273 K // *Metallurgical Transactions, Section A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 1987. Vol. 18. P. 1767–1778.
20. Frisk K. A. Thermodynamic Evaluation of the Fe-Ni-N System // *Z. Metallkd.* 1991. No. 82. P. 59–66.
21. Lee B.-J. A. Thermodynamic Evaluation of the Fe-Cr-Ni System // *J. Korean Inst. Met.* 1993 Vol. 31. P. 480–489.
22. Структурно-фазовое состояние и свойства заэвтектического силумина, обработанного импульсным электронным пучком / Ю. Ф. Иванов, С. П. Ереско, А. А. Клопотов и др. // *Сибирский аэрокосмический журнал*. 2021. Т. 22, № 2. С. 371–382.
23. Структурно-фазовые состояния наноструктурированных поверхностных слоев титана BT1-0 после комбинированной электронно-ионно-плазменной обработки / Ю. Ф. Иванов, А. Д. Тересов, В. Е. Громов и др. // *Решетневские чтения : материалы XVIII Междунар. науч. конф. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2014. Ч. 1. С. 291–293.*
24. Особенности структурно-фазового состояния на поверхности силумина, сформированного методами электронно-ионно-плазменной обработки / Ю. Ф. Иванов, С. П. Ереско, А. А. Клопотов и др. // *Решетневские чтения : материалы XXI Междунар. науч. конф. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2017. Ч. 1. С. 615–617.*
25. Разработка комбинированного электронно-ионно-плазменного метода формирования многофазных субмикронаноразмерных сплавов на основе алюминия / Ю. Ф. Иванов, С. П. Ереско, Ю. Х. Ахмадеев и др. // *Решетневские чтения : материалы XVIII Междунар. науч. конф. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2018. Ч. 1. С. 490–492.*
26. Многоцикловое поверхностное легирование силумина титаном / Ю. Ф. Иванов, А. А. Клопотов, С. П. Ереско и др. // *Решетневские чтения : материалы XXIII Междунар. науч.-практ. конф. / СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2019. Ч. 1. С. 526–528.*
27. Разработка комбинированного электронно-ионно-плазменного метода формирования многофазных субмикронаноразмерных сплавов на основе алюминия / Ю. Ф. Иванов, С. П. Ереско, Ю. Х. Ахмадеев и др. // *Сибирский журнал науки и технологий*. 2019. Т. 20, № 1. С. 88–98.
28. Комплексный электронно-ионно-плазменный метод азотирования высоколегированной стали / С. П. Ереско, Ю. Ф. Иванов, Е. А. Петрикова и др. // *Решетневские чтения : материалы XXV Междунар. науч.-практ. конф. / СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2021. Ч. 1. С. 555–557.*

References

1. Arzamasov B. N., Bratuhin A. G., Eliseev Ju. S., Panajoti T. A. *Ionnaya himiko-termicheskaya obrabotka splavov* [Ionic chemical-thermal treatment of alloys]. Moscow, MGTU Publ., 1999, 400 p.
2. Berlin E. V., Koval' N. N., Sejdman L. A. *Plazmennaya himiko-termicheskaja obrabotka poverhnosti stal'nyh detaley* [Plasma chemical-thermal surface treatment of steel parts]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2012, 464 p.
3. Kovalja N. N., Ivanova Ju. F. *Jevolyuciya struktury poverhnostnogo sloja stali, podvergnutoy elektronno-ionno-plazmennym metodam obrabotki* [Evolution of the structure of the surface layer of steel subjected to electron-ion-plasma processing methods]. Tomsk, NTL Publ., 2016, 304 p.
4. Lie Sh., Liang W., Yizuo W., Chunhua W. Plasma nitriding of AISI 304 austenitic stainless steel with pre-shot penning. *Surface and Coatings Technology*. 2010, Vol. 204, No. 20, P. 3222–3227.
5. Mirjani M., Shafyei A., Ashrafizadeh F. Plasma and gaseous nitrocarburizing of C60W steel for tribological applications. *Vacuum*. 2009, Vol. 83, No. 7, P. 1043–1048.
6. Meletis E. I. Intensified plasma-assisted processing: science and engineering. *Surface and Coatings Technology*. 2002, Vol. 149, No. 2-3, P. 95–113.
7. Wei R., Benn C. R., Cooper C. V. High Intensity Plasma Ion Nitriding of AerMet 100 Martensitic Steel. *Plasma Process. Polym.* 2007, Vol. 4, No. 1, P. 700–706.
8. Oliveira R. M., Goncalves J. A. N., Ueda M., Rossi J. O., Rizzo P. N. A new high-temperature plasma immersion ion implantation system with electron heating. *Surface and Coatings Technology*. 2010, Vol. 204, No. 18-19, P. 3009–3012.
9. Shhanin P. M., Koval' N. N., Goncharenko I. M., Grigor'ev S. V. [Generation of volumetric plasma by an arc discharge with an incandescent cathode]. *Fizika i himiya obrabotki materialov*. 2001, No. 3, P. 16–19 (In Russ.).
10. Gribkov V. A., Grigoriev F. I., Kalin B. A. *Perspektivnye radiacionno-puchkovye tehnologii obrabotki materialov* [Promising radiation-beam technologies of materials processing]. Moscow, Kruglyy stol Publ., 2001, 528 p.
11. Nazarov D. S., Ozur G. E., Proskurovsky D. I. Production of Low-Energy, High-Current Electron Beams in a Reflected Discharge Plasma-Anode Gun. *Proc. of 11th IEEE Int. Pulsed Power Conference*. Baltimore, USA, 1997, Vol. II, P. 1335–1340.
12. Engelko V., Mueller G., Bluhm H. Influence of particle fluxes from target on characteristics of intense electron beams. *Vacuum*. 2001, Vol. 62/2-3, P. 97–103.
13. Gavrilov N. V., Gushenec V. I., Koval' N. N. *Istochniki zaryazhennyh chastic s plazmennym emitterom* [Sources of charged particles with a plasma emitter]. Ekaterinburg, UIF Nauka Publ., 1993, 148 p.
14. Grigoriev S. V., Koval N. N., Devjatkov V. N., Teresov A. D. Effect of intensified emission during the generation of a submillisecond low-energy electron beam in a plasma-cathode diode. *Proc. 9th Intern. Conf. On Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows*. Tomsk, 2008, P. 19–22.
15. Koval N. N., Ivanov Yu. F. Nanostructuring of surfaces of metalloceramic and ceramic materials by electron-beams. *Russian Physics Journal*. 2008, Vol. 51, P. 505–516.
16. Ivanov Yu. F., Krysina O. V., Petrikova E. A. et al. Complex electron-ion-plasma treatment of titanium: methods, structure, properties. *High Temperature Material Processes*. 2017, Vol. 21(1), P. 53–64.
17. Koval N. N., Ivanov Yu. F. *Jelektronno-ionno-plazmennaja modifikacija poverhnosti cvetnyh metallov i splavov* [Electron-ion-plasma modification of the surface of non-ferrous metals and alloys]. Tomsk, NTL Publ., 2016, 312 p.

18. Raghavan V. The Cr-Fe-N System in Phase Diagrams of Ternary Iron Alloys. *Indian Inst. Metals, Calcutta*. 1987, Vol. 1, P. 171–182.
19. Hertzman S. A. Study of Equilibria in the Fe-Cr-Ni-Mo-C-N System at 1273 K. *Metallurgical Transactions, Section A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 1987, Vol. 18, P. 1767–1778.
20. Frisk K. A. Thermodynamic Evaluation of the Fe-Ni-N System. *Z. Metallkd.* 1991, No. 82, P. 59–66.
21. Lee B.-J. A. Thermodynamic Evaluation of the Fe-Cr-Ni System. *J. Korean Inst. Met.* 1993, Vol. 31, P. 480–489.
22. Ivanov Yu. F., Yeresko S. P., Klopotov A. A., Rygina M. Ye., Petrikova Ye. A., Teresov A. D. [Structural-phase state and properties of hypereutectic silumin treated with a pulsed electron beam]. *Sibirskiy aerokosmicheskiy zhurnal*. 2021, Vol. 22, No. 2, P. 371–382 (In Russ.).
23. Ivanov Yu. F., Teresov A. D., Gromov V. Ye., Budovskikh Ye. A., Klopotov A. A. [Structural-phase states of nanostructured surface layers of VT1-0 titanium after combined electron-ion-plasma treatment]. *Reshetnevskiy chteniya: materialy XVIII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*. Krasnoyarsk, 2014, Ch. 1, P. 291–293 (In Russ.).
24. Ivanov Yu. F., Yeresko S. P., Klopotov A. A., Petrikova Ye. A., Gromov V. Ye. [Features of the structural-phase state on the surface of silumin, formed by methods of electron-ion-plasma treatment]. *Reshetnevskiy chteniya: materialy XXI Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*. Krasnoyarsk, 2017. Ch. 1, P. 615–617 (In Russ.).
25. Ivanov Yu. F., Yeresko S. P., Akhmadeyev Yu. X., Lopatin I. V., Klopotov A. A. [Development of a combined electron-ion-plasma method for the formation of multiphase submicro-nanosized alloys based on aluminum]. *Reshetnevskiy chteniya: materialy XVIII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*. Krasnoyarsk, 2018, Ch. 1, P. 490–492 (In Russ.).
26. Ivanov Yu. F., Klopotov A. A., Yeresko S. P., Petrikova Ye. A., Lopatin I. V. [Multicycle surface alloying of silumin with titanium]. *Reshetnevskiy chteniya: materialy XXIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Krasnoyarsk, 2019, Ch. 1, P. 526–528 (In Russ.).
27. Ivanov Yu. F., Yeresko S. P., Akhmadeyev Y. K., Lopatin I. V., Klopotov A. A. [Development of a combined electron-ion-plasma method for the formation of multiphase submicro-nanoscale alloys based on aluminum]. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii*. 2019, Vol. 20, No. 1. P. 88–98 (In Russ.).
28. Yeresko S. P., Ivanov Yu. F., Petrikova Ye. A., Teresov A. D., Klopotov A. A. [Complex electron-ion-plasma method of nitriding high-alloy steel]. *Reshetnevskiy chteniya : materialy XXV Mezhdunarodnoy konferentsii*. Krasnoyarsk, 2021, Ch. 1, P. 555–557 (In Russ.).

© Ереско С. П., Иванов Ю. Ф., Петрикова Е. А.,
Тересов А. Д., Клопотов А. А., 2021

Ереско Сергей Павлович – доктор технических наук, заслуженный изобретатель Российской Федерации, член-корреспондент Академии наук ВШ РФ, профессор, профессор кафедры основ конструирования машин; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: eresko07@mail.ru.

Иванов Юрий Федорович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник; Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: yufi55@mail.ru.

Петрикова Елизавета Алексеевна – младший научный сотрудник; Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: petrikova@opec.hcei.tsc.ru.

Тересов Антон Дмитриевич – старший научный сотрудник; Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: tad514@yandex.ru.

Клопотов Анатолий Анатольевич – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры прикладной механики и материаловедения; Томский государственный архитектурно-строительный университет. E-mail: klopotovaa@tsuab.ru.

Eresko Sergei Pavlovich – Dr. Sc., Professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: eresko07@mail.ru.

Ivanov Yurii Fedorovich – Dr. Sc., Chief Researcher; Institute of High Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. E-mail: yufi55@mail.ru.

Petrikova Elizaveta Alekseevna – Junior Researcher; Institute of High-Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. E-mail: petrikova@opee.hcei.tsc.ru.

Teresov Anton Dmitrievich – Senior Researcher; Institute of High-Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. E-mail: tad514@yandex.ru.

Klopotov Anatolii Anatolevich – Dr. Sc., Professor; Tomsk State University of Architecture and Building. E-mail: klopotovaa@tsuab.ru.

УДК 621.785.53

Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-700-707

Для цитирования: Метод автоматизации перемещения плазмотрона шестиосным роботом-манипулятором / А. С. Калашников, М. С. Руденко, А. Д. Кучеренко и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 4. С. 700–707. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-700-707.

For citation: Kalashnikov A. S., Rudenko M. S., Kucherenko A. D., Girn A. V., Mikheev A. E. The method of the automation of the plasmotron movement by six-axis robotic manipulator. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 4, P. 700–707. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-700-707.

Метод автоматизации перемещения плазмотрона шестиосным роботом-манипулятором

А. С. Калашников*, М. С. Руденко, А. Д. Кучеренко, А. В. Гирн, А. Е. Михеев

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

*E-mail: fangy.ko@gmail.com

В статье приставлен метод автоматизации создания траекторий движения плазмотрона шестиосным роботом-манипулятором. Система автоматизации создавалась на базе промышленного робота компании KUKA. Автоматизация создания траекторий движения плазмотрона над поверхностью детали реализована следующим образом: создается траектория движения плазмотрона в графическом редакторе в формате .dwg. Созданный файл загружается в САМ-программу для станков с ЧПУ. САМ-программа преобразует вектор или область, заданную векторами, в управляющую команду в g-code формате, которая затем преобразуется в KRL программой, написанной на языке программирования Python. Разработка программы состояла из двух этапов: создание прямолинейных движений и создание криволинейных движений. Представлен результат работы метода.

Ключевые слова: плазменное напыление, промышленный робот, Python, автоматизация.

The method of the automation of the plasmotron movement by six-axis robotic manipulator

A. S. Kalashnikov*, M. S. Rudenko, A. D. Kucherenko, A. V. Girn, A. E. Mikheev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: fangy.ko@gmail.com

The article presents a method for automating the creation of trajectories of the plasmotron motion by a six-axis robotic manipulator. The automation system was created on the basis of an industrial robot from KUKA. The automation of the creation of trajectories of the plasmotron over the surface of the part is implemented as follows: the trajectory of the plasmotron is created in a graphic editor in the .dwg format. The created file is loaded into the CAM program for CNC machines. A CAM program converts a vector or an area specified by vectors into a control command in g-code format, which is then converted to KRL by a program written in the Python programming language. The development of the program consisted of two

stages: the creation of rectilinear movements and the creation of curvilinear movements. The result of the method is presented.

Keywords: plasma spraying, industrial robot, Python, automation.

Введение

В аэрокосмической, металлургической, нефтедобывающей промышленности с каждым годом повышаются требования по безопасности, надёжности и долговечности изделий при эксплуатации в экстремальных условиях (воздействие высоких температур, динамических нагрузок, коррозионных сред и т. д.). Для обеспечения этих требований возникает необходимость наносить на изделия защитные покрытия. Одним из способов нанесения защитных покрытий является плазменное напыление, которое широко используют в аэрокосмической технике [1–4].

С каждым годом количество изделий, используемых в ракетно-космической технике, растёт, усложняются их форма и размеры [5–8]. В связи с этим способы нанесения плазменных покрытий становятся практически невыполнимыми. Рабочим органом для нанесения покрытий является плазматрон [9–10]. В плазматроне создается струя низкотемпературной плазмы, в которую подается порошок материала покрытия, порошок расплавляется под воздействием температуры плазмы и наносится на подложку-изделие. Однако для получения покрытия плазматрон необходимо перемещать над поверхностью подложки по определённой траектории и с определённой скоростью. Для этого плазматрон размещают на роботе-манипуляторе, который обеспечивает его движение.

На рынке представлено большое количество промышленных роботов-манипуляторов, которые могут передвигать плазматрон в процессе напыления, например роботы компаний KUKA, Doosan ROBOTICS, ABB и др. [11–13]. Робот-манипулятор представляет собой шестиосевой промышленный механизм с приводами и редукторами. На установочном фланце оси A6 устанавливается плазматрон (рис. 1).

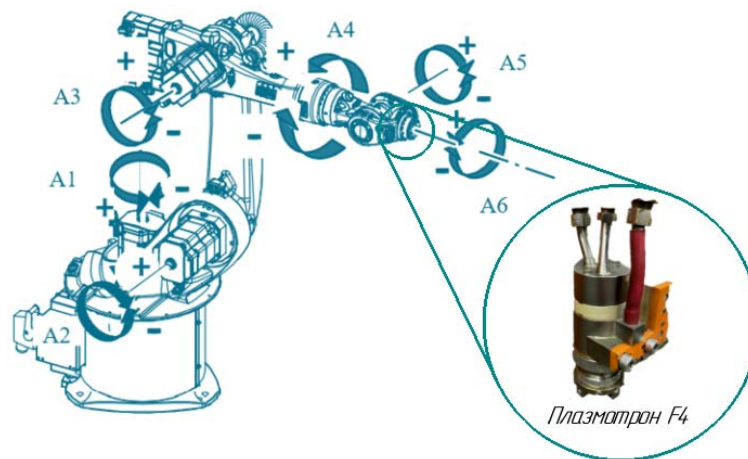


Рис. 1. Оси шестиосевого промышленного робота-манипулятора и возможность их передвижения

Fig. 1. Axes of a six-axis industrial robotic arm and the possibility of their movement

Существуют плазматроны, которые способны наносить покрытие в сложно достижимые места [14], но без программы автоматизации движения плазматрона их эффективность падает. Компании-производители промышленных роботов предоставляют платные программные обеспечения для создания управляющих программ, возможности функционала которых чрезмерны для передвижения плазматрона во время нанесения покрытия. Приобретение таких программ-

ных обеспечений не целесообразно, однако программирование траекторий в ручном режиме является трудоемким. Поэтому задача разработки метода автоматического управления передвижения плазматрона промышленным роботом является актуальной.

Система автоматизации процесса управления передвижения разрабатывалась для промышленного робота серии KUKA KR16-2, стоит отметить, что метод может работать и с другими версиями промышленных роботов. В случае перемещения плазматрона 6-осным роботом KUKA, управление им обеспечивается с переносного программирующего устройства – пульта управления KUKA smartPAD. Роботы-манипуляторы компании KUKA программируются на языке KRL. Траектории движения плазматрона можно задавать следующими видами команд:

- движение Point-to-Point (PTP) – перемещение происходит вдоль быстрой траектории, которая, как правило, не является прямой линией. Из-за того, что оси робота совершают вращательные движения, нелинейные траектории выполняются быстрее линейных;
- линейное движение (LIN) – движение выполняется по прямой линии;
- круговое движение (CIRC) – движение по круговой траектории. Задаются вспомогательная (лежащая на траектории) и целевая точки;
- движения SPLINE – для сложных изогнутых траекторий [11].

Автоматизация создания траекторий обработки плоской поверхности реализована следующим образом: создается траектория движения плазматрона в графическом редакторе в формате .dwg. Созданный файл загружается в САМ-программу для станков с ЧПУ. САМ-программа преобразует вектор или область, заданную векторами, в управляющую команду в g-code формате, которая затем преобразуется в KRL программой, написанной на языке программирования Python.

Для этого требуется создать программу на пульте управления KUKA smartPAD. Установить начальную точку и сохранить её. Программа на пульте управления сохраняется в двух файлах. В первом файле формата .src хранится код программы, а во втором файле формата .dat хранятся координаты точек, углы поворота осей и другие необходимые параметры.

Разработанная нами программа на языке Python производит синтаксический анализ файлов с пульта управления KUKA smartPAD и файла траектории в g-code формате с САМ-программы с помощью регулярных выражений, используя модуль re [15]. Затем программа формирует файл с управляющей траекторией, дополняя код программы в файле с форматом .src. Данный файл загружается на пульт управления KUKA smartPAD.

Алгоритм действий создания управляющей программы представлен в блок-схеме на рис. 2.

Созданная программа преобразует g-code формат в KRL в движение LIN, что было реализовано на первом этапе разработки метода. Далее расстояние между точками траектории анализируется и определяется, лежат они на прямолинейном или криволинейном участке, что было реализовано на втором этапе разработки.

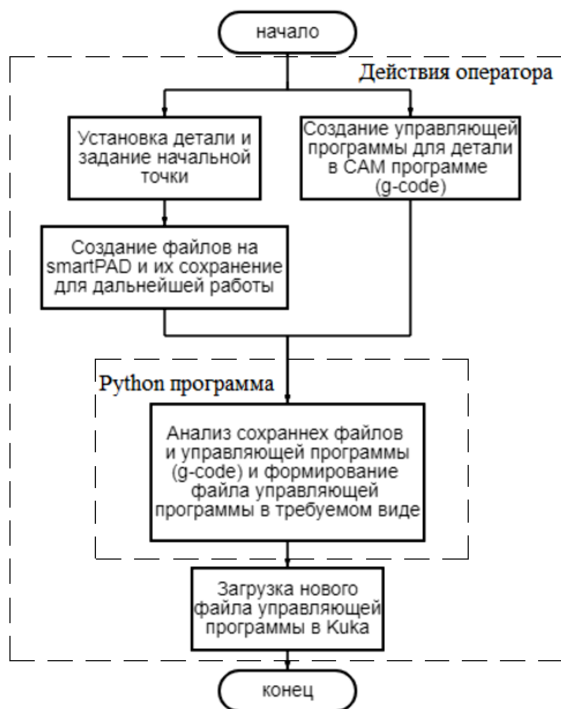


Рис. 2. Блок-схема автоматизированного алгоритма создания управляющей программы

Fig. 2. The flowgraph of an automated algorithm for creating a control program

Первый этап

На первом этапе реализовано создание прямолинейных траекторий (движение LIN), что необходимо и достаточно для нанесения покрытия на прямоугольные участки поверхности детали.

В созданной траектории движения САМ программой начальная точка задается нулевыми координатами, для этого, как указано в блок-схеме, требуется задать начальную точку, по которой будут пересчитываться все точки траектории. Траектория в g-code формате представлена на рис. 3. Эти данные переводятся в формат KRL. Учитывается возможность наличия изменения координаты по одной оси. Лишние для нас данные, такие как обороты шпинделя и другие, игнорируются.

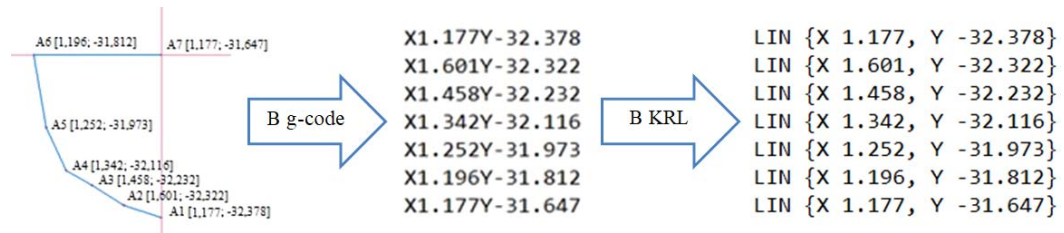


Рис. 3. Задание прямолинейного движения в управляющей программе в g-code формате и в KRL

Fig. 3. Specifying a rectilinear motion in the control program in g-code format and in KRL

Второй этап

На втором этапе оценены команды движения CIRC и SPLINE для кривых участков траекторий, так как использование LIN для этих целей приводит к долгому «зависанию» плазмотрона над одной областью, что нарушает расчетный режим напыления. Результаты оценки показали, что для поставленной задачи выгоднее использовать движение SPLINE, так как оно обеспечивает плавное движение с заданной скоростью без «зависаний», в отличие от CIRC.

Алгоритм реализации с движением SPLINE основан на программе первого этапа с дальнейшим анализом точек траектории. Кривую линию САМ-программа делит на множество точек, соответственно, оценивая расстояние между двумя соседними точками по формуле $r_n = \sqrt{(x_{n+1} - x_n)^2 + (y_{n+1} - y_n)^2}$, можно определить, лежат они на прямой или кривой линии и, в соответствии, с этим изменить команду линейного движения на SPLINE.

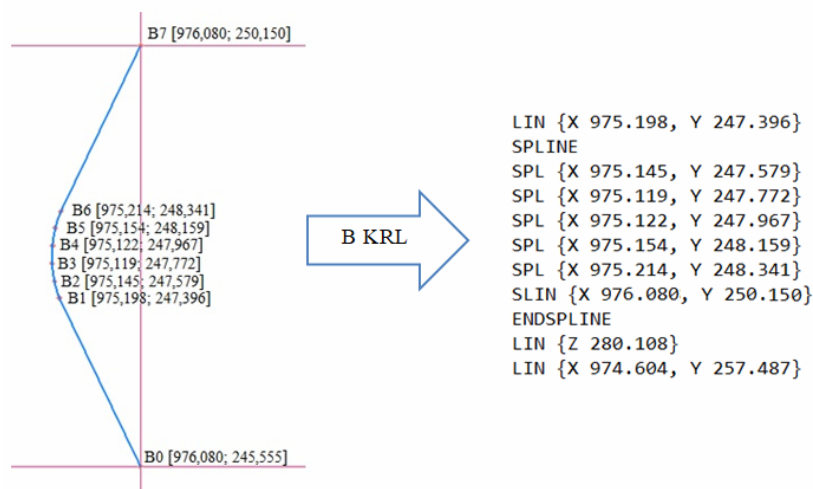


Рис. 4. Задание криволинейного движения в управляющей программе (KRL)

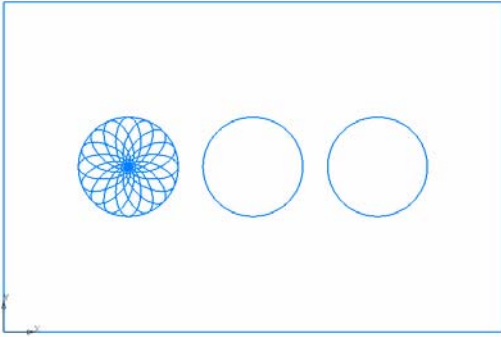
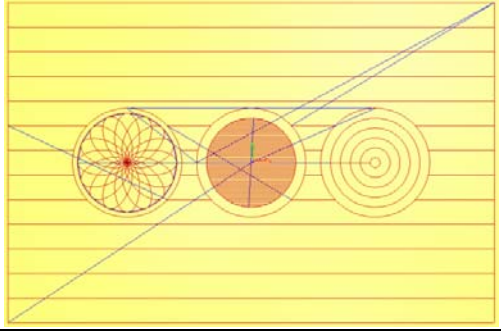
Fig. 4. Defining a curvilinear movement in the control program (KRL)

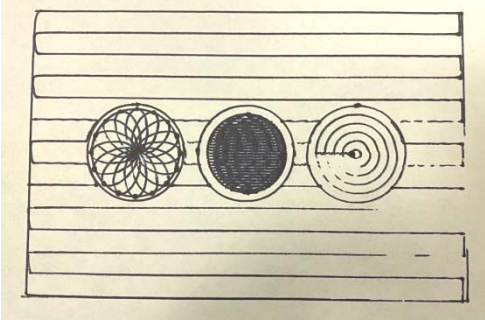
Для достижения этого необходимо устранить отсутствие одной из координат точки при её повторении (при движении параллельно осям X или Y). Начало движения SPLINE задается командой SPLINE и заканчивается командой ENDSPLINE, движение внутри этого блока формируется командой SPL для кривой линии и командой SLIN для прямой линии. Перемещение по оси Z формируется изменением только этой координаты, осуществляется движением LIN. Команды в управляющей программе имеют вид, представленный выше на рис. 4.

Заключение

Созданная программа на языке Python позволяет программировать движение плазматрона на 6-осном роботе-манипуляторе KUKA KR16-2, используя САМ-программу для станков с ЧПУ. При этом упрощается создание траекторий движения плазматрона по поверхности изделий. В таблице представлены этапы автоматизации создания траекторий движения плазматрона. Для визуализации результата программы на установочном фланце робота-манипулятора был установлен маркер, который отобразил заданную траекторию.

Этапы автоматизации создания траекторий

№	Отображение траекторий	Вид
1	В графическом редакторе	
2	В САМ-программе для станков с ЧПУ	
3	В g-code формате	<pre>X73.500Y-41.038 X-73.500Y-41.038 X-73.500Y-33.577 X73.500Y-33.577 X73.500Y-26.115 X-73.500 X-73.500Y-18.654 X73.500Y-18.654</pre>
4	В KRL	<pre>LIN {X 907.113, Y 209.41} LIN {X 907.113, Y 216.871} LIN {X 1054.113, Y 216.871} LIN {X 1054.113, Y 224.333} LIN {X 1030.237, Y 224.333} SPLINE SPL {X 1030.745, Y 224.91} SPL {X 1031.229, Y 225.514} SPL {X 1031.685, Y 226.142} SPL {X 1032.113, Y 226.793}</pre>

№	Отображение траекторий	Вид
5	Результат	

В дальнейшем планируется доработать программу для объемных траекторий, например, используя в САМ-программе чистовую обработку рельефа объемной детали, можно напылять покрытие плазмотроном на объемные детали несложных форм, такие как рефлектор. А также планируется уменьшить число шагов алгоритма автоматизации внедрением Python-программы в САМ-программу макросом и рассмотреть другие варианты автоматизации.

Библиографические ссылки

1. Хасуй А. Техника напыления. М. : Машиностроение, 1975. 288 с.
2. Кудинов В. В Плазменные покрытия. М. : Наука, 1977. 270 с.
3. Михеев А. Е., Колмыков В. А. Повышение эксплуатационных характеристик поверхностей элементов конструкций летательных аппаратов. Автоматизация процессов обработки. М. : МАКС Пресс, 2002. 224 с.
4. Зуев, Д. М., Шахматов А. В., Ханов В. Х. Концепция реконфигурируемой космической лаборатории на примере космического аппарата ReshUCube // Космические системы. М. : Перо, 2021. С. 17–18.
5. Aysha S. Hameed, Bindu G. R-Single segment approach and landing guidance and control for an unpowered reusable launch vehicle / Aerospace Science and Technology. 2021. No. 115. P. 106777. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106777>.
6. Формирование сложнопрофильных деталей космических аппаратов методом селективного лазерного сплавления / А. И. Ананьев, Ю. П. Борщев, М. Ю. Квардаков и др. // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2017. № 1(35). С. 87–92.
7. Ethan P. Hopping, Wensheng Huang, Kunning G. Xu. Small Hall Effect Thruster with 3D Printed Discharge Channel: Design and Thrust Measurements // Aerospace. 2021. Vol. 8. P. 227. Doi: <https://doi.org/10.3390/aerospace8080227>.
8. Lawand Lydia, Massimo Panarotto, Petter Andersson, Ola Isaksson, Michael Kokkolaras. Dynamic Lifecycle Cost Modeling for Adaptable Design Optimization of Additively Remanufactured Aeroengine Components // Aerospace. 2020. No. 8. P. 110. Doi: <https://doi.org/10.3390/aerospace7080110>.
9. Плазмотрон для нанесения покрытий из тугоплавких дисперсных материалов / А. Е. Михеев, А. В. Гирн, Д. В. Раводина, И. О. Якубович // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 2. С. 365–372. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-2-365-372.
10. Напыление покрытий плазмотроном с подачей порошка спутно плазменному потоку / А. Е. Михеев, А. В. Гирн, И. О. Якубович, М. С. Руденко // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 1. С. 194–200. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-1-194-200.

11. Компания KUKA Roboter [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kuka.com> (дата обращения: 28.11.2021).
12. Производитель промышленных роботов Doosan Robots [Электронный ресурс]. URL: <https://doosanrobots.ru> (дата обращения: 28.11.2021).
13. Промышленные роботы АБВ [Электронный ресурс]. URL: <https://new.abb.com/products/robotics/ru/> (дата обращения: 28.11.2021).
14. Плазматрон для нанесения покрытий на внутренние поверхности изделий / А. Е. Михеев, А. В. Гирн, И. О. Якубович, М. С. Руденко // Сибирский журнал науки и технологий. 2020. Т. 21, № 2. С. 274–278. Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-2-274-278.
15. re – Regular expression operations [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.python.org/3/library/re.html> (дата обращения: 28.11.2021).

References

1. Khasuy A. *Tekhnika napyleniya* [Spraying technique]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 288 p.
2. Kudinov V. V. *Plazmennye pokrytiya* [In Plasma coatings]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 270 p.
3. Mikheev A. E., Kolmykov V. A. [Improving the performance characteristics of the surfaces of structural elements of aircraft.]. *Avtomatizatsiya protsessov obrabotki*. Moscow, MAKS Press Publ., 2002, 224 p.
4. Zuev D. M., Shakhmatov A. V., Khanov V. Kh. [The concept of reconfigurable space lab on the example of the spacecraft ReshUCube]. *Kosmicheskie sistemy*. Moscow, Pero Publ., 2021, P. 17–18.
5. Aysha S. Hameed, Bindu G. R-Single segment approach and landing guidance and control for an unpowered reusable launch vehicle. *Aerospace Science and Technology*. 2021, No. 115, P. 106777. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106777>.
6. Anan'ev A. I., Borshchev Yu. P., Kvardakov M. Yu. et al. [The formation of geometrically-complex parts of space vehicles by means of selective laser melting]. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*. 2017, No. 1(35), P. 87–92 (In Russ.).
7. Ethan P. Hopping, Wensheng Huang, Kunning G. Xu. Small Hall Effect Thruster with 3D Printed Discharge Channel: Design and Thrust Measurements. *Aerospace*. 2021, Vol. 8, P. 227. Doi: <https://doi.org/10.3390/aerospace8080227>.
8. Lawand Lydia, Massimo Panarotto, Petter Andersson, Ola Isaksson, Michael Kokkolaras. Dynamic Lifecycle Cost Modeling for Adaptable Design Optimization of Additively Remanufactured Aeroengine Components. *Aerospace*. 2020, No. 8, P. 110. Doi: <https://doi.org/10.3390/aerospace7080110>.
9. Mikheev A. E., Girn A. V., Ravodina D. V., Yakubovich I. O. [Plasmatron for coating of refractory dispersed materials]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 2, P. 365–372 (In Russ.). Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-2-365-372.
10. Mikheev A. E., Girn A. V., Yakubovich I. O., Rudenko M. S. [Spraying of coatings with a plasma torch with powder feeding in a satellite plasma]. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 1, P. 194–200 (In Russ.). Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-1-194-200.
11. *Kompaniya KUKA Roboter* [KUKA Roboter Company]. Available at: <https://www.kuka.com> (accessed 28.11.2021).
12. *Proizvoditel' promyshlennykh robotov Doosan Robots* [Manufacturer of industrial robots Doosan Robots]. Available at: <https://doosanrobots.ru> (accessed: 28.11.2021).
13. *Promyshlennyye roboty ABB* [BB Industrial robots]. Available at: <https://new.abb.com/products/robotics/ru/> (accessed: 28.11.2021).

14. Mikheev A. E., Girn A. V., Yakubovich I. O., Rudenko M. S. [Plasmatron for coating the inner surfaces of products]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2020, Vol. 21, No. 2, P. 274–278 (In Russ.). Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-2-274-278.

15. re – Regular expression operations. Available at: <https://docs.python.org/3/library/re.html> (accessed: 28.11.2021).

© Калашников А. С., Руденко М. С., Кучеренко А. Д.,
Гирн А. В., Михеев А. Е., 2021

Калашников Алексей Сергеевич – студент 5 курса; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: fangy.ko@gmail.com.

Руденко Михаил Сергеевич – ассистент; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: mister.m.rudenko@gmail.com.

Кучеренко Антон Дмитриевич – студент 5 курса; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: dartantonton@yandex.ru.

Михеев Анатолий Егорович – доктор технических наук, профессор; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: michla@mail.ru.

Гирн Алексей Васильевич – кандидат технических наук, доцент; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: girn007@gmail.com.

Kalashnikov Alexey Sergeevich – fifth-year student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: fangy.ko@gmail.com.

Rudenko Mikhail Sergeevich – Assistant; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: mister.m.rudenko@gmail.com.

Kucherenko Anton Dmitrievich – fifth-year student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: dartantonton@yandex.ru.

Girn Alexey Vassilyevich – Cand. Sc., Associate Professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: girn007@gmail.com.

Mikheev Anatoly Yegorovich – Dr. Sc., Professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: michla@mail.ru.

УДК 620.187.3, 58.085

Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-708-717

Для цитирования: Влияние структуры хлоропластов на плотность фотонных состояний и эффективность преобразования солнечной энергии / К. А. Шабанова, Ю. Ю. Логинов, Е. Р. Буханов и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 4. С. 708–717. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-708-717.

For citation: Shabanova K. A., Loginov Y. Y., Bukhanov E. R., Volochaev M. N., Pyatina S. A. The chloroplast structure influence on photon states density and efficiency of solar energy conversion. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 4, P. 708–717. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-708-717.

Влияние структуры хлоропластов на плотность фотонных состояний и эффективность преобразования солнечной энергии *

К. А. Шабанова^{1**}, Ю. Ю. Логинов¹, Е. Р. Буханов^{2,3},
М. Н. Волочаев², С. А. Пятина^{2,4}

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

²Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50, стр. 38

³Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50

⁴Сибирский федеральный университет, Институт фундаментальной биологии и биотехнологии
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, Свободный просп., 79, корп. 4

**E-mail: shabanova.ksenia@mail.ru

Благодаря поглощению солнечной энергии в хлоропластах – зелёных пластидах – происходит преобразование солнечной энергии в энергию химических связей. Изучение процессов фотосинтеза и увеличение его эффективности актуально для разработки замкнутых систем жизнеобеспечения, в том числе, при длительных полетах в космосе. Хлоропласты в свою очередь наполнены стопками высокоупорядоченных тилакоидных мембран (гранами). На границе этих мембран и располагаются пигмент-белковые фотосинтетические комплексы. Долгое время структурным характеристикам хлоропластов не уделялось должного внимания и они изучались как изотропные вещества, однако в последние годы было показано, что они обладают анизотропными свойствами и высоким коэффициентом преобразования при разделении зарядов. В данной работе был предложен подход к более точному пространственному определению гран в хлоропластах растений и определению размеров единичного блока. Тилакоидные мембраны и границы состоящей из них грани отчетливо видны в электронном микроскопе, если пучок электронов направлен строго перпендикулярно. Было замечено, что при повороте столика разные области мембран становятся либо расплывчатыми, либо более четкими, что говорит о том, что грани в хлоропластах располагаются не в одной плоскости. Также проведено сравнение влияния разных внешних условий на структуру хлоропласта растения не только через сравнение морфологических характеристик, но и посредством численного моделирования и сравнения спектральных свойств объектов. Для численного моделирования были определены периодические решетки для основных структурных единиц хлоропластов разных образцов. На основе этих решеток были рассчитаны спектры пропускания с помощью метода трансфер матриц. Также полученные значения электромагнитной волны вдоль решетки позволили рассчитать графики плотности фотонных состояний. Результаты расчетного метода графиков плотности фотонных состояний на основе структуры хлоропластов позволили не просто оценить

* Исследования были выполнены на оборудовании центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН. The studies were performed on the equipment of Resource sharing center of the FRC KSC of the SB RAS.

возможную эффективность фотосинтеза, но и напрямую связать эти модели с внешними условиями, влияющими на растение.

Ключевые слова: биофотонный кристалл, плотность фотонных состояний, электронная микроскопия, фотосинтез.

The chloroplast structure influence on photon states density and efficiency of solar energy conversion

K. A. Shabanova^{1**}, Y. Y. Loginov¹, E. R. Bukhanov^{2,3},
M. N. Volochaev², S. A. Pyatina^{2,4}

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

²Kirensky Institute of Physics FRC “KSC of SB RAS”

50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

³Federal Research Center “KSC of SB RAS”

50, Akademgorodok St., 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation

⁴Institute of Fundamental Biology and Biotechnology, Siberian Federal University

79, Svobodnyi Av., 660041, Krasnoyarsk, Russian Federation

**E-mail: shabanova.ksenia@mail.ru

Due to the absorption of solar energy in chloroplasts – green plastids, solar energy is converted into the energy of chemical bonds. Studying the processes of photosynthesis and increasing its efficiency is relevant for the development of closed life support systems, including during long flights in space. Chloroplasts are filled with stacks of highly ordered tilakoid membranes (granas). Pigment-protein photosynthetic complexes are located on the border of these membranes. For a long time, the structural characteristics of chloroplasts were not given due attention and they were studied as isotropic substances, but in recent years it has been shown that they have anisotropic properties and a high conversion coefficient during charge separation. In this work, an approach was proposed for a more accurate spatial determination of grains in plant chloroplasts and determination the single unit. Thylakoid membranes and the boundaries of the facet consisting of them are clearly visible in an electron microscope if the electron beam is directed strictly perpendicularly. It was noticed that when the stage is rotated, different regions of the membranes become either blurred or more distinct, which suggests that the granules in chloroplasts are not located in the same plane. Also, a comparison was made of the influence of different external conditions on the chloroplast structure of a plant, not only through a comparison of morphological characteristics, but also through numerical modeling and comparison of the objects spectral properties. For numerical simulation, periodic lattices were determined for the main structural units of chloroplasts of different samples. On the basis of these gratings, the transmission spectra were calculated using the transfer matrix method. Also, the obtained values of the electromagnetic wave along the lattice made it possible to calculate the graphs of the density of photon states. The results of the calculation method of plots of the density of photon states based on the structure of chloroplasts made it possible not only to assess the possible efficiency of photosynthesis, but also to directly relate these models to the external conditions affecting the plant.

Keywords: biophotonic crystal, density of photon states, electron microscopy, photosynthesis.

Введение

В процессе фотосинтеза энергия поглощения солнечного света преобразуется в энергию химических связей. Фотосинтез является единственным космическим процессом в биосфере, обеспечивающим увеличение ее свободной энергии за счет внешнего источника [1; 2]. Этот процесс обеспечивает атмосферу кислородом и всеми жизненно необходимыми продуктами.

К фотосинтезирующим организмам относятся высшие растения, водоросли, а также специфические группы бактерий. Все вышеприведенные организмы имеют свое строение, находятся в разнообразных природных условиях, но тем не менее обладают рядом общих свойств. В любом из них фотосинтетическое устройство преобразует энергию световой волны в химическую по схеме: световая → электронная → электрическая → химическая [3; 4].

Для описания этих процессов наиболее распространенной является следующая модель. Свет собирает антенны и возбуждает части молекул, электроны которых за счет переноса образуют электрический ток, а создаваемый при этом электрический потенциал обеспечивает процесс переноса протона и связанные с ними химические реакции. КПД разделения зарядов высоко ~ 95 % [5; 6], не достигнуто в искусственных преобразователях. Столь высокий КПД обусловлен, в том числе, строением хлоропластов, в которых располагаются основные элементы фотопреобразующей системы [7–9].

В настоящее время одним из самых перспективных структурных методов является электронная микроскопия [10–14]. Эти методы позволяют исследовать структуру образцов, их морфологию, оценивать размеры микрообъектов, упорядочение и ориентацию их относительно друг друга. Поэтому разработка новых подходов исследования для растровой и просвечивающей электронной микроскопии биологических объектов представляет собой значительный научный интерес.

Целью данной работы является исследование методом просвечивающей электронной микроскопии влияния структурных особенностей хлоропластов высших растений на примере полевой пшеницы и ячменя, выращенных в лабораторных и естественных условиях, на плотность фотонных состояний и эффективность преобразования солнечной энергии.

Методы. Пробоподготовка образцов

Одинаковые растения ячменя были выращены в двух разных условиях. В первом случае (лабораторном) растения росли в фитотроне, где параметры, воздействующие на образец, такие как вода, питание, интенсивность и время света, регулировались с помощью компьютера и растение оптимально обеспечивалось. Во втором случае растения росли на полях, где происходили регулярные общие поливы, а за все остальное отвечали естественные природные условия. Таким же образом выращивались растения пшеницы. На этапе колошения были собраны флаговые листья.

Структурные исследования проводили на небольших срезах листьев, фиксированных 2,5 % глутаральдегидом в фосфатно-солевом буфере с последующей дофиксацией 1 % тетроксидом осмия. После обезвоживания с помощью серии возрастающих концентраций спирта и ацетона образцы заливали эпоксидной смолой. Для исследования получали ультратонкие срезы на ультрамикротоме Leica EM UC7, контрастировали уранилацетатом и цитратом свинца [15; 16].

Цифровые изображения срезов получали в цифровом виде на просвечивающем электронном микроскопе Hitachi HT7700. Этот прибор позволяет рассматривать биологические объекты без их существенной деградации под действием электронного пучка. Образцы были рассмотрены при ускоряющем напряжении 100 кВ. Чтобы оценить положение тилакоидных мембран относительно друг друга, съемка изображений проводилась под разными углами.

Численное моделирование

За счёт разницы в показателях преломления слоёв, при прохождении света происходит его многократное переотражение на границах. Из-за этого в каждом слое существуют волны, движущиеся во встречных направлениях с амплитудами соответственно (A_i и B_i).

Метод трансфер-матриц позволяет упростить компьютерный расчёт амплитуд стационарных (устоявшихся во времени) волн в каждом из слоёв. Зная A_i и B_i , можно рассчитать A_{i-1} и B_{i-1} . Для этого необходимо знать показатели преломления (n_i и n_{i-1}), толщину слоя (Z_i) и частоту волны.

Можно написать, что

$$(A_{i-1}, B_{i-1}) = Fn(A_i, B_i, Z_i, n_{i-1}, n_i, \omega).$$

Функция Fn одинакова для каждой пар слоёв. Используя её, за $N+1$ циклов можно при заданных начальных условиях ($A_{out} = 1, B_{out} = 0$) найти (A_0, B_0), т. е. амплитуды падающей и отражённой волн.

Зная, что на выходе из структуры существует только исходящая волна ($A_{out} = 1; B_{out} = 0$), проведя численные расчеты, можно получить массив относительных значений амплитуд в каждом из слоев ФК. Это позволяет найти распределение электромагнитного поля в слоистой структуре и спектр её пропускания.

Коэффициент пропускания T [17] (обязательное условие: показатели преломления сред до и после образца – одинаковы):

$$T = 1 - \left| \frac{B_0}{A_0} \right|^2.$$

Для определения плотности фотонных состояний использовалась формула, полученная в работе [18]:

$$\rho_\omega = \frac{\frac{1}{2L_\Sigma} \int_0^{L_\Sigma} \left[\varepsilon_\omega(z) |E_\omega|^2 + \frac{c^2}{\omega^2} \left| \frac{dE_\omega}{dz} \right|^2 \right] dz}{c |E_\omega^I|^2},$$

где E_ω – амплитуда электрической составляющей электромагнитного поля, E_ω^I – амплитуда падающей волны, $\varepsilon_\omega(z)$ – диэлектрическая проницаемость от координаты, L_Σ – общая толщина структуры.

График плотности фотонных состояний представляет собой набор точек. Каждая точка соответствует максимуму квадрата амплитуды электромагнитной волны при заданной частоте.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены изображения срезов хлоропластов ячменя, выращенного в лабораторных и полевых условиях.

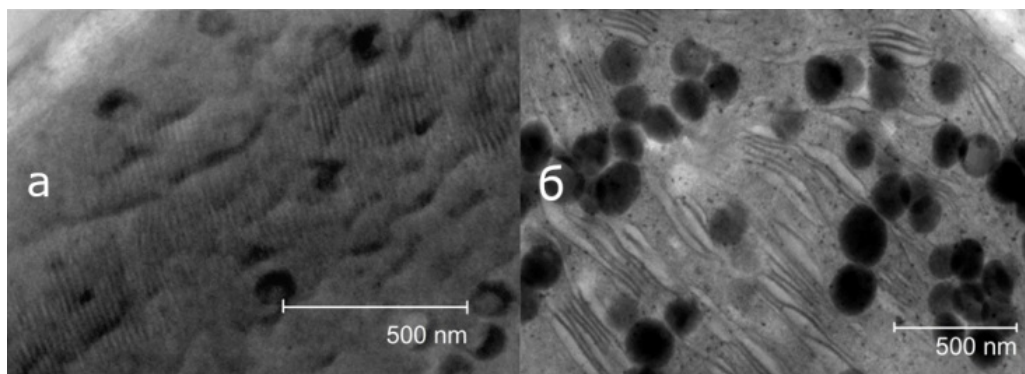


Рис. 1. Электронные микрофотографии срезов хлоропластов ячменя: *a* – выращенного в лабораторных условиях; *б* – выращенного в полевых условиях

Fig. 1. Electron micrographs of chloroplast sections barley: *a* – grown in laboratory conditions; *b* – grown in field conditions

Темные включения представляют собой зерна крахмала, размер которых варьируется от 100 до 250 нм, полосы – тилакоидные мембраны. Тилакоиды внутри хлоропластов представляют

собой ограниченные мембраной участки клетки, в которых происходят светозависимые реакции фотосинтеза.

Из снимков видно, что у растения, выращенного в лабораторных условиях, тилакоидные мембраны более упорядочены. Характер упаковки и степень ее выраженности отличаются, несмотря на то что генетически растения являются одинаковыми. Мембраны второго растения выглядят неоднородными и деформированными. Это говорит о том, что начальные условия, в которых выращивались растения, сильно влияют на внутреннюю структуру.

Также, при проведении наших исследований, было установлено, что при изменении угла наклона столика, на котором расположен образец, выраженность мембран становится различной, что говорит о том, что грани в хлоропластах находятся не в одной плоскости (рис. 2).

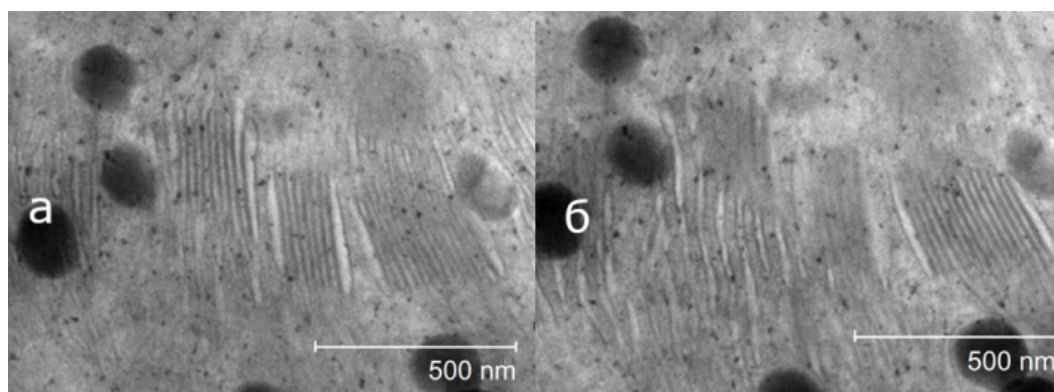


Рис. 2. Наблюдение тилакоидных мембран ячменя, выращенного в полевых условиях под разными углами

Fig. 2. Observation of the thylakoid membranes of field-grown barley from different angles

Из рис. 2 видно, что при изменении угла обзора на 15° меняется и четкость изображения мембран. Те же самые участки, что были четко выраженными (рис. 2, а), стали расплывчатыми или совсем не различимыми (рис. 2, б) после незначительного наклона столика, и наоборот.

Таким образом, расположение образца относительно пучка электронного микроскопа может влиять на видимую картину. Далее теорию проверяли на совсем другом образце. На рис. 3 изображены снимки структуры хлоропласта пшеницы Красноярская 12 под разными углами.

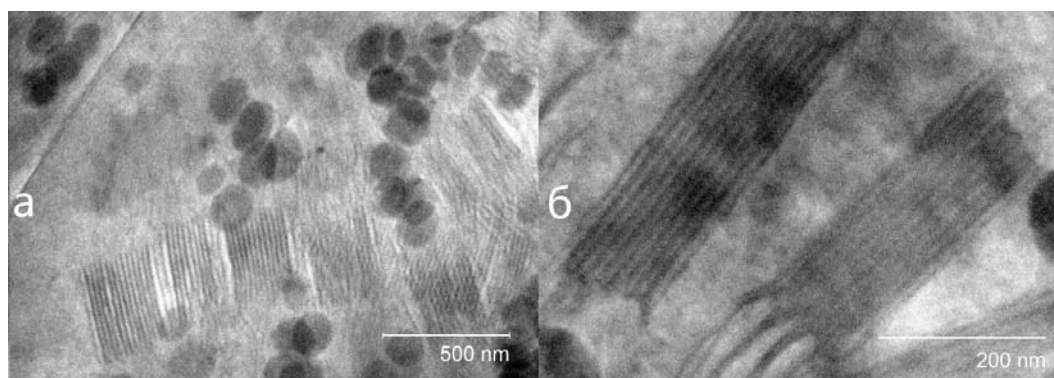


Рис. 3. Изображения тилакоидных мембран пшеницы под разными углами

Pic. 3. Images of wheat thylakoid membranes from different angles

Из рис. 3, а видно, что тилакоиды образуют длиннопериодическую структуру на протяжении всего хлоропласта и размер одной грани варьируется от 200 до 400 нм. Повернув образец,

тем самым изменив угол обзора, мы увидели, что одна большая граня представляет собой 2 граны (рис. 3, б) размерностью около 130 нм.

Таким образом, при изучении морфологических характеристик образцов, если не смотреть образец под разными углами, можно получить искаженную картину отличную от реальной. Для оценки расположения гран на протяжении всего хлоропласта необходимо посмотреть его под разными углами и выделить граны, которые изменяются в разных направлениях. Также при отклонении образцов относительно пучка на разные углы, можно увидеть «слипшиеся» граны, которые в определенных случаях могут казаться как одна на просвечивающем микроскопе. Благодаря этому методу, мы не только можем разделить их, но и оценить истинный размер единого блока.

Поскольку размеры тилакоидов (и расстояние в стопках между ними) крайне малы по отношению для проявления спектральной активности в области видимого диапазона, целесообразно считать целую стопку тилакоидов (грану) за единичный слой, усреднив их показатель преломления. И соответственно стромальное расстояние между гранями будет являться вторым слоем в структуре, состоящей из двух периодов, повторяющихся друг за другом. Таким образом, в такой структуре период может быть соизмерим с длиной волны света видимого диапазона.

По оценкам с изображений микроскопа (рис. 3, а), ширина хлоропласта в поперечном срезе составляет около 2,7 мкм. Толщина единой граны ~150 нм, а стромального расстояния между гранями ~80 нм. Показатели преломления были взяты из литературных данных: 1,48 для гран и 1,33 для стромы [19; 20]. Это позволило смоделировать кристалл, состоящий из 24 чередующихся слоев. Для случая с растениями, выращенными в естественных условиях, где на рисунке мы наблюдали искажение строгой упорядоченности тилакоидов в гранях, мы использовали случайное отклонение ширин слоев фотонного кристалла до 20 % относительно лабораторного случая. Согласно литературным данным, размеры гран могут изменяться до 30 % в зависимости от внешних условий [21]. Таким образом, установлена разница между снимками разных случаев в первом приближении, позволяющая оценить потенциальную возможность эффективного фотосинтеза в данных растениях.

Расчеты проводились с использованием метода трансфер матриц [17]. Этот метод позволяет рассчитывать спектр пропускания и отражения периодических, квазипериодических и неупорядоченных структур. На основе этого методы были получены графики пропускания и плотности фотонных состояний для обоих случаев (рис. 4).

Из рис. 4 отчетливо видно, что в случае с моделью полевых растений селективная зона отражения менее выражена и её края более размыты. Также максимумы плотности фотонных состояний, приходящиеся на края стоп-зоны, на порядок ниже, что свидетельствует о менее эффективной возможности возникновения реакции фотосинтеза. Согласно золотому правилу Ферми – плотность фотонных состояний прямо пропорциональна вероятности реакции. Исходя из этих расчетов в первом приближении, можно сказать, что второе растение будет расти на порядок хуже, чем первое, что и наблюдалось в реальных условиях.

Данная методика исследования с помощью ПЭМ представляет интерес для изучения морфологических изменений генетически одинаковых, но выращенных в разных условиях, биологических образцов. Эти методы будут полезны при исследовании процессов, проходящих в замкнутых экосистемах при случайных деструкционных воздействиях, которые характерны для условий космоса, например, в условиях отсутствия магнитного поля Земли, земного тяготения и при усиленном радиационном воздействии.

К тому же более ясное понимание процессов фотосинтеза напрямую позволит перенести полученные знания на искусственные устройства, основанные на фотовольтаике, которые жизненно необходимы для беспилотных аппаратов, находящихся на орбите.

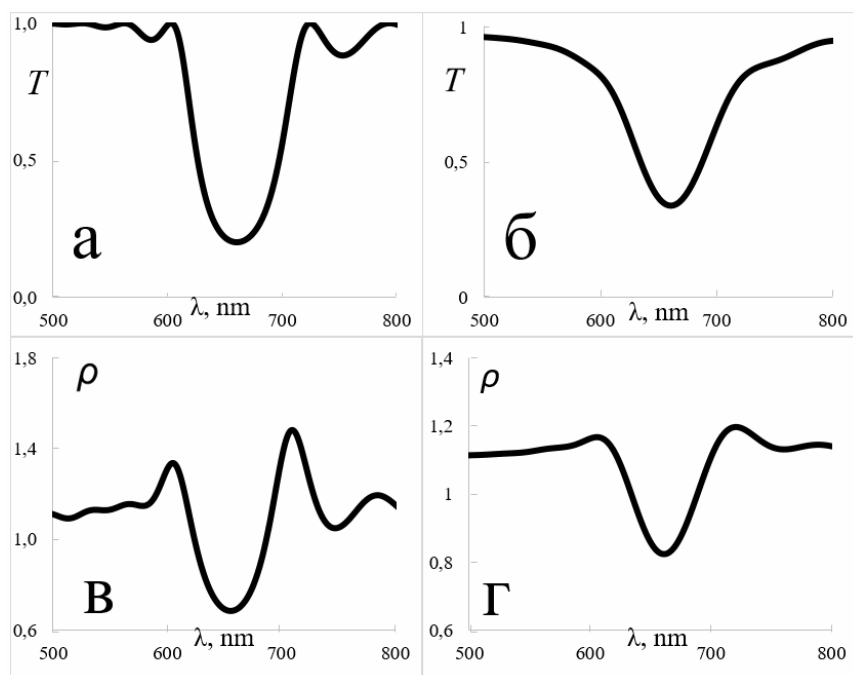


Рис. 4. Рассчитанные спектры для обеих моделей:
а – спектр пропускания для модели растения, выросшего в лабораторных условиях;
б – спектр пропускания для модели растения, выросшего в полевых условиях;
в – график плотности фотонных состояний для модели растения, выросшего в лабораторных условиях; *г* – график плотности фотонных состояний для модели растения, выросшего в полевых условиях

Fig. 4. Calculated spectra for both models:
a – transmission spectrum for a model of a plant grown in laboratory conditions;
b – transmission spectrum for a model of a plant grown in the field; *c* – a graph of the density of photon states for a model of a plant grown in laboratory conditions;
d – a graph of the density of photon states for a model of a plant grown in the field

Полученные результаты согласуются с хемиосмотической теорией Митчела [22] о механизмах преобразования энергии в биологических мембранах. Запасание энергии в АТФ происходит вследствие предварительного накопления зарядов на стенках мембраны. Разность электрохимического потенциала ионов водорода на сопрягающих мембранах (внутренних мембранах митохондрий, тилакоидов, хлоропластах) возникает за счёт поглощённых квантов света.

Заключение

1. Методом просвечивающей электронной микроскопии с высокой точностью определены размеры тилакоидов в различных хлоропластах образцов ячменя и пшеницы.

2. Обнаружено, что ансамбль гран и стромы образуют длиннопериодическую структуру с периодом сравнимым с длиной волны света (биофотоннокристаллическая структура).

4. Установлена зависимость упорядоченности тилакоидов в хлоропластах от условий внешней среды.

5. Высокая однородность размеров тилакоидов и резонансное взаимодействие брэгговских и спектральных полос поглощения фотосинтезирующих пигментов безусловно способствует высокому КПД разделения зарядов.

6. Установлено, что увеличение упорядоченности хлоропластов способствует росту плотности фотонных состояний и повышению эффективности фотосинтеза.

Библиографические ссылки

1. Jacquemoud S., Ustin S. Leaf Optical Properties. Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2019.
2. Rabinowitch E. Photosynthesis and Related Processes. Interscience Publishers: New York, NY, USA, 1945.
3. Blankenship R. E. Molecular Mechanisms of Photosynthesis. Wiley-Blackwell: New York, NY, US, 2014. 312p.
4. Буханов Е., Коршунов М., Шабанов А. Оптические процессы в фотосинтезе // Сибирский лесной журнал. 2018. № 5. С. 19–32.
5. Light absorption and energy transfer in the antenna complexes of photosynthetic organisms / T. Mirkovic, E. E. Ostroumov, J. M. Anna et al. // Chemical Reviews, 2017. Vol. 117, Is. 2. P. 249–293.
6. Тихонов А. Н. Трансформация энергии в хлоропластах – энергопреобразующих оргanelлах растительной клетки // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 4. С. 24–32.
7. Garab G. Self-assembly and structural-functional flexibility of oxygenic photosynthetic machineries: personal perspectives // Photosynth Res. 2016. Vol. 127(1). P. 131–50.
8. Rantala M., Rantala S., Aro E. Composition, phosphorylation and dynamic organization of photosynthetic protein complexes in plant thylakoid membrane. Photochem. Photobiol. Sci., 2020. P. 604-619.
9. The ultrastructure and flexibility of thylakoid membranes in leaves and isolated chloroplasts as revealed by small-angle neutron scattering. R. Ünneper, O. Zsiros, K. Solymosi et al. // Biochimia et Biophysica Acta (BBA) – Bioenergetics. 2014. Vol. 1837, Is. 9. P. 1572–1580.
10. Photonic multilayer structure of Begonia chloroplasts enhances photosynthetic efficiency / M. Jacobs, M. Lopez-Garcia, O. P. Phrathep et al. Nat. Plants, 2016.
11. Characterization of chloroplast iridescence in Selaginella erythropus / N. J. Masters, M. Lopez-Garcia, R. Oulton et al. Int., 2018.
12. Bukhanov E. R., Gurevich Y. L., Shabanova K. A. A Study of Wheat Wax Optical Properties // In Proceedings of the 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium-Fall (PIERS-Fall), Xiamen, China, 20 August 2019. P. 2890–2897.
13. The Role of Periodic Structures in Light Harvesting / E. R. Bukhanov, A. V. Shabanov, M. N. Volochaev, S. A. Pyatina. Plants, 2021.
14. Light-induced dynamic structural color by intracellular 3D photonic crystals in brown algae / M. Lopez-Garcia, N. Masters, H. E. O'Brien et al. Sci. Adv., 2018.
15. Karnovsky M. J. Simple methods for «staining with lead» at high pH in electron microscopy // J. Biophys. Biochem. Cyt., 1961. P. 729–732.
16. Semenova G. A., Romanova A. K. Crystals in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) leaves. Cell and Tissue Biology, 2011. P. 74–80.
17. Шабанов В. Ф., Ветров С. Я., Шабанов А. В. Оптика реальных фотонных кристаллов. Жидкокристаллические дефекты, неоднородности. Новосибирск : Издательство СО РАН, 2005. 209 с.
18. Density of modes and tunneling times in finite one-dimensional photonic crystals: A comprehensive analysis / G. D'Aguanno, N. Mattiucci, M. Scalora et al. Phys. Rev., 2004.
19. Bossard J. A., Lin L., Werner D. H. Evolving random fractal Cantor superlattices for the infrared using a genetic algorithm. J. R. Soc. Interface, 2016.
20. Nanophotonics of higher-plant photosynthetic membranes / A. Capretti, A. K. Ringsmuth, J. F. van Velzen et al. Light Sci. Appl., 2019.
21. Granal stacking of thylakoid membranes in higher plant chloroplasts: The physicochemical forces at work and the functional consequences that ensue / W. S. Chow, E. Kim, P. Horton, J. M. Anderson. Photochem. Photobiol. Sci., 2005. P. 1081–1090.
22. Холл Д., Рао К. Фотосинтез : пер. с англ. М. : Мир, 1983. 132 с.

References

1. Jacquemoud S., Ustin S. Leaf Optical Properties. Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2019.
2. Rabinowitch E. Photosynthesis and Related Processes. Interscience Publishers: New York, NY, USA, 1945.
3. Blankenship R. E. Molecular Mechanisms of Photosynthesis. Wiley-Blackwell: New York, NY, US, 2014. 312p.
4. Bukhanov E., Korshunov M., Shabanov A. [Optical processes in photosynthesis]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal*. 2018, No. 5, C. 19–32. (In Russ.)
5. Mirkovic T., Ostroumov E. E., Anna J. M. et al. Light absorption and energy transfer in the antenna complexes of photosynthetic organisms. *Chemical Reviews*. 2017, Vol. 117, Is. 2, P. 249–293.
6. Tikhonov A. N. [Energy transformation in chloroplasts – energy-transforming organelles of a plant cell]. *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal*. 1996, No. 4, P. 24–32. (In Russ)
7. Garab G. Self-assembly and structural-functional flexibility of oxygenic photosynthetic machineries: personal perspectives. *Photosynth Res*. 2016, Vol. 127(1), P. 131–50.
8. Rantala M., Rantala S., Aro E. Composition, phosphorylation and dynamic organization of photosynthetic protein complexes in plant thylakoid membrane. *Photochem. Photobiol. Sci.*, 2020. P. 604–619.
9. Ünneper R., Zsiros O., Solymosi K. et al. The ultrastructure and flexibility of thylakoid membranes in leaves and isolated chloroplasts as revealed by small-angle neutron scattering. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Bioenergetics*. 2014, Vol. 1837, Is. 9, P. 1572–1580.
10. Jacobs M., Lopez-Garcia M., Phrathep O. P. et al. Photonic multilayer structure of Begonia chloroplasts enhances photosynthetic efficiency. *Whitney. Nat. Plants*, 2016.
11. Masters N. J., M. Lopez-Garcia, Oulton R., Whitney H. M. Characterization of chloroplast iridescence in Selaginella erythropus. *J. R. Soc. Int.*, 2018.
12. Bukhanov E. R., Gurevich Y. L., Shabanova K. A. A Study of Wheat Wax Optical Properties. *In Proceedings of the 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium-Fall (PIERS-Fall)*, Xiamen, China, 20 August 2019, P. 2890–2897.
13. Bukhanov E. R., Shabanov A. V., Volochaev M. N., Pyatina S. A. The Role of Periodic Structures in Light Harvesting. *Plants*, 2021.
14. Lopez-Garcia M., Masters N., O'Brien H. E. et al. Light-induced dynamic structural color by intracellular 3D photonic crystals in brown algae. *Sci. Adv.*, 2018.
15. Karnovsky M. J. Simple methods for “staining with lead” at high pH in electron microscopy. *Biophys. Biochem. Cyt.*, 1961, P. 729–732.
16. Semenova G. A., Romanova A. K. Crystals in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) leaves. *Cell and Tissue Biology*, 2011. P. 74–80.
17. Shabanov V. F., Vetrov S. Y., Shabanov A. V. *Optika real'nykh fotonnykh kristallov. Zhidkokristallicheskiye defekty, neodnorodnosti* [Optics of real photonic crystals. Liquid crystal defects, inhomogeneities]. Novosibirsk, Izdatel'stvo SO RAN, 2005, 209 p.
18. D'Aguanno G., Mattiucci N., Scalora M., Bloemer M. J., Zheltikov A. M. Density of modes and tunneling times in finite one-dimensional photonic crystals: A comprehensive analysis. *Phys. Rev.*, 2004.
19. Bossard J. A., Lin L., Werner D. H. Evolving random fractal Cantor superlattices for the infrared using a genetic algorithm. *J. R. Soc. Interface*, 2016.
20. Capretti A., Ringsmuth A. K., van Velzen J. F. et al. Nanophotonics of higher-plant photosynthetic membranes. *Light Sci. Appl.*, 2019.

21. Chow W. S., Kim E., Horton P., Anderson J. M. Granal stacking of thylakoid membranes in higher plant chloroplasts: The physicochemical forces at work and the functional consequences that ensue. *Photochem. Photobiol. Sci.*, 2005, P. 1081–1090.

22. Hall D. O., Rao K. K. *Fotosintez* [Photosynthesis]. Moscow, Mir Publ., 1983, P. 132.

© Шабанова К. А., Логинов Ю. Ю., Буханов Е. Р.,
Волочаев М. Н., Пятина С. А., 2021

Шабанова Ксения Александровна – студент 1 курса магистратуры, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: shabanova.ksenia@mail.ru.

Логинов Юрий Юрьевич – доктор физико-математических наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: loginov@sibsau.ru.

Буханов Евгений Романович – младший научный сотрудник, лаборатория фотоники молекулярных систем, Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН; Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН». E-mail: k26Tony@ya.ru.

Волочаев Михаил Николаевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории молекулярной спектроскопии, Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН; Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН». E-mail: volochaev@iph.krasn.ru.

Пятина Светлана Алексеевна – инженер; Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН». E-mail: davcbetik@mail.ru.

Shabanova Ksenia Alexandrovna – 1st year student of magistracy; Siberian State University of Science and Technology. E-mail: shabanova.ksenia@mail.ru.

Loginov Yuri Yurievich – Dr. Sc., Professor, Vice-Rector for Research; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: loginov@sibsau.ru.

Bukhanov Eugene – Junior Researcher, Photonics of Molecular Systems Laboratory, Kirensky Institute of Physics FRC “KSC of SB RAS”. E-mail: k26Tony@ya.ru.

Volochayev Mikhail Nikolayevich – Ph. D., Physics (Mathematics), Researcher, Laboratory of Molecular Spectroscopy, Kirensky Institute of Physics FRC “KSC of SB RAS”. E-mail: volochaev@iph.krasn.ru.

Pyatina Svetlana Alekseevna – engineer; FRC “KSC of SB RAS”. E-mail: davcbetik@mail.ru.
