ISSN 2712-8970



СИБИРСКИЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

SIBERIAN AEROSPACE JOURNAL

Том Vol. 23, № 2

КРАСНОЯРСК 2022

СИБИРСКИЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Tom 23, № 2

Красноярск 2022

СИБИРСКИЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том 23, № 2

Главный редактор

(MBM CO PAH)

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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 $(Mp\Gamma Y \Pi C)$ Максимов И. А., доктор технических наук (AO «NCC») 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., член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор (MBM CO PAH) 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., член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Васильев С. Н., академик РАН, доктор физикоматематических наук, профессор (Москва) Дегерменджи А. Г., академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор (Красноярск) Дегтерев А. С., доктор технических наук, профессор (Красноярск) Колмыков В. А., кандидат технических наук, профессор (Химки) Миронов В. Л., член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор (Красноярск) Романски Р. П., доктор наук, профессор (Технический университет Софии, Болгария) Семенкин Е. С., доктор технических наук, профессор (Красноярск) Тестоедов Н. А., академик РАН, доктор технических наук, профессор (Железногорск) Фошнер М., доктор, доцент (Марибор, Словения) Шабанов В. Ф., академик РАН, доктор физикоматематических наук, профессор (Красноярск) Швенкер Ф., доктор наук, профессор (Институт нейроинформатики Университета Ульма, Германия)

SIBERIAN AEROSPACE JOURNAL

Vol. 23, No 2

Chief Editor: Aplesnin S. S., Dr.Sc., Professor (Reshetnev University)

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

EDITORIAL BOARD

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., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, 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., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, 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) Kolmykov V. A., Cand.Sc., Professor (Khimki) Mironov V. L., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk) Romansky R. P., Dr.Sc., Professor (Technical University of Sofia, Bulgaria) Semenkin E. S., Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk) Testoedov N. A., Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Zheleznogorsk) Fošner M., Ph.D. Associate Professor (Maribor, Slovenia) Shabanov V. F., Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk) Schwenker F., Dr.Sc., Professor (Institute for Neuroinformatics, University of Ulm, Germany)

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:

2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки);

2.3.5 Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (физико-математические науки);

2.5.13 Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов (технические науки);

2.5.15 Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов (технические науки);

05.07.07 Контроль и испытание летательных аппаратов и их систем (технические 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:

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. Е-mail: vestnik@sibsau.ru

Редактор Н. Н. Голоскокова
Ответственный редактор английского текста Н. А. Шумакова
Оригинал-макет и верстка Л. В. Звонаревой
Подписано в печать 24.06.2022. Формат 70×108/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Усл. печ. л. 25,1.
Уч.-изд. л. 24,3. Тираж 100 экз. Заказ 3217. С 457/22.
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: 11.07.2022. 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:

2.3.1 System Analysis, Management and Information Processing (Engineering Sciences);

2.3.5 Mathematical Support and Software for Computers, Computer Systems and Computer Networks (Physical and Mathematical Sciences);

2.5.13 Engineering, Design and Manufacturing of Aircraft (Engineering Sciences);

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

05.07.07 Control and Testing of Aircraft and its Systems (Engineering 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 been 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 Rabochy prospekt., Krasnoyarsk,

660037, Russian Federation.

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

Editor N. N. GOLOSKOKOVA Executive editor (English Language) N. A. SHUMAKOVA Layout original L. V. ZVONAREVA Signed (for printing): 24.06.2022. Format 70×108/16. Offset Paper. Print flat. 25,1. Published sheets 24,3. 100 copies. Order 3217. C 457/22. Printing and Publication Department Reshetnev University. Printed in the Department of copying and duplicating equipment Reshetnev University.

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

Date of publication: 11.07.2022. Free price

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел 1. ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Донцов Д. Ю., Исаев С. В. Применение методов тематического моделирования	
для идентификации групп интернет-ресурсов с целью снижения риска киберугроз	148
Дремухин М. А., Кузовников А. В., Стрекалева Т. В. Разработка перенастраиваемых	
диапазонных генераторов шума	156
Крутько Д. А., Калашников А. С., Буряченко В. В. Методы построения маршрутов	
вне населенных пунктов на основе GPS-данных	168
Луферчик П. В., Конев А. Н., Богатырев Е. В., Галеев Р. Г. Моделирование	
алгоритмов уменьшения пик-фактора OFDM сигналов и реализация наилучшего	
метода для канала с замираниями	177
Луферчик П. В., Конев А. Н., Богатырев Е. В., Галеев Р. Г. Методы	
повышения энергетической эффективности OFDM модемов в каналах связи	
с частотно-селективными замираниями	189
Максютин А. С., Казайкин Д. С., Дымов Д. В., Ивленков Д. В. Разработка	
методики тестирования сетевых коммутаторов SpaceWire	197
Подкопаев А. В., Бабаджанов А. Б., Подкопаев И. А., Должиков В. И.	
Идентификационно-имитационная математическая модель теплофизического	
нагружения малокалиберного артиллерийского ствола	209
Рурич М. А., Вахнин А. В., Сопов Е. А. Сравнение эффективности различных	
подходов к формированию популяции при решении задач многокритериальной	
нестационарной оптимизации	227

Раздел 2. АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Арнгольд А. А., Зуев А. А., Толстопятов М. И., Дубынин П. А. Динамика потока	
на участках элементов тракта подачи турбонасосного агрегата жидкостных	
ракетных двигателей	
Карцан И. Н., Жуков А. О. Малые космические аппараты для зондирования	
морской поверхности	
Кузнецов В. И., Макаров В. В., Щука И. О. Метод расчета оптимальной	
геометрии вихревого эжектора	273
Мордовский С. А., Максимов И. А., В Иванов. В., Ситникова Н. Н.,	
Трофимчук Д. А. Измерение давления внутри негерметичного приборного отсека	
геостационарного космического аппарата	

Раздел 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

Курашкин С. О., Серегин Ю. Н., Тынченко В. С., Мурыгин А. В.,	
Котельникова С. В. Моделирование режима электронно-лучевой сварки	
тонкостенной конструкции из сплава АД31	296
Михеев А. Е., Савельев Д. О., Раводина Д. В., Гирн А. В. Нанесение	
оптически черного светопоглощающего покрытия на сплавы алюминия и титана	305
Паклин Н. Н., Логинов Ю. Ю., Мозжерин А. В. Равновесное распределение	
дефектов в теллуриде кадмия до воздействия внешних факторов	315
Пась О. В., Серков Н. А. Исследование возможностей повышения точности	
механической обработки вафельного фона методами программной коррекции	321
Шестаков И. Я., Шестаков В. И., Ремизов И. А. Коэффициент эрозии	
при электро-контактной обработке металлов	337
Якивьюк П. Н., Пискажова Т. В., Сальников А. В., Гофман П. М. Цифровой	
двойник для управления совмещенной литейно-прокатной линией	347

CONTENTS

Part 1. INFORMATICS, COMPUTER TECHNOLOGY AND MANAGEMENT

of internet resources in order to reduce the risk of cyber threats 148 Dremukhin M. A., Kuzovnikov A. V., Strekaleva T. V. Development of tunable 156 band noise generators 156 Krutko D. A., Kalashnikov A. S., Buryachenko V. V. Methods for constructing 168 Luferchik P. V., Konev A. N., Bogatyrev E. V., Galeev R. G. Simulation of algorithms 168 for reducing the peak factor of OFDM signals and implementation of the best method 177 Luferchik P. V., Konev A. N., Bogatyrev E. V., Galeev R. G. Methods 177 for fading channgel 177 Luferchik P. V., Konev A. N., Bogatyrev E. V., Galeev R. G. Methods 189 for improving the energy characteristics of OFDM modems in frequency selective fading 189 Maksyutin A. S., Kazaykin D. S., Dymov D. V., Ivlenkov D. V. Development 197 Podkopaev A. V., Babadzhanov A. B., Podkopaev I. A., Dolzhikov V. I. 10 Identification and simulation mathematical model of thermo and physical loading 209 Rurich M. A., Vakhnin A. V., Sopov E. A. The comparison of efficiency of the 209 Population formation approaches in the dynamic multi-objective optimization problems 227	Dontsov D. Y., Isaev S. V. Application of topic modeling methods to identify groups	
Dremukhin M. A., Kuzovnikov A. V., Strekaleva T. V. Development of tunable band noise generators 156 Krutko D. A., Kalashnikov A. S., Buryachenko V. V. Methods for constructing 156 routes outside of settlements on the basis of GPS data 168 Luferchik P. V., Konev A. N., Bogatyrev E. V., Galeev R. G. Simulation of algorithms 167 for reducing the peak factor of OFDM signals and implementation of the best method 177 Luferchik P. V., Konev A. N., Bogatyrev E. V., Galeev R. G. Methods 189 for improving the energy characteristics of OFDM modems in frequency selective fading 189 Maksyutin A. S., Kazaykin D. S., Dymov D. V., Ivlenkov D. V. Development 197 Podkopaev A. V., Babadzhanov A. B., Podkopaev I. A., Dolzhikov V. I. 197 Identification and simulation mathematical model of thermo and physical loading 209 Rurich M. A., Vakhnin A. V., Sopov E. A. The comparison of efficiency of the 209 Population formation approaches in the dynamic multi-objective optimization problems 227	of internet resources in order to reduce the risk of cyber threats	148
band noise generators 156 Krutko D. A., Kalashnikov A. S., Buryachenko V. V. Methods for constructing 168 routes outside of settlements on the basis of GPS data 168 Luferchik P. V., Konev A. N., Bogatyrev E. V., Galeev R. G. Simulation of algorithms 167 for reducing the peak factor of OFDM signals and implementation of the best method 177 Luferchik P. V., Konev A. N., Bogatyrev E. V., Galeev R. G. Methods 177 for improving the energy characteristics of OFDM modems in frequency selective fading 189 Maksyutin A. S., Kazaykin D. S., Dymov D. V., Ivlenkov D. V. Development 197 of a methodology for testing SpaceWire network switches 197 Podkopaev A. V., Babadzhanov A. B., Podkopaev I. A., Dolzhikov V. I. 1209 Rurich M. A., Vakhnin A. V., Sopov E. A. The comparison of efficiency of the 209 population formation approaches in the dynamic multi-objective optimization problems 227	Dremukhin M. A., Kuzovnikov A. V., Strekaleva T. V. Development of tunable	
Krutko D. A., Kalashnikov A. S., Buryachenko V. V. Methods for constructing routes outside of settlements on the basis of GPS data 168 Luferchik P. V., Konev A. N., Bogatyrev E. V., Galeev R. G. Simulation of algorithms 168 for reducing the peak factor of OFDM signals and implementation of the best method 177 for fading channgel 177 Luferchik P. V., Konev A. N., Bogatyrev E. V., Galeev R. G. Methods 189 for improving the energy characteristics of OFDM modems in frequency selective fading 189 Maksyutin A. S., Kazaykin D. S., Dymov D. V., Ivlenkov D. V. Development 197 of a methodology for testing SpaceWire network switches 197 Podkopaev A. V., Babadzhanov A. B., Podkopaev I. A., Dolzhikov V. I. 197 Identification and simulation mathematical model of thermo and physical loading 209 Rurich M. A., Vakhnin A. V., Sopov E. A. The comparison of efficiency of the 209 Rurich M. A., Vakhnin A. V., Sopov E. A. The comparison of efficiency of the 209	band noise generators	156
routes outside of settlements on the basis of GPS data 168 Luferchik P. V., Konev A. N., Bogatyrev E. V., Galeev R. G. Simulation of algorithms 168 for reducing the peak factor of OFDM signals and implementation of the best method 177 Luferchik P. V., Konev A. N., Bogatyrev E. V., Galeev R. G. Methods 177 for improving the energy characteristics of OFDM modems in frequency selective fading 189 Maksyutin A. S., Kazaykin D. S., Dymov D. V., Ivlenkov D. V. Development 197 of a methodology for testing SpaceWire network switches 197 Podkopaev A. V., Babadzhanov A. B., Podkopaev I. A., Dolzhikov V. I. 104 Identification and simulation mathematical model of thermo and physical loading 209 Rurich M. A., Vakhnin A. V., Sopov E. A. The comparison of efficiency of the 209 population formation approaches in the dynamic multi-objective optimization problems 227	Krutko D. A., Kalashnikov A. S., Buryachenko V. V. Methods for constructing	
Luferchik P. V., Konev A. N., Bogatyrev E. V., Galeev R. G. Simulation of algorithms for reducing the peak factor of OFDM signals and implementation of the best method for fading channgel 177 Luferchik P. V., Konev A. N., Bogatyrev E. V., Galeev R. G. Methods 177 for improving the energy characteristics of OFDM modems in frequency selective fading 189 Maksyutin A. S., Kazaykin D. S., Dymov D. V., Ivlenkov D. V. Development 197 of a methodology for testing SpaceWire network switches 197 Podkopaev A. V., Babadzhanov A. B., Podkopaev I. A., Dolzhikov V. I. 129 Identification and simulation mathematical model of thermo and physical loading 209 Rurich M. A., Vakhnin A. V., Sopov E. A. The comparison of efficiency of the 209 population formation approaches in the dynamic multi-objective optimization problems 227	routes outside of settlements on the basis of GPS data	168
for reducing the peak factor of OFDM signals and implementation of the best method for fading channgel	Luferchik P. V., Konev A. N., Bogatyrev E. V., Galeev R. G. Simulation of algorithms	
for fading channgel 177 Luferchik P. V., Konev A. N., Bogatyrev E. V., Galeev R. G. Methods 177 for improving the energy characteristics of OFDM modems in frequency selective fading 189 Maksyutin A. S., Kazaykin D. S., Dymov D. V., Ivlenkov D. V. Development 189 of a methodology for testing SpaceWire network switches 197 Podkopaev A. V., Babadzhanov A. B., Podkopaev I. A., Dolzhikov V. I. 197 Identification and simulation mathematical model of thermo and physical loading 209 Rurich M. A., Vakhnin A. V., Sopov E. A. The comparison of efficiency of the 209 population formation approaches in the dynamic multi-objective optimization problems 227	for reducing the peak factor of OFDM signals and implementation of the best method	
Luferchik P. V., Konev A. N., Bogatyrev E. V., Galeev R. G. Methods for improving the energy characteristics of OFDM modems in frequency selective fading communication channels 189 Maksyutin A. S., Kazaykin D. S., Dymov D. V., Ivlenkov D. V. Development 189 of a methodology for testing SpaceWire network switches 197 Podkopaev A. V., Babadzhanov A. B., Podkopaev I. A., Dolzhikov V. I. 197 Identification and simulation mathematical model of thermo and physical loading 209 Rurich M. A., Vakhnin A. V., Sopov E. A. The comparison of efficiency of the 209 population formation approaches in the dynamic multi-objective optimization problems 227	for fading channgel	177
for improving the energy characteristics of OFDM modems in frequency selective fading communication channels	Luferchik P. V., Konev A. N., Bogatyrev E. V., Galeev R. G. Methods	
communication channels 189 Maksyutin A. S., Kazaykin D. S., Dymov D. V., Ivlenkov D. V. Development 197 of a methodology for testing SpaceWire network switches 197 Podkopaev A. V., Babadzhanov A. B., Podkopaev I. A., Dolzhikov V. I. 197 Identification and simulation mathematical model of thermo and physical loading 209 Rurich M. A., Vakhnin A. V., Sopov E. A. The comparison of efficiency of the 209 population formation approaches in the dynamic multi-objective optimization problems 227	for improving the energy characteristics of OFDM modems in frequency selective fading	
Maksyutin A. S., Kazaykin D. S., Dymov D. V., Ivlenkov D. V. Development of a methodology for testing SpaceWire network switches 197 Podkopaev A. V., Babadzhanov A. B., Podkopaev I. A., Dolzhikov V. I. Identification and simulation mathematical model of thermo and physical loading of a small-caliber artillery barrel 209 Rurich M. A., Vakhnin A. V., Sopov E. A. The comparison of efficiency of the population formation approaches in the dynamic multi-objective optimization problems	communication channels	189
of a methodology for testing SpaceWire network switches 197 Podkopaev A. V., Babadzhanov A. B., Podkopaev I. A., Dolzhikov V. I. 197 Identification and simulation mathematical model of thermo and physical loading 209 Rurich M. A., Vakhnin A. V., Sopov E. A. The comparison of efficiency of the 209 population formation approaches in the dynamic multi-objective optimization problems 227	Maksyutin A. S., Kazaykin D. S., Dymov D. V., Ivlenkov D. V. Development	
Podkopaev A. V., Babadzhanov A. B., Podkopaev I. A., Dolzhikov V. I. Identification and simulation mathematical model of thermo and physical loading of a small-caliber artillery barrel 209 Rurich M. A., Vakhnin A. V., Sopov E. A. The comparison of efficiency of the population formation approaches in the dynamic multi-objective optimization problems 227	of a methodology for testing SpaceWire network switches	197
Identification and simulation mathematical model of thermo and physical loading 209 Rurich M. A., Vakhnin A. V., Sopov E. A. The comparison of efficiency of the 209 population formation approaches in the dynamic multi-objective optimization problems 227	Podkopaev A. V., Babadzhanov A. B., Podkopaev I. A., Dolzhikov V. I.	
of a small-caliber artillery barrel 209 Rurich M. A., Vakhnin A. V., Sopov E. A. The comparison of efficiency of the 209 population formation approaches in the dynamic multi-objective optimization problems 227	Identification and simulation mathematical model of thermo and physical loading	
Rurich M. A., Vakhnin A. V., Sopov E. A. The comparison of efficiency of the population formation approaches in the dynamic multi-objective optimization problems	of a small-caliber artillery barrel	209
population formation approaches in the dynamic multi-objective optimization problems	Rurich M. A., Vakhnin A. V., Sopov E. A. The comparison of efficiency of the	
	population formation approaches in the dynamic multi-objective optimization problems	227

Part 2. AVIATION AND SPACECRAFT ENGINEERING

Arngold A. A., Zuev A. A., Tolstopyatov M. I., Dubynin P. A. Dynamics of the flow	
in the sections of the elements of the supply path of the turbopump unit of the LRE	242
Kartsan I. N., Zhukov A. O. Small satellites for sea surface sounding	262
Kuznetsov V. I., Makarov V. V., Shchuka I. O. Method for calculating the optimal	
geometry of a vortex ejector	273
Mordovskiy S. A., Maksimov I. A., Ivanov V. V., Sitnikova N. N., Trofimchuk D. A.	
Pressure measurement inside non-sealed equipment bay of the geostationary spacecraft	284

Part 3. TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIAL SCIENCE

296
305
315
321
337
347



INFORMATICS, COMPUTER TECHNOLOGY AND MANAGEMENT

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ





УДК 004.738 Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-148-155

Для цитирования: Донцов Д. Ю., Исаев С. В. Применение методов тематического моделирования для идентификации групп интернет-ресурсов с целью снижения риска киберугроз // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 2. С. 148–155. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-148-155.

For citation: Dontsov D. Y., Isaev S. V. [Application of topic modeling methods to identify groups of internet resources in order to reduce the risk of cyber threats]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 2, P. 148–155. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-148-155.

Применение методов тематического моделирования для идентификации групп интернет-ресурсов с целью снижения риска киберугроз

Д. Ю. Донцов^{*}, С. В. Исаев

Институт вычислительного моделирования СО РАН Российская Федерация, 660036, Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44 *E-mail: denis.dontsov96@gmail.com

Безопасность внутренней сети является важным аспектом успешного предприятия. Существуют различные средства для предотвращения киберугроз и анализа посещаемых интернетресурсов, но их быстродействие и возможность применения сильно зависит от объема входных данных. В статье рассматриваются существующие методы определения сетевых угроз с помощью анализа журналов прокси-сервера и предлагается метод кластеризации интернет-ресурсов, направленный на снижение объема входных данных путем исключения групп безопасных интернетресурсов или выбором только подозрительных интернет-ресурсов. Предложенный метод состоит из 3-х этапов: предобработка данных, анализ данных и интерпретация полученных результатов. Исходными данными для него являются записи журнала прокси-сервера. На первом этапе из исходных данных выбираются полезные для анализа данные, после чего непрерывный поток данных делится на небольшие сессии при помощи метода ядерной оценки плотности. На втором этапе выполняется мягкая кластеризация посещенных интернет-ресурсов путем применения метода тематического моделирования. Результатом второго этапа являются неразмеченные группы интернет-ресурсов. На третьем этапе, с помощью эксперта, происходит интерпретация полученных результатов путем анализа наиболее популярных интернет-ресурсов в каждой группе. Метод имеет множество настроек на каждом этапе, что позволяет сконфигурировать его под любой формат и специфику входных данных. Его область применения никак не ограничивается. Полученный метод может быть использован в качестве дополнительного шага предобработки с целью снижения количества входных данных.

Ключевые слова: тематическое моделирование, кибербезопасность, анализ данных.

Application of topic modeling methods to identify groups of internet resources in order to reduce the risk of cyber threats

D. Y. Dontsov^{*}, S. V. Isaev

Institute of Computational Modeling SB RAS 50, b. 44, Academgorodok St., Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation *E-mail: denis.dontsov96@gmail.com Internal network security is an important aspect of a successful enterprise. There are various means to prevent cyber threats and analyze visited Internet resources, but their speed and the possibility of application strongly depends on the volume of input data. This article discusses the existing methods for determining network threats by analyzing proxy server logs, and proposes a method for clustering Internet resources aimed at reducing the volume of input data by excluding groups of secure Internet resources or selecting only suspicious Internet resources. The proposed method consists of 3 stages: data preprocessing, data analysis and interpretation of the results obtained. The initial data for the method are the proxy server log entries. At the first stage, data useful for analysis is selected from the source data, after which the continuous data stream is divided into small sessions using the nuclear density estimation method. At the second stage, soft clustering of visited Internet resources is performed by applying the thematic modeling method. The result of the second stage are unmarked groups of Internet resources. At the third stage, with the help of an expert, the results are interpreted by analyzing the most popular Internet resources in each group. The method has many settings at each stage, which allows you to configure it for any format and specifics of the input data. The scope of the method is not limited in any way. The resulting method can be used as an additional preprocessing step in order to reduce the amount of input data.

Keywords: topic-modeling, cyber security, data analysis.

Введение

С каждым днем информационные технологии все глубже внедряются в жизни людей, в связи с чем вопросы обеспечения кибербезопасности становится все более важным.

Существует три класса источников киберугроз – человеческий, технологический и форсмажорный [1]. Человек является причиной большинства киберугроз [2], в связи с чем разработка решений, позволяющих снизить число вторжений по вине человека, является перспективным направлением.

Для предотвращения посещения вредоносных ресурсов, на больших предприятиях используется технология фильтрации интернет-трафика [3]. Данное решение значительно снижает риск кибератак, но не дает 100 % защиты, поэтому необходимо использовать дополнительные средства защиты внутренней сети.

Безопасность внутренней сети включает в себя захват, сохранение и анализ данных использования сети. Результаты анализа позволяют выявлять изменения в шаблонах поведения пользователей, тем самым предоставляя возможность своевременно реагировать и предотвращать сетевые угрозы [4–6]. Процесс анализа данных, генерируемых пользователями внутренней сети, занимает некоторое время, и снижение затрачиваемого времени на анализ данных напрямую влияет на безопасность сети.

Пользователи сети ежедневно генерируют сотни тысяч запросов к различным интернетресурсам, в связи с чем, снижение объема анализируемых данных является одним из наиболее значимых подходов к снижению времени анализа.

Распределение посещаемых ресурсов на группы и выявление групп безопасных и потенциально опасных ресурсов может снизить объем анализируемых данных и дать значительный прирост к скорости обнаружения аномалий в поведении пользователей

В данной статье предложен подход разделения посещаемых интернет-ресурсов на группы со схожей тематикой при помощи анализа журналов доступа прокси-сервера. Основная цель предложенного метода в разделении ресурсов на группы с целью снижения объема анализируемых данных через исключение «безопасных» групп ресурсов.

Входные данные

Входными данными являются файлы журнала прокси-сервера, который является посредником между пользователем и интернет-ресурсами. Журнал (лог-файл) содержит информацию по всем запросам пользователей, совершенных в течение суток.

Каждая строка лог-файла содержит следующую информацию:

- время совершения запроса;

- адрес посещенного интернет-ресурса;

- уникальный идентификатор пользователя, совершившего запрос;

- тип запроса (get, post, put, delete и т. д.);

- тип запрашиваемого контента (image, html, css, js, ...);
- объем переданных данных.

Для дальнейшего анализа нужны только некоторые из этих полей, такие как:

- время посещения момент времени, в который пользователь отправил запрос;
- адрес посещаемого ресурса;

 идентификатор пользователя – уникальный идентификатор-пользователя, используемый для выделения ресурсов, посещенных одним пользователем.

Предложенный подход

В работе используется подход выделения и установления связей между посещаемыми интернет-ресурсами через анализ их совместной встречаемости в пределах некоторых сессий (рис. 1).



Рис. 1. Схема разбиения лог-файла на сессии:

А – исходный временной ряд; В – первый вариант разбиения; С – второй вариант разбиения

Fig. 1. The scheme of splitting the log file into sessions:

A - is the original time series; B - is the first variant of the partition; C - is the second variant of the partition

Под сессией подразумевается совокупность интернет-ресурсов, посещенных за некоторый промежуток времени. В самом простом случае, сессией можно считать одни сутки, однако для повышения качества работы метода необходимо рассмотреть другие варианты выделения сессий.

Для анализа совместной встречаемости ресурсов в пределах одной сессии используется вероятностное тематическое моделирование [7]. Тематическое моделирование выполняет мягкую кластеризацию «документов», опираясь на совместную встречаемость «термов» в этих документах. В качестве документов в данном случае используются ресурсы, посещенные в пределах одной сессии, а в качестве термов – сами ресурсы. Результатом работы тематического моделирования являются интернет-ресурсы, сгруппированные на определенное число не именованных групп (рис. 2).



Рис. 2. Схема работы предложенного метода

Fig. 2. The scheme of the proposed method

Ручной анализ наиболее популярных интернет-ресурсов, попавших в каждую группу, позволит определить название каждой группы и выявить группы безопасных и опасных интернетресурсов.

Предобработка лог-файлов

Пользователи сети интернет ежедневно генерируют тысячи записей в лог-файлах (рис. 3), и большинство записей в этих файлах не несет полезной информации. При посещении одной интернет-страницы, браузер совершает в среднем 10–20 запросов, и каждый из этих запросов фиксируются в журнале прокси-сервера. Основная цель предобработки – снижение числа обрабатываемых данных, что позволит ускорить процесс анализа и повысить качество результатов [8].

Для дальнейшего анализа разумно исключить записи, удовлетворяющие одному из требований:

– запрашиваемый ресурс имеет тип css/js/image;

- запрос совершен анонимным пользователем.

В среднем такая фильтрация снижает объем данных примерно в 5 раз. Опционально для большего снижения числа обрабатываемых данных можно учитывать только get-запросы.



Рис. 3. Ежедневное число запросов, генерируемых 700 пользователями внутренней сети

Fig. 3. Daily number of requests generated by 700 users of the internal network

Вторым этапом предобработки является выделение доменов (или IP-адресов) посещенных ресурсов, чтобы учитывать посещение двух страниц одного сайта как посещение одного и того же ресурса дважды.

Разделение лог файлов на сессии

На данном этапе требуется разделить записи журнала прокси-сервера каждого пользователя на короткие сессии. Возможны различные варианты выделения сессий. Дальше рассмотрены некоторые из них.

Сессии фиксированной длины. Для получения сессий фиксированной длины достаточно задать некоторый временной интервал, например 1 день, и разбить все множество записей через выбранный интервал. Данный подход плох тем, что он объединяет сессии небольшого размера. Например, пользователь мог пользоваться интернетом дважды – утром и вечером, однако для данного подхода это будет считаться одной сессией. Использование периода неактивности пользователя позволяет порождать сессии разной длины, разделенные некоторым промежутком времени, в который не было никакой активности (например, 1 ч). Этот метод имеет один существенный недостаток – он не будет выявлять сессии, если у пользователя есть фоновые процессы, постоянно генерирующие запросы (например, 1 раз в 10 мин).

Недостатки рассмотренных подходов можно устранить, используя метод KDE (Kernel Density Estimation) [9–11]. Данный метод позволяет оценивать плотность распределения одномерного набора данных и определять локальные точки экстремума. Использование таких точек для разделения непрерывного набора данных на отрезки позволит генерировать сессии различной длины, близкие к реальному поведению пользователя (рис. 4). Метод KDE имеет два настраиваемых параметра – ядро и ширину канала. Эти параметры значительно влияют на результат, и их нужно подбирать, вручную анализируя размеры получаемых сессий.



Рис. 4. Гистограмма распределения длин сессий за 1 день. По горизонтальной оси указано время в минутах, а по вертикальной – количество сессий. Средняя длина сессии – 4,5 мин



Тематическое моделирование

Тематическое моделирование используется для строгой или мягкой кластеризации документов, состоящих из термов. Существует множество различных методов тематического моделирования [12–13], однако в данной статье используется метод LDA [14–15].

Для использования тематического моделирования необходимо определить документы и термы. Термом является домен интернет-ресурса, посещенного пользователем, а документом является множество доменов (термов), посещенных одним пользователем в пределах одной сессий.

Применение любой готовой реализации метода LDA для полученных документов позволяет мягко сгруппировать все домены интернет-ресурсов на фиксированное число групп. Количество групп задается пользователем и определяется опытным путем. В таблице представлен результат моделирования 5 групп. Чем выше ресурс расположен в группе, тем сильнее его принадлежность к этой группе.

Анализ наиболее популярных интернет-ресурсов в каждой группе позволяет определить тему каждой группы и решить, является ли группа «безопасной». В случае, если темы групп определить не удается, следует попробовать изменить число искомых тем.

1	2	3	4	5
newslab.ru	nowa.cc	update.eset.com	apps.webofknowledge.com	fitohobby.ru
4pda.ru	ugadalki.ru	law-college-sfu.ru	law-college-sfu.ru packages.linuxmint.com il	
sfkras.ru	scask.ru	kinoaction.ru	kinoaction.ru http.debian.net	
edu.sfu-kras.ru	forum.rcmir.com	kiwt.ru	urod.ru	ckp-rf.ru
worldcrisis.ru 2baksa.net dostavka-		dostavka-	fips.ru	teammodels.no
		krasnoyarsk.ru		
libgen.is	autoopt.ru	kinoaction.ru	mc.corel.com	profinance.ru

Результат	моделирован	ия данных :	за фев	раль 202	20 г. на	ı 5	груі	пп
		r 1 · · ·					/	

Для более точных результатов следует выбирать большее число групп. На рис. 5 представлена проекция 30 тем на две главные компоненты.



Рис. 5. Проекция 30 групп, полученных путем моделирования данных за февраль 2020 г., на две главные компоненты

Fig. 5. Projection of 30 groups obtained by modeling data for February 2020 into two main components

Заключение

Предложенный в статье метод имеет много настраиваемых параметров, позволяющих точно настроить его под разные источники данных, будь то небольшая внутренняя сеть или высоконагруженный узел масштабной сети.

Группировка интернет-ресурсов по схожей теме может быть использована в различных задачах, таких как:

- определение интересов пользователя;

- определение безопасных и опасных сайтов для снижения числа анализируемых данных;
- определение тематики интернет-ресурса.

В качестве дальнейших исследований планируется рассмотреть использование различных метаданных, таких как тип запрашиваемого контента и время совершения сессии. Выявление и отсеивание рекламных сервисов также может быть направлением дальнейшей разработки.

Библиографические ссылки

1. Mouna J., Latifa B., Latifa B. R., Anis A. Classification of security threats in information systems. // Procedia Computer Science. 2014. Vol. 32. P. 489–496.

2. Дерендяев Д. А., Гатчин Ю. А., Безруков В. А. Определение влияния человеческого фактора на основные характеристики угроз безопасности // Кибернетика и программирование. 2019, № 3. С. 38–42.

3. Gyorodi R., Cornelia G., Pecherle G., Radu L. Network Security Using Firewalls // Journal of Computer Science and Control Systems, 2008. Vol. 1.

4. Kao D. Y., Wang S. J., Huang F. Dataset Analysis of Proxy Logs Detecting to Curb Propagations in Network Attacks // Intelligence and Security Informatics. 2008. P. 245–250.

5. Marshall B., Chen, H. Using Importance Flooding to Identify Interesting Networks of Criminal Activity. // Lecture Notes in Computer Science. 2006. Vol. 3975. P. 14–25.

6. Mukkamala S., Sung A. Identifying significant features fornetwork forensic analysis using artificial techniques // International Journal of Digital Evidence. 2003. Vol. 1, no 4. P. 67–74.

7. Blei D. M. Probabilistic topic models // Communications of the ACM. 2012. Vol. 55, No. 4. P. 77–84.

8. Analysis of Web Proxy Logs / B. Fei, J. Eloff, M. Oliver, H. Venter // IFIP International Conference on Digital Forensics. Orlando, 2006. Vol. 222. P. 247–258.

9. Scott D. W. Multivariate Density Estimation. Theory. Practice and Visualization: Second edition. New York, 2015.

10. Using kernel density estimation to understand the influence of neighbourhood destinations on BMI / T. L. King, R. J. Bentley, L. E. Thornton et al. // BMJ Open, 2016, Vol. 6.

11. Kalinic M., Krisp J. Kernel Density Estimation (KDE) vs. Hot-Spot Analysis – Detecting Criminal Hot Spots in the City of San Francisco // Lund, Sweden, 2018.

12. Воронцов К. В. Вероятностное математическое моделирование: теория, модели, алгоритмы и проект BigFRTM. Москва : МАИ, 2021. 112 с.

13. Albalawi R., Yeap T., Benyoucef M. Using Topic Modeling Methods for Short-Text Data: A Comparative Analysis. // Frontiers in Artificial Intelligence. 2020. Vol. 3.

14. Jelodar H., Wang Y., Yuan, Ch., Xia, F. Latent Dirichlet Allocation (LDA) and Topic modeling: models, applications, a survey. 2017.

15. Tharwat A., Gaber T., Ibrahim A., Hassanien A. E. Linear discriminant analysis: A detailed tutorial // Ai Communications. 2017. Vol. 30. P. 169–190.

References

1. Mouna J., Latifa B., Latifa B. R., Anis A. Classification of security threats in information systems. // Procedia Computer Science. 2014. Vol. 32. P. 489–496.

2. Derendyaev D. A., Gatchin Yu. A., Bezrukov V. A. [Determining the influence of the human factor on the main characteristics of security threats]. *Cybernetics and programming*. 2019, No. 3, P. 38–42 (In Russ.).

3. Gyorodi R., Cornelia G., Pecherle G., Radu L. Network Security Using Firewalls. *Journal of Computer Science and Control Systems*. 2008, Vol. 1.

4. Kao D. Y., Wang S. J., Huang F. Dataset Analysis of Proxy Logs Detecting to Curb Propagations in Network Attacks. *Intelligence and Security Informatics*. 2008, P. 245–250.

5. Marshall B., Chen, H. Using Importance Flooding to Identify Interesting Networks of Criminal Activity. *Lecture Notes in Computer Science*. 2006, Vol. 3975, P. 14–25.

6. Mukkamala S., Sung A. Identifying significant features fornetwork forensic analysis using artificial techniques. *International Journal of Digital Evidence*. 2003, Vol. 1, No 4.

7. Blei D. M. Probabilistic topic models. Communications of the ACM. 2012, Vol. 55, No. 4, P. 77-84.

8. Fei B., Eloff J., Oliver M., Venter H. Analysis of Web Proxy Logs. *IFIP International Confer*ence on Digital Forensics. Orlando, 2006, Vol. 222, P. 247–258.

9. Scott D. W. Multivariate Density Estimation. Theory. Practice and Visualization: Second edition. New York, 2015.

10. King T. L., Bentley R. J., Thornton L. E. et al. Using kernel density estimation to understand the influence of neighbourhood destinations on BMI. *BMJ Open.* 2016, Vol. 6.

11. Kalinic M., Krisp J. Kernel Density Estimation (KDE) vs. Hot-Spot Analysis – Detecting Criminal Hot Spots in the City of San Francisco. *Lund, Sweden*, 2018.

12. Vorontsov K. V. *Obzor veroyatnostnykh tematicheskikh modelei* [Overview of probabilistic thematic models]. Moscow, 2021. 112 p.

13. Albalawi R., Yeap T., Benyoucef M. Using Topic Modeling Methods for Short-Text Data: A Comparative Analysis. *Frontiers in Artificial Intelligence*. 2020, Vol. 3.

14. Jelodar H., Wang Y., Yuan, Ch., Xia, F. Latent Dirichlet Allocation (LDA) and Topic modeling: models, applications, a survey. 2017.

15. Tharwat A., Gaber T., Ibrahim A., Hassanien A. E. Linear discriminant analysis: A detailed tutorial. *Ai Communications*. 2017, Vol. 30, P. 169–190.

© Донцов Д. Ю., Исаев С. В., 2022

Донцов Денис Юрьевич – аспирант, Институт вычислительного моделирования СО РАН. E-mail: denis.dontsov96@gmail.com.

Исаев Сергей Владиславович – кандидат технических наук, доцент, заведующий отделом информационно-телекоммуникационных технологий; Институт вычислительного моделирования СО РАН. E-mail: si@icm.krasn.ru.

Dontsov Denis Yurievich – postgraduate, Institute of Computational Modeling SB RAS. E-mail: denis.dontsov96@gmail.com.

Isaev Sergey Vladislavovich – Cand. Sc., docent, head of the department of information and telecommunication technologies; Institute of Computational Modeling SB RAS. E-mail: si@icm.krasn.ru.

УДК 621.373.1 Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-156-167

Для цитирования: Дремухин М. А., Кузовников А. В., Стрекалева Т. В. Разработка перенастраиваемых диапазонных генераторов шума // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 2. С. 156–167. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-156-167.

For citation: Dremukhin M. A., Kuzovnikov A. V., Strekaleva T. V. [Development of tunable band noise generators]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 2, P. 156–167. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-156-167.

Разработка перенастраиваемых диапазонных генераторов шума

М. А. Дремухин^{1*}, А. В. Кузовников^{1, 2}, Т. В. Стрекалева²

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: d-max_70@mail.ru

Целью работы является разработка и исследование принципа работы перенастраиваемых диапазонных генераторов шума (ПДГШ), их характеристик, формирователя шумового сигнала модульного типа, в котором обеспечивается управление шириной спектра шумового сигнала для использования в качестве средств постановки шумовых радиопомех, посредством формирования и излучения в окружающее пространство электромагнитных полей энергетического спектра в заданных диапазонах частот, с возможностью изменения амплитуды и полосы сигнала. Для улучшения характеристик и придания им более широкого применения с целью качественного противодействия несанкционированному съему злоумышленниками информации по каналам излучения побочных электромагнитных излучений (ПЭМИ), необходимо создавать многоканальные адаптивные ПДГШ. В разрабатываемых генераторах в каждом канале защумления можно обеспечить регулировку мощности формируемого шумового сигнала и управление шириной полосы частот защумления, что позволит повысить электромагнитную совместимость подобных устройств. Для обеспечения этого предлагается использовать концепцию проектирования, основанную на применении управляемых модулей источников шума (УМИШ) с полосовыми фильтрами, что также позволяет получить равномерный по амплитуде шумовой сигнал.

Ключевые слова: генератор шума, шумовой сигнал, ПЭМИ.

Development of tunable band noise generators

M. A. Dremukhin^{1*}, A. V. Kuzovnikov^{1, 2}, T. V. Strekaleva²

 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: d-max_70@mail.ru

The aim of the work is to develop and study the principle of operation tunable band noise generators (MGSH) of their characteristics, noise signal conditioner of a modular type, which provides controlling the bandwidth of the noise signal for use as a means setting radio noise. Through the formation and radiation in the surrounding space of electromagnetic fields of the energy spectrum in specified frequency ranges, with the possibility of changing the amplitude and bandwidth of the signal. To improve performance and

make them more widely used in order to high-quality counteraction to unauthorized removal by intruders information on emission channels of spurious electromagnetic radiation (SEMI), it is necessary to create multichannel adaptive SLGNs. In the developed generators in each noisy channel, it is possible to provide power adjustment, generated noise signal and noise bandwidth control, which will improve the electromagnetic compatibility of such devices. For to ensure this, it is proposed to use a design concept based on on the use of controlled modules of noise sources with band–pass filters, which also allows you to get a noise signal uniform in amplitude.

Keywords: noise generator, noise signal, PEMI.

Введение

Генераторы шума (ГШ) применяются для активной защиты информации – постановки различного вида помех [1–2]. Шум, выдаваемый генератором, маскирует полезный сигнал так, что выделить его среди общего сигнала становится очень сложной задачей [3–4]. Если сигнал, выдаваемый генератором, не является случайным, на анализаторе спектра можно увидеть провалы в спектральной характеристике. Это является уязвимостью в системах защиты информации, построенных с помощью этих ГШ, так как есть техническая возможность построить гребенчатый фильтр и выделить неискаженную часть полезного сигнала [5–7].

По мере совершенствования средств вычислительной техники (CBT), для обработки информации ограниченного распространения представляется актуальным создание высокоэффективных ГШ для активной защиты информации и маскирования ПЭМИ [8–9]. Побочные излучения образуются вследствие наложения информативных сигналов на паразитные сигналы внутренних устройств и блоков СВТ или излучения информативных сигналов в явном виде [10–11]. Разрабатываемые ГШ должны быть способны обеспечить, с одной стороны, сохранность информации, излучаемой по каналам ПЭМИ [12], а с другой стороны, обеспечить электромагнитную совместимость технических средств активной защиты информации с другими радиотехническими устройствами и телекоммуникационными системами.

В настоящее время на рынке имеется большое количество сертифицированных ГШ для активной защиты информации. В то же время подобные устройства по своей структуре являются однополосными ГШ маскирующей помехи, с достаточно широкой полосой излучения шумового сигнала и максимальной частотой работы от 1 до 2,5 ГГц [13–15]. Этого явно недостаточно, поскольку тактовые частоты тех же компьютеров постоянно возрастают, что приводит к расширению излучения частотного диапазона. В связи с этим актуален вопрос электромагнитной совместимости ГШ и других радиопередающих и принимающих устройств. Излучение шумового сигнала за пределами рабочей полосы должно быть минимальным и удовлетворять требования Государственного комитета по радиочастотам, в которых определены нормы на спектральные мощности излучения ГШ. К тому же нерационально иметь в наличии большое количество полосовых ГШ на близкие частоты в пределах одного диапазона, так как это значительно усложняет конструкцию комплекса, а также систему его управления. В этом случае целесообразно использовать ПДГШ с максимальной частотой работы до 5–8 ГГц.

Основанная часть

Комплекс ПДГШ предназначен для постановки радиопомех в диапазоне частот от 200 МГц до 6 ГГц с возможностью регулировки выходного сигнала как по частоте, так и по амплитуде. Комплекс функционирует автономно, при необходимости управление работой комплекса осуществляется оператором. Предусмотрена возможность удаленного подключения по проводному интерфейсу Ethernet и непосредственного подключения по интерфейсу USB к комплексу с помощью пульта дистанционного управления для управления его работой. Основные технические характеристики комплекса ПДГШ приведены в табл. 1.

Конструктивно блок ПДГШ состоит из следующих функциональных узлов: модулей источников шума, фильтров, модуля сумматора, модуля предварительного усилителя, модуля выходного усилителя мощности, модуля управления, блока питания, блоков преобразования питающих напряжений, фидерной линии и антенного блока, вентиляторов системы охлаждения. Структурная схема блока ПДГШ представлена на рис. 1.

Таблица 1

Технические характеристики комплекса Г	ІДГШ
--	------

N⁰	Диапазон перекрытия,	Рабочая полоса	Интегральная мощность
литеры	ГГц	заграждения, не менее,	на входе излучающей
		МГц	антенны, не менее, Вт
1	от 0,2 до 1,5		
2	от 1,5 до 2,5	100	3
3	от 2,5 до 4,0		5
4	от 4,0 до 6,0	200	





Основной частью ПДГШ является блок ГШ, который состоит из набора полосовых ГШ и модуля сумматора. В состав полосового ГШ входит УМИШ и полосовой фильтр. УМИШ состоит из блока преобразования питающего напряжения (БППН) и модуля источника шума (МИШ). БППН подает управляющее напряжение на МИШ, тем самым создавая амплитуду шумового сигнала. МИШ является основным источником шума, принцип действия которого основан на создании шумового сигнала в p-n переходе «база – эмиттер» транзистора, состоящего из тепловой и дробовой составляющих. Тепловой шум вызывается колебаниями носителей в проводящей среде в условиях теплового равновесия. Дробовой шум является следствием дискретности носителей заряда и хаотичности их образования.

Количество полосовых ГШ зависит от количества рабочих полос, заложенных в ПДГШ, в котором каждый полосовой фильтр настроен на свою рабочую полосу пропускания шума. Все шумовые сигналы с полосовых ГШ поступают на модуль сумматора, в котором суммируются предварительное усиление с выходным усилением мощности для получения рабочей полосы заграждения. Данная концепция проектирования ПДГШ позволяет сузить полосу излучаемого шумового сигнала до минимально необходимых значений с возможностью работы на фиксированных частотах, так и в режиме пассивного выбора и перестройки рабочей частоты в пределах установленного рабочего диапазона, что повышает эффективность их функционирования.

Результаты проведения замеров ГШ

Для подтверждения характеристик работы ПДГШ измерения проводились для всех разрабатываемых ГШ в каждом поддиапазоне перекрытия частот с использованием УМИШ с переключаемыми полосовыми фильтрами.

Измерения ширины диаграммы направленности (ДН) излучающих антенн ПДГШ проводились в безэховой экранированной камере. Антенны, развертываемые на мачтовых устройствах, при измерении ДН в горизонтальной плоскости устанавливают на поворотной платформе в рабочее положение с использованием непроводящей опоры. Для измерения диаграммы направленности измерительную аппаратуру соединяют согласно схеме, приведенной на рис. 2.



Рис. 2. Схема проведения измерений: 1 – генератор; 2 – исследуемая антенна; 3 – вспомогательная антенна; 4 – измерительный приемник

Fig. 2. Measurement scheme: l – generator; 2 – antenna under study; 3 – auxiliary antenna; 4 – measuring receiver

Вспомогательная и исследуемая антенны имеют одинаковую поляризацию излучения. При измерении параметров антенны направленного излучения расстояние между приемной и передающей антеннами должно удовлетворять неравенству:

$$R > \frac{2(D_1 + D_2)^2}{\lambda},\tag{1}$$

где D_1 – наибольший из линейных размеров испытуемой антенны; D_2 – наибольший из линейных размеров приемной антенны; λ – длина волны.

Поверхность для проведения измерений представляет собой ровную площадку на поверхности земли с однородными электрическими характеристиками, а также свободна от отражающих предметов в достаточно большой зоне, чтобы ошибки при проведении испытаний были сведены к минимуму. Также было исключено влияние посторонних электромагнитных полей на точность результатов измерений и обеспечено заземление измерительной площадки.

С помощью поворотного устройства испытуемую антенну с интервалом поворачивают вокруг оси на 360° для горизонтальной плоскости антенны и на 60° для вертикальной. Величина интервала составляет не более 10°. На каждый поворот антенны было проведено по три измерения для каждой исследуемой частоты (нижней 0,2 ГГц, центральной 0,75 ГГц и верхней 1,5 ГГц) для литеры № 1.

При каждом повороте испытуемой антенны на угол по показаниям измерительного приемника, подключенного к вспомогательной антенне, записывают напряжения принимаемого сигнала. По результатам измерений построили график ДН в полярной системе координат в зависимости от угла поворота. В табл. 2 и 3 приведены значения напряжения принимаемого сигнала от исследуемой антенны только в диапазоне 0,2 ГГц.

Таблица 2

Поворот антенны, °	<i>P</i> ₁ , дБм	<i>P</i> ₂ , дБм	<i>Р</i> ₃ , дБм	<i>Р</i> _{СР} , дБм
1 ,	1	Частота 0.2 ГГи		
0	-83,79	-83,72	-84,07	-83,86
10	-83,71	-83,70	-83,75	-83,72
20	-83,64	-83,59	-83,84	-83,69
30	-83,75	-83,61	-84,31	-83,89
40	-83,69	-83,63	-83,93	-83,75
50	-83,63	-83,68	-83,43	-83,58
60	-84,03	-83,94	-84,39	-84,12
70	-84,25	-84,11	-84,81	-84,39
80	-85,06	-85,05	-85,10	-85,07
90	-85,29	-85,21	-85,61	-85,37
100	-86,02	-85,88	-86,58	-86,16
110	-86,49	-86,53	-86,33	-86,45
120	-86,61	-86,55	-86,85	-86,67
130	-87,97	-87,85	-88,45	-88,09
140	-88,32	-88,24	-88,64	-88,40
150	-88,84	-88,71	-89,36	-88,97
160	-89,31	-89,23	-89,63	-89,39
170	-90,13	-90,19	-89,89	-90,07
180	-90,09	-90,03	-90,33	-90,15
190	-88,76	-88,65	-89,20	-88,87
200	-90,04	-90,10	-89,8	-89,98
210	-90,02	-90,07	-89,82	-89,97
220	-90,68	-90,62	-90,92	-90,74
230	-90,23	-89,99	-91,19	-90,47
240	-91,02	-91,21	-90,26	-90,83
250	-90,35	-90,22	-90,87	-90,48
260	-91,22	-91,26	-91,06	-91,18
270	-90,56	-90,65	-90,20	-90,47
280	-88,69	-88,62	-88,97	-88,76
290	-88,65	-88,55	-89,05	-88,75
300	-86,51	-86,64	-85,99	-86,38
310	-85,72	-85,80	-85,40	-85,64
320	-84,21	-84,37	-83,57	-84,05
330	-83,93	-83,80	-84,45	-84,06
340	-83,76	-83,63	-84,28	-83,89
350	-83,32	-83,13	-84,08	-83,51

Горизонтальная плоскость исследуемой антенны

Поворот антенны, $^{\circ}$	P_1 , дБм	<i>P</i> ₂ , дБм	<i>Р</i> ₃ , дБм	$P_{ m CP}$, дБм
		Частота 0,2 ГГц	·	
30	-80,91	-80,88	-81,03	-80,94
20	-80,12	-80,18	-79,88	-80,06
10	-80,03	-80,12	-79,67	-79,94
0	-79,61	-79,59	-79,69	-79,63
-10	-79,45	-79,36	-79,81	-79,54
-20	-79,38	-79,30	-79,70	-79,46
_30	-80.02	_79.98	-80.18	-80.06

Вертикальная плоскость исследуемой антенны

Таблица 3

Аналогичным образом результаты измерений проводились для каждого исследуемого поддиапазона перекрытия частот от 1,5–6,0 ГГц, литеры № 2–4.

Диаграммы направленности исследуемой антенны диапазона 0,2 ГГц представлены на рис. 3.



Рис. 3. Диаграммы направленности антенны на частоте 0,2 ГГц: *а* – горизонтальная плоскость; *б* – вертикальная плоскость

Fig. 3. Antenna pattern at 0,2 GHz: a – horizontal plane; b – vertical plane

В результате измерений ширины ДН излучающих антенн ПДГШ в диапазонах частот 0,2–6,0 ГГц были построены диаграммы направленности для каждой антенны на трех частотах (нижней, центральной и верхней). Ширина ДН для каждой антенны составляет 120°±10° в горизонтальной плоскости и 60° для вертикальной плоскости по уровню минус 3 дБ.

Далее выполнили измерения глубины регулировки мощности ПДГШ. Исследуемый ПДГШ устанавливался на поворотном столе в рабочее положение. Для измерения глубины регулировки мощности измерительную аппаратуру соединяют согласно схеме, приведенной на рис. 4, с использованием проходных аттенюаторов.

Проводится измерение максимального уровня сигнала при включенном генераторе, а затем производится уменьшение мощности на выходе генератора на 1 дБ и повторно измеряются уровни сигнала. Вышеприведенные измерения проводятся с шагом 1 дБ не менее 20 раз. Измерение уровней максимального сигнала и ослабленного сигнала для всей рабочей полосы заграждения каждого генератора выполняется не менее трех раз. Затем высчитывается среднее значение. Глубина регулировки мощности составляла 0–20 дБ.



Рис. 4. Схема проведения измерений: 1 – исследуемый генератор; 2 – измерительный приемник

Fig. 4. Measurement scheme: 1 – generator under study; 2 – measuring receiver

Уровень регулировки максимального уровня сигнала вычисляется по формуле:

$$\Delta = E_{\rm oc} - E_{\rm Mc} = \sum_{i=1}^{n} \frac{E_{\rm oc}_i}{n} - \sum_{i=1}^{n} \frac{E_{\rm Mc}_i}{n},$$
(2)

где E_{oc} – уровень ослабленного сигнала при включенном генераторе; E_{mc} – уровень максимального сигнала при включенном генераторе; *n* – количество измерений.

Численные значения измерений напряжения принимаемого сигнала для уровня регулировки генератора от 0–20 дБ, в диапазоне частот 0,2–1,5 ГГц, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Исследуемый	E_{oc_1} ,	$E_{\rm oc_2}$,	$E_{\rm oc_3}$,	$E_{\rm oc}$,	E_{mc_1} ,	E_{mc_2} ,	$E_{\rm mc_3}$,	$E_{\rm mc}$,	Регулировка Δ ,
ПДГШ	дБм	дБм	дБм	дБм	дБм	дБм	дБм	дБм	дБ
Диапазон 0,2–1,5 литера № 1	-45,1	-45,6	-44,5	-45,1	-25,1	-25,5	-24,3	-25,0	20
	-44,0	-44,0	-43,5	-43,8	-25,1	-25,5	-24,3	-25,0	19
	-43,1	-43,1	-42,5	-42,9	-25,1	-25,5	-24,3	-25,0	18
	-42,0	-42,2	-41,9	-42,0	-25,1	-25,5	-24,3	-25,0	17
	-41,0	-41,0	-40,7	-40,9	-25,1	-25,5	-24,3	-25,0	16
	-40	-40,8	-39,9	-40,2	-25,1	-25,5	-24,3	-25,0	15
	-39,1	-40,0	-38,4	-39,2	-25,1	-25,5	-24,3	-25,0	14
	-38,1	-38,9	-37,5	-38,2	-25,1	-25,5	-24,3	-25,0	13
	-37,1	-38,0	-37,0	-37,4	-25,1	-25,5	-24,3	-25,0	12
	-36,0	-36,5	-35,6	-36,0	-25,1	-25,5	-24,3	-25,0	11
	-34,9	-35,7	-33,9	-34,8	-25,1	-25,5	-24,3	-25,0	10
	-34,0	-34,2	-34,0	-34,1	-25,1	-25,5	-24,3	-25,0	9
	-33,0	-33,4	-32,6	-33,0	-25,1	-25,5	-24,3	-25,0	8
	-32,0	-32,1	-31,1	-31,7	-25,1	-25,5	-24,3	-25,0	7
	-31,0	-31,6	-30,3	-31,0	-25,1	-25,5	-24,3	-25,0	6
	-30,1	-30,6	-29,6	-30,1	-25,1	-25,5	-24,3	-25,0	5
	-29,1	-29,5	-28,6	-29,1	-25,1	-25,5	-24,3	-25,0	4
	-28,0	-28,3	-27,5	-27,9	-25,1	-25,5	-24,3	-25,0	3
	-27,1	-27,9	-26,4	-27,1	-25,1	-25,5	-24,3	-25,0	2
	-26,0	-26,8	-26,0	-26,3	-25,1	-25,5	-24,3	-25,0	1
	-25,1	-25,5	-24,3	-25,0	-25,1	-25,5	-24,3	-25,0	0

Значения измерений напряжения принимаемого сигнала

^{*}Примечание. Значения максимального уровня сигнала в табл. 4 округлены до целого числа.

Для визуализации процесса на рис. 5 показана спектрограмма глубины регулировки мощности, которая построена по результатам измерения напряжения, представленным в табл. 4, для максимального уровня сигнала 0 и 20 дБ.



Рис. 5. Спектрограмма глубины регулировки мощности: a - 0 дБ; $\delta - 20$ дБ

Fig. 5. Power adjustment depth spectrogram: a - 0 dB; b - 20 dB

По данному принципу проведены измерения глубины регулировки мощности ПДГШ в диапазоне 1,5–6,0 в безэховой экранированной камере, для каждого генератора в рабочей полосе заграждения по уровню не менее 20 дБ с шагом ± 1 дБ.

Схема проведения измерений диапазона перекрытия ПДГШ аналогична рис. 4. Для каждого генератора проводилось по три измерения для всей рабочей полосы заграждения каждого генератора. Результаты, полученные в ходе проведения измерений диапазона перекрытия ПДГШ от 0,2–1,5, приведены на рис. 6.



Рис. 6. Диапазон перекрытия ПДГШ Fig. 6. The overlap range of the PDGSH

Из рис. 6 видно, что диапазон перекрытия литеры \mathbb{N} 1 генератора представляет собой диапазон от 0,2 до 1,5 ГГц с небольшим (\approx 3 дБ) уменьшением уровней генерируемого шума на границах диапазона. Аналогичным образом замеры проводились для всех остальных литер \mathbb{N} 2–4.

Набор управляющих МИШ может иметь n-количество узкополосных фильтров с заданной полосой пропускания и выбранной дискретностью перестройки. В данном случае на рис. 7 показан диапазон последовательного включения трех смежных полосовых фильтров, по которому видно, что полоса перекрытия каждого фильтра накладывается на предыдущий частотный диапазон, тем самым позволяет регулировать ширину перекрываемого спектра.

Далее выполнили измерения рабочей полосы заграждения для первого полосового ГШ. Исследуемый ПДГШ установили на поворотном столе в рабочее положение, измерительную аппаратуру соединили согласно схеме, приведенной на рис. 4. Рабочая полоса заграждения для генераторов с литерой № 1–3 должна составлять не менее 100 МГц и не менее 200 МГц для литеры № 4.

Результаты, полученные в ходе проведения измерений рабочей полосы заграждения генератора ПДГШ для первого фильтра относительно его максимума по уровню минус 3 дБ, приведены на рис. 8.



Рис. 7. Диапазон перекрытия полосовых фильтров



Fig. 7. Bandpass filter overlap range

Рис. 8. Рабочая полоса заграждения

Fig. 8. Working barrage strip

Из показаний анализатора видно, что полоса заграждения для данного фильтра составляет 107,26 МГц, что соответствует заданным требованиям. Усредненные результаты измерений по всем фильтрам применяемых в ПДГШ сведены в табл. 5.

Таблица 5

Усредненные результаты измерений применяемых фильтров

№ литеры	Диапазон перекрытия, ГГц	Рабочая полоса заграждения, МГц
1	от 0,2 до 1,5	106,2
2	от 1,5 до 2,5	103,0
3	от 2,5 до 4,0	104,1
4	от 4,0 до 6,0	224,5

Согласно результатам измерений, приведенных в табл. 5, все фильтры, применяемые в ПДГШ для литеры № 1–3 в диапазоне 0,2–4,0 ГГц, соответствуют требованиям по ширине рабочей полосы заграждения и составляют не менее 100 МГц. Фильтры, применяемые в ПДГШ с литерой № 4 в диапазоне 4,0–6,0 ГГц, соответствуют требованиям по ширине рабочей полосы заграждения и составляют не менее 200 МГц.

Заключение

Разработана структура ПДГШ для пространственного зашумления средств вычислительной техники, отличающейся расширенным диапазоном частот от 200 МГц до 6 ГГц, регулируемой интегральной мощностью шума на входе излучающей антенны не минее 3 Вт, улучшенным энергосберегающим режимом функционирования, что позволяет обеспечить его применение как автономного устройства защиты с возможностью регулировки мощности излучения для каждой полосы излучаемого сигнала до 20 дБ с шагом ± 1 дБ, со степенью свободы антенны в горизонтальной и вертикальной плоскости $\pm 30^{\circ}$ и шириной диаграммы направленности в горизонтальной плоскости до $120\pm10^{\circ}$ по уровню минус 3 дБ.

Рассмотренный в работе формирователь шумового сигнала, где формирование шумового сигнала осуществляется с использованием амплитудной модуляции, может быть использован в многоканальных генераторах шумового сигнала в качестве источника шумового сигнала с перестраиваемой по частоте шириной спектра в зависимости от центральной частоты модулирующего сигнала, основанного на применении УМИШ с полосовыми фильтрами. Это позволяет исключить провал амплитуд спектральных составляющих шумового сигнала в широком диапазоне частот, что способствует получению равномерного по амплитуде спектра шумового сигнала на выходе устройства при выполнении операции изменении ширины спектра шумового сигнала.

Библиографические ссылки

1. Меньшаков Ю. К. Теоретические основы технических разведок. М. : ИПЦ «Маска», 2017. 640 с.

2. Меньшаков Ю. К. Защита объектов и информации от технических средств разведки. М. : Изд. РГГУ, 2002. 399 с.

3. Меньшаков Ю. К. Основы защиты от технических разведок. М. : Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 478 с.

4. Рыженко С. В. К вопросу о побочных электромагнитных излучениях современных интерфейсов средств вычислительной техники // Актуальные проблемы обеспечения информационной безопасности. 2017. С. 170–176.

5. Куприянов А. И. Радиоэлектронная борьба. М. : Вузовская книга, 2013. 360 с.

6. Хорев А. А. Теоретические основы оценки возможностей технических средств разведки. М. : МО РФ, 2000. 255 с.

7. Авдеев В. Б., Анищенко А. В. Сравнительная оценка методических подходов к расчету отношения сигнал/ шум в задачах контроля защищенности информации от утечки за счет побочных электромагнитных излучений // Специальная техника. 2016. № 1. С. 54–63.

8. Петраков А. В. Основы практической защиты информации. М. : Радио и связь, 2000. 361 с.

9. Хорев А. А. Техническая защита информации. Т. 1. М. : НПЦ «Аналитика», 2008. 436 с.

10. Hong J.-S., Lancaster M. J. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications. John Wiley & Sons, 2001. 473 p.

11. Artes H., Matz G., Hlawatsch F. Linear time-varying channels. Tech. rep., Institute of Communications and Radio-Frequency Engineering, Vienna University of Technology, 1999.

12. Барсуков В. С. Безопасность: технологии, средства, услуги. М. : КУДИЦ ОБРАЗ, 2001. 496 с.

13. Патент RU № 2170493 Российская Федерация, МПК Н04К 3/00. Устройство радиомаскировки / Безруков В. А., Иванов В. П., Калашников В. С., Лебедев М. Н.; заявл. 15.05.2000; опубл. 10.07.2001, БИ № 19. 14. Система для защиты от утечки информации по каналам ПЭМИН Гром-ЗИ-4Б [Электронный pecypc]. URL: https://pro-spec.ru/catalog/generatory-shuma/sistema-dlya-zashchity-otutechki-informatsiipo-kanalam-pemin-grom-zi-4b (дата обращения: 24.11.2020).

15. SEL SP-21 Баррикада генератор пространственного зашумления [Электронный ресурс]. URL: http://www.spectr-sks.ru/product/8535 (дата обращения: 26.11.2021).

References

1. Men'shakov Yu. K. *Teoreticheskie osnovy tekhnicheskikh razvedok* [Theoretical foundations of technical intelligence]. Moscow, IPTs Maska Publ., 2017, 640 p.

2. Men'shakov Yu. K. Zashchita ob"ektov i informatsii ot tekhnicheskikh sredstv razvedki [Protection of objects and information from technical means of intelligence]. Moscow, Izd. RGGU Publ., 2002. 399 c.

3. Men'shakov Yu. K. *Osnovy zashchity ot tekhnicheskikh razvedok* [Fundamentals of protection from technical intelligence]. Izd. MGTU im. N. E. Baumana Publ., 2011. 478 c.

4. Ryzhenko S.V. [On the issue of side electromagnetic radiation of modern computer interfaces]. *Aktual'nye problemy obespecheniya informatsionnoy bezopasnosti*. 2017, P. 170–176 (In Russ.).

5. Kupriyanov A. I. *Radioelektronnaya bor'ba* [Radio-electronic struggle]. Moscow : Vuzovskaya kniga Publ., 2013, 360 p.

6. Khorev A. A. *Teoreticheskie osnovy otsenki vozmozhnostey tekhnicheskikh sredstv razvedki* [Theoretical foundations for assessing the capabilities of technical means of reconnaissance]. Moscow, MO RF Publ., 2000. 255 c.

7. Avdeev V. B., Anishchenko A. V. [Comparative evaluation of methodological approaches to the calculation of the signal / noise ratio in the problems of monitoring the security of information from leakage due to spurious electromagnetic radiation] *Spetsial'naya tekhnika*. 2016, No. 1, P. 54–63 (In Russ.).

8. Petrakov A. V. *Osnovy prakticheskoy zashchity informatsii* [Fundamentals of practical information security]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 2000, 361 c.

9. Khorev A. A. *Tekhnicheskaya zashchita informatsii* [Technical protection of information]. Vol. 1. Moscow, NPTs Analitika, 2008, 436 p.

10. Hong J.-S., Lancaster M. J. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications. John Wiley & Sons, 2001, 473 p.

11. Artes H., Matz G., Hlawatsch F. Linear time-varying channels. Tech. rep., Institute of Communications and Radio-Frequency Engineering, Vienna University of Technology, 1999.

12. Barsukov V. S. *Bezopasnost': tekhnologii, sredstva, uslugi* [Security: technologies, tools, services]. Moscow, KUDITS OBRAZ Publ., 2001, 496 p.

13. Bezrukov V. A., Ivanov V. P., Kalashnikov B. C., Lebedev M. N. *Ustroystvo radiomaskirovki* [Device of radio deception]. Patent RU No. 2170493 Russian Federation, IPC H04K 3/00; declared 15.05.2000; publ. 10.07.2001, BI No. 19.

14. *Sistema dlya zashchity ot utechki informatsii po kanalam PEMIN "Grom–ZI–4B"* [System for protection against information leakage through SERaI channels. "Grom-ZI-4B"]. Available at: https://pro-spec.ru/catalog/generatory-shuma/sistema-dlya-zashchity-ot-utechki-informatsiipo-kanalam-pemin-grom-zi-4b (accessed: 24 November 2020).

15. SEL SP-21 *Barrikada generator prostranstvennogo zashumleniya* [SEL SP-21 Barricada spatial noise generator]. Available at: http://www.spectr-sks.ru/product/8535 (accessed: 26 November 2021).

© Дремухин М. А., Кузовников А. В., Стрекалева Т. В., 2022

Дремухин Максим Андреевич – инженер; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: d-max_70@mail.ru.

Кузовников Александр Витальевич – кандидат технических наук, доцент, заместитель генерального конструктора по разработке космических систем, общему проектированию и управлению космическими аппаратами; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: ujub@list.ru.

Стрекалёва Татьяна Владимировна – кандидат филологических наук, доцент, доцент кафедры ТИЯ; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: strekaleva@mail.ru.

Dremukhin Maxim Andreevich – engineer; Joint Stock Company "Information Satellite Systems" named after Academician M. F. Reshetnev". E-mail: d-max_70@mail.ru.

Kuzovnikov Alexander Vitalievich – Cand. Sc., Associate Professor, Deputy General Designer for the development of space systems, general design and control of spacecraft; Joint Stock Company "Information Satellite Systems" named after Academician M. F. Reshetnev". E-mail: ujub@list.ru.

Strekaleva Tatyana Vladimirovna – Cand. Sc., Associate Professor, Assistant Professor of the Chair of Foreign Languages for Engineering Students; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: streka-leva@mail.ru.

УДК 004.021 Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-168-176

Для цитирования: Крутько Д. А., Калашников А. С., Буряченко В. В. Методы построения маршрутов вне населенных пунктов на основе GPS-данных // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 2. С. 168–176. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-168-176.

For citation: Krutko D. A., Kalashnikov A. S., Buryachenko V. V. [Methods for constructing routes outside of settlements on the basis of GPS data]. *Siberian Aerospace Journal.* 2022, Vol. 23, No. 2, P. 168–176. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-168-176.

Методы построения маршрутов вне населенных пунктов на основе GPS-данных

Д. А. Крутько^{*}, А. С. Калашников, В. В. Буряченко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31 *E-mail: krutko.d00@gmail.com

Методы построения маршрутов включают задачу поиска кратчайшей траектории между двумя или несколькими объектами, которая может изменяться в зависимости от погодных условий, координат высоты и других параметров. Методы, которые рассматриваются в статье, позволяют выполнять построение маршрутов с использованием GPS-треков для различных областей знаний: проектирование маршрутов в рамках города, региона, страны либо при дистанционном зондировании земли. Рассматриваемые алгоритмы используются в сфере мониторинга окружающей среды при чрезвычайных ситуациях, для поиска оптимальных маршрутов передачи данных в спутниковых системах и их валидации, а также в организационно-экономических системах. Наиболее широко для построения маршрутов применяются подходы теории графов и поиска в пространстве состояний, где любой траектории между объектами ставится свой вес. Однако до сих пор не существует универсальной системы, позволяющей построить оптимальный маршрут по пересеченной местности. В статье рассмотрены такие методы, как алгоритм Дейкстры, Левита, Флойда – Уоршелла, а также выполнено сравнение их эффективности по времени работы и вычислительной сложности. Целью является разработка алгоритма поиска кратчайшего пути и построения туристического маршрута от заданной точки А до точки Б, что откроет большие возможности для горожан самостоятельно посещать новые интересные районы, активно проводить свободное время и узнавать окрестности города. Система апробирована на территории Торгашинского хребта, включает более 38 точек маршрута, расположенных на расстоянии более и позволяет построить желаемые маршруты 25 КМ, в течение менее 15 мс с учетом перепада весов и расстояния между объектами. При этом система допускает ввод собственных координат, которые учитываются при построении маршрутов.

Ключевые слова: кратчайший путь, теория графов, построение маршрутов, gpx-треки, алгоритм Дейкстры.

Methods for constructing routes outside of settlements on the basis of GPS data

D. A. Krutko^{*}, A. S. Kalashnikov, V. V. Buryachenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology 31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation *E-mail: krutko.d00@gmail.com

Route building methods include the task of finding the shortest trajectory between two or more objects, which may vary depending on weather conditions, altitude coordinates, and other parameters. The methods discussed in the article allow building routes using GPS tracks for various fields of knowledge: designing routes within a city, region, country, or with remote sensing of the earth. The considered algorithms are used in the field of environmental monitoring in emergency situations, to search for optimal data transmission routes in satellite systems and their validation, as well as in organizational and economic systems. The most widely used approaches for building routes are graph theory and search in the state space, where any trajectory between objects is given its own weight. However, there is still no system that allows you to make a tourist route over rough terrain. The most widely used approaches are graph theory and search in the state space, where any trajectory between objects has its own weight. The article discusses such methods as the Dijkstra, Levitt, Floyd-Warshell algorithm, and also compares their effectiveness in terms of running time and complexity. The aim of the work is to develop an algorithm for finding the shortest path and building a tourist route from a given point A to point B. This development will open up new opportunities for citizens to independently visit new interesting areas, actively spend their free time and get to know the surroundings of the city. The system has been tested on the territory of the Torgashinsky ridge, includes more than 38 route points located at a distance of more than 25 kilometers, and allows you to build the desired routes within less than 15 milliseconds. At the same time, the system allows you to enter your own coordinates, which are considered when building routes.

Keywords: shortest path, graph theory, building routes, gpx-tracks, Dijkstra's algorithm.

Введение

На сегодняшний день актуальна тема поддержания здорового образа жизни. Люди стремятся следить за своим здоровьем, занимаются спортом, а также путешествуют. Они постоянно находятся в поиске различных мест посещения. Красноярский край обладает очень богатой природой. В нашем городе существует проект «Красноярский Хайкинг», который представляет собой сеть промаркированных троп на территории Торгашинского хребта. Появилось множество граждан, желающих сходить в поход как в окрестностях своего города, так и вне городской местности. Существует множество источников, где можно найти справочную информацию о местах посещения и общие тропы, однако, до сих пор нет возможности создания своего индивидуального маршрута по пересеченной местности с оптимальным для конкретного человека треком. Для разработки такой системы, которая бы позволила в автоматизированном режиме строить свои собственные маршруты по выбранным местам посещения с использованием данных gps-навигации, необходимо разработать собственный алгоритм, позволяющий построить кратчайший маршрута от точки А до точки Б.

Задача построения туристического маршрута сводится к задаче поиска кратчайшего пути от одной вершины графа до другой [1]. Данная проблема является одной из самых популярных задач в теории графов. Граф представляет собой абстрактный объект из множества вершин (узлов) и набора ребер, описывающих связи между парами вершин. Маршруты, которые состоят из связанных между собой перекрестков, являются графом.

Методы построения маршрутов применяются на практике в различных сферах. В работе [2] рассмотрены подходы, связанные с разработкой технологии для комплексной обработки данных дистанционного зондирования и векторных карт с целью мониторинга последствий чрезвычайных ситуаций, выявления критичных территорий и предотвращения негативных последствий. Авторы [3] рассматривают применение дискретного алгоритма решения SOTA (Selforganizing Tree Algorithm) и его параллельной версии с применением CUDA при построении надежного кратчайшего пути с использованием возможностей видеокарт. В работе [4] авторами разработана модификация дискретного алгоритма нахождения маршрута движения в зависящей от времени транспортной сети. Авторы демонстрируют эффективность предлагаемого подхода на примере крупномасштабной дорожной сети г. Самары и достигают скорости построения эффективного маршрута менее 1 с. Также методы построения маршрутов применяются для передачи данных в спутниковых [5], организационно-экономических системах [6], для мониторинга состояния лесов при организации спутникового наблюдения [7; 8] и в других областях данных. В статье рассмотрены различные методы построения маршрутов и предложена эффективная реализация модификации метода Дейкстры для построения туристических маршрутов на территории Торгашинского хребта.

Методы построения маршрутов

Классическая проблема поиска кратчайшего пути в открытой местности была направлением большого числа исследований на протяжении многих лет. В связи с этим существует большое количество различных алгоритмов нахождения пути, многие из которых показывают хорошие результаты в своей области. Исследователи в работе [9] выполнили оценку эффективности 15 алгоритмов поиска кратчайшего пути в реальных дорожных сетях. Авторы рассматривают алгоритмы Беллмана – Форда – Мура, алгоритм Дейкстры и его модификации, алгоритм Пейпа – Левитта и другие. На основе оценки определен набор рекомендуемых алгоритмов для вычисления кратчайших путей в реальных дорожных сетях. Также широко известен алгоритм А* [10], который направлен на уменьшение времени поиска оптимального маршрута за счет исключения менее перспективных направлений поиска на базе алгоритма Дейкстры. Модификации алгоритма Дейкстры применяются во многих практических задачах, например поиск кратчайшего маршрута для туризма в Бали [11]. Рассмотрим наиболее подробно такие алгоритмы, как алгоритм Дейкстры, алгоритм Левита и алгоритм рименя.

Алгоритм Дейкстры – один из самых известных алгоритмов для поиска кратчайшего пути [12]. Он позволяет определить кратчайшие пути между вершинами. Реализация заключается в том, что алгоритм на каждом шаге «посещает» одну вершину и пытается уменьшить метки. Работа алгоритма завершается, когда все вершины посещены. У алгоритма Дейкстры имеется ряд достоинств, таких как высокая скорость работы и точность результата. Однако есть и недостаток – сложность в понимании. Вычислительная сложность алгоритма Дейкстры зависит от способа нахождения вершины, хранения множества непосещенных вершин и обновления меток. Отсюда получаем, что реализация в данном методе потребует O(N) и O(1) единиц соответственно. Учитывая, что первая операция выполняется N раз, а вторая в зависимости от построенного графа, получается сложность $O(N \times N + M)$, где N – количество вершин, а M – константа, зависящая от построенного графа.

Алгоритм Левита – алгоритм на графах, который находит кратчайшее расстояние от одной из вершин графа до всех остальных [13]. Он также работает для графов с ребрами отрицательного веса. В сравнении с методом Дейкстры метод Левита проигрывает в том, что некоторые вершины приходится обрабатывать повторно, а выигрывает на более простых алгоритмах включения и исключения вершин из множества М1 (М1 – вершины, расстояние до которых вычисляется на текущем шаге алгоритма). Установлено, что для графов с «геометрическим» происхождением, построенных на основе транспортных сетей и реальных расстояний, метод Левита оказывается наиболее быстрым. Помимо этого, он выигрывает и по размеру программы. Сложность алгоритма Левита в худшем случае составляет $O(N^2 \times M)$. Чтобы достичь такого времени работы необходимо, чтобы в графе ребра располагались в лексикографическом порядке. Более реальной оценкой данного метода является среднее время, а именно сложность $O(N \times M)$. Однако на реальных графах алгоритм Левита лишь немногим уступает алгоритму Дейкстры.

Алгоритм Флойда – Уоршелла используется для нахождения кратчайших расстояний между всеми вершинами взвешенного графа без циклов с отрицательными весами с использованием метода динамического программирования [14]. В алгоритме используются две матрицы смежности: матрица расстояний D_k и матрица предшествования S_k , после чего, в течение *n* итераций, где *n* – количество узлов в матрице расстояний, а *n*-я итерация, дается

оптимальная / конечная матрица расстояний $D_k = n$, а также окончательная матрица предшествования $S_k = n$.

Недостаток алгоритма Флойда – Уоршелла в том, что алгоритм определяет только кратчайшее расстояние между всеми парами вершин, но не сохраняет информацию о кратчайших путях, что необходимо для задач построения маршрута.

По итогу рассмотрения наиболее важных алгоритмов для получения кратчайшего пути в графе, а также анализу их преимуществ и недостатков, обозначим требования, которые необходимы для реализации поиска кратчайшего пути в трехмерном пространстве на территории Торгашинского хребта:

- временная сложность работы алгоритма;
- высокая простота реализации алгоритма для мобильного приложения;
- работа для графов с положительными весами;
- точность результата;
- сохранение информации о кратчайших путях.

Проведенный анализ показал, что для поиска кратчайшего пути в трехмерном пространстве на территории Торгашинского хребта целесообразно использовать алгоритм Дейкстры, так как он учитывает особенности рассматриваемого процесса. Основными достоинствами алгоритма Дейкстры является высокая скорость работы и точность результата [15].

Алгоритм построения маршрутов на основе GPS-данных

Прежде чем переходить к пошаговому описанию, рассмотрим схему работы алгоритма построения маршрутов по пересеченной местности на территории Торгашинского хребта (рис. 1).



Рис. 1. Схема разработанного алгоритма построения оптимального пути

Fig. 1. Scheme of the developed algorithm for constructing various paths

В программной реализации существует двенадцать gpx-треков (свободный текстовый формат хранения и обмена данными GPS) уже существующих маршрутов на территории Торгашинского хребта. Для того чтобы извлечь всю необходимую информацию из данных треков, применяется библиотека minidom, которая позволяет проанализировать xml-разметку и выбрать необходимую информацию [16].

Все треки находятся в соответствующей папке tracks. При проходе циклом по этой папке, выполняется посещение каждого маршрута и в соответствующие поля записывается следующая информация: название маршрута, цвет прорисовки и координаты каждой точки маршрута в формате широта, долгота и высота.

В словаре vocab ключам в виде названия маршрута задаются соответствующие gpx-треки. Далее по этому словарю формируется список названий маршрутов и создаются словари: индексы для точек пересечения и графа (distances), список вершин (nodes). Кортежами задаются начальная (st) и конечная (en) точки маршрута для составления нового маршрута – они состоят из координат по y и x – затем они записываются в словарь point.

При проходе циклом по vocab, выполняется проверка условия, являются ли точки st и en начальными или конечными точками существующих маршрутов и в таком случае они удаляются из списка point – этот список позволяет определить требуется ли создавать новые вершины графа для корректной работы алгоритма Дейкстры.

Следующим этапом является создание графа маршрутов и их пересечений. Для этого необходимо соотнести каждый маршрут со всеми остальными, чтобы определить есть ли пересечения, в случае нахождения пересечений зафиксировать их. Создаются списки по каждому маршруту, содержащие соответственно x_1 , y_1 и z_1 координаты для первого маршрута и x_2 , y_2 и z_2 координаты второго маршрута. Проходя циклом по точкам списков x_1 и x_2 , определяется расстояние между точкам. Если это расстояние меньше минимального, то перезаписывается минимальное расстояние на новое и сохраняются индексы найденных точек. Если же маршруты пересекаются, определяется среднеарифметическая точка пересечения (x, y, z). Данный метод позволяет найти точку пересечения маршрута, если gpx-треки не пересекаются, а проходят очень близко друг к другу.

Для нахождения расстояния между двумя точками необходимо изучить форму Земли. Форма Земли может быть описана как сфера, поэтому уравнения для вычисления расстояний на большом круге важны для вычисления кратчайшего расстояния между точками на поверхности Земли и часто используются в навигации [17].

Вычисление расстояния этим методом более эффективно и во многих случаях более точно, чем вычисление его для спроектированных координат, поскольку, во-первых, для этого не надо переводить географические координаты в прямоугольную систему координат и, во-вторых, многие проекции, если неправильно выбраны, могу привести к значительным искажениям длин в силу особенностей проекционных искажений.

Для вычислений используется сфера радиусом 6372795 м, что может привести к меньшей ошибке, чем если считать в прямоугольных системах координат.

Согласно сферической теореме косинусов:

$$\Delta \sigma = \sin^{-1} \{ \sin \phi_1 \times \sin \phi_2 + \cos \phi_1 \times \cos \phi_2 \times \cos \Delta \lambda \}, \tag{1}$$

где ϕ_1 , λ_1 , ϕ_2 , λ_2 – широта и долгота двух точек в радианах; $\Delta \lambda$ – разница координат по долготе; $\Delta \sigma$ – угловая разница.

Для перевода углового расстояния в метрическое, необходимо угловую разницу умножить на радиус Земли, единицы конечного расстояния будут равны единицам, в которых выражены метры.

Описанный метод реализован в функциях: Lenfor и Meters. Функция Lenfor – функция, рассчитывающая длину пути между точками маршрута по *x* и *y* без учета высоты, и функция Meters – функция, рассчитывающая расстояние между точками gps-координат с учетом перепада высот, после вычисления расстояния функцией Lenfor.

Алгоритм Дейкстры позволяет определить кратчайшие пути между вершинами. В данной реализации принцип этого алгоритма используется для определения весов ребер, нахождения кратчайшего пути и составляет его из частей gpx-треков. Алгоритм Дейкстры поэтапно формулируется следующим образом:

Шаг 1: задать начальную и конечную точку маршрута.

Шаг 2: создать словарь непосещенных вершин – unvisited, словарь путей до каждой вершины – way, словарь посещенных вершин – visited.

Шаг 3: цикл, пока есть непосещенные вершины. Иначе шаг 10.

Шаг 4: если есть соседи в unvisited, то новый вес пути (newDistance) = текущий вес пути (currentDistance) + вес между вершинами (distance). Иначе шаг 3.

Шаг 5: значение unvisited – список? Если да, взять первое значение списка: dist = dist[0]. Иначе unvisited[neighbour] = newDistance, newPath (новая часть пути).

Шаг 6: записать в словарь путей newPath. А в visited для текущей вершины записать currentDistance.

Шаг 7: удалить текущую вершину из unvisited.

Шаг 8: сформировать кандидатов для новой текущей вершины. Отсортировать newDistance по возрастанию. Получаем новую текущую вершину (path) = currentDistance[1] и текущий путь до нее (currentDistance) = currentDistance[0].

Шаг 9: newPath = path + current (текущая ячейка).

Шаг 10: получен заполненный словарь путей из стартовой точки.

Шаг 11: выбрать искомый маршрут по ключу конечной точки.

Шаг 11: определить какому маршруту принадлежит очередная пара вершин.

Шаг 12: если индекс начальной точки (lost) > индекса конечной точки (next), копировать эту часть трека. Иначе, идти в обратную сторону трека.

Шаг 13: собрать оптимальный gps-трек, по заданным точкам.

Экспериментальные исследования

В качестве примера рассмотрим один из вариантов построения маршрута, где начальная точка – гора Тамара с координатами 55.952562 и 92.857231, находящаяся на маршруте «Здоровье», а конечная точка – 2-я Торгашинская видовка с координатами 55.919239 и 92.889939, находящаяся на маршруте «Болгаш». Рассмотрим визуализацию маршрута на рис. 2 (отображен розовым цветом).



Рис. 2. Визуализация построенного маршрута

Fig. 2. Visualization of the constructed route

На рис. 2 С.Ш. – северная широта, а В.Д. – восточная долгота. Наблюдаем 13 маршрутов разных цветов, расшифруем слева направо: красный – Тропа «Здоровье», фиолетовый – Тропа «Лыжная», зеленый – тропа «Мокрый лог», розовый – построенный маршрут по указанным точкам, оранжевый – тропа «Рыжая», зеленый – тропа «Синильга», желтый – тропа «Сквозная», синий – тропа «Сивая», фиолетовый – тропа «Топ», оранжевый – тропа «Болгаш», коричневый – тропа Спелеологов, фиолетовый – тропа «Кузнецово», синий – тропа «Сказка».

Помимо визуализации, алгоритм построения туристических маршрутов вычисляет длину нового маршрута, максимальную и минимальную высоту на протяжении всего трека и время построения. Таким образом, по построенному маршруту получено: длина маршрута = 10676 м, максимальная высота = 584,53 и минимальная высота = 179,76. На текущий момент в программной системе имеется 38 различных объектов Торгашинского хребта, что охватывает более 95 % точек посещения туристами. При этом алгоритм (система) допускает ввод собственных координат, которые учитываются при построении маршрутов. В таблице приведены характеристики некоторых построенных маршрутов.

	Время построения, с	Расстояние, м	Перепад высот, м
От г. Тамара до 2-й Торгашинской	0,005457	10 676	404,77
видовки			
От ск. Сивые до Черной сопки	0,005655	21 642	376,68
От г. Синильга до г. Луч	0,004734	10 555	404,77
От СНТ «Загорье-1» до пещ. Мокрая	0,005604	6 371	381,67
От ск. Пропасть до ск. Красный гребень	0,013433	4 188	229,81
От ск. Магда до СНТ «Загорье-2»	0,003422	9 849	266,07

Примеры построенных маршрутов и их характеристики

Заключение

В результате работы разработан алгоритм построения кратчайшего маршрута от начальной до конечной точки, основанный на алгоритме Дейкстры, позволяющий получить оптимальный gpxтрек, а также имеющий базу существующих маршрутов. Алгоритм применяется в программной системе, реализованной в виде web-сайта и мобильного приложения, который позволяет туристам построить удобные маршруты для посещения Торгашинского хребта. В системе имеется 38 туристических объектов, и построение любого маршрута занимает в среднем 15 мс.

Библиографические ссылки

1. Крутько Д. А. Проблема автоматизации построения схем маршрутов пешего туризма в горных массивах Красноярского края // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. Красноярск, 2021. Т. 2. С. 260–262.

2. Иванова К. А., Маликова О. В. Технология комплексной обработки геопространственных данных для мониторинга последствий чрезвычайных ситуаций // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : материалы II Междунар. науч. конф. (22–25 сентября 2015, г. Красноярск) / науч. ред. Е. А. Ваганов ; отв. ред. М. В. Носков. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2015. С. 62–65.

3. Агафонов А. А., Максимов А. И., Бородинов А. А. Исследование эффективности вычисления надежного кратчайшего пути с использованием GPU // VI Междунар. конф. и молодёжная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2020), 2020. С. 1–7.

4. Агафонов А. А., Мясников В. В. Метод определения надежного кратчайшего пути в стохастической сети с использованием параметрически заданных устойчивых распределений вероятностей // СПИИРАН. 2020. Т. 3, вып. 18. С. 558–582.

5. Федоров А. А., Сошилов И. В., Логинов В. Н. Эвристические алгоритмы поиска маршрутов передачи данных в спутниковых системах и их валидация // ТРУДЫ МФТИ. 2020. Т. 12, № 3. С. 1–9.

6. Рамзаев В. М., Хаймович И. Н., Мартынов И. В. Методы поиска кратчайших путей на графах в организационно-экономических системах и их реализация // V Междунар. конф. и молодёжная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2019), 2019. С. 1–8.

7. Стыценко Ф. В., Сайгин И. А., Барталев С. А. Исследование возможностей многолетнего мониторинга состояния поврежденных пожарами лесов на основе спутниковых данных // Ин-

формационные технологии в дистанционном зондировании Земли – RORSE 2018. ИКИ РАН, 2019. С. 185–190. Doi: 10.21046/rorse2018.185.

8. Миклашевич Т. С., Барталев С. А., Плотников Д. Е. Интерполяционный алгоритм восстановления длинных временных рядов данных спутниковых наблюдений растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 1–10.

9. Zhen B., Noon C. Shortest Path Algorithms: An Evaluation using Real Road Networks Transportation Science. 1998. P. 1–10.

10. Algorithm to find tourism place shortest route: a systematic literature review / E. Madyatmadja, H. Nindito, R. Bhaskoro et. al. // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2021. Vol. 99, No. 4. P. 1–10.

11. Fitriansyah A., Parwati N., Wardhani D., Kustian N. Dijkstra's Algorithm to Find Shortest Path of Tourist Destination in Bali ICASMI, 2018.

12. Базовые алгоритмы нахождения кратчайших путей во взвешенных графах [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/post/119158/.

13. Алгоритм Левита – алгоритмы поиска на графах [Электронный ресурс]. URL: https://amp.ww.google-info.org/3957083/1/algoritm-levita.html.

14. A Study on Different Algorithms for Shortest Route Problem / Dr. Roopa, R. Apoorva, H. Srinivasu, M. Viswanatah // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2013. Vol. 2, Iss. 9. P. 1–13.

15. Крутько Д. А. Проблема поиска кратчайшего пути в трехмерном пространстве на территории Торгашинского хребта // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. Красноярск, 2022.

16. xml.dom.minidom – Minimal DOM implementation [Электронный ресурс]. URL: https:// docs.python.org/3/library/xml.dom.minidom.html.

17. Вычисление расстояния и начального азимута между двумя точками на сфере [Электронный pecypc]. URL: https://gis-lab.info/qa/great-circles.html.

References

1. Krutko D. A. [The problem of automating the construction of hiking route schemes in the mountains of the Krasnoyarsk Territory]. *Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference "Actual Problems of Aviation and Cosmonautics"*. Krasnoyarsk, 2021, Vol. 2, P. 260–262 (In Russ.).

2. Ivanova K. A., Malikova O. V. [Technology of integrated processing of geospatial data for monitoring the consequences of emergency situations]. *Regional problems of remote sensing of the Earth: materials of the II Intern. scientific conference*. September 22–25, 2015. Krasnoyarsk, Sib. feder. un-t Publ., 2015, P. 62–65 (In Russ.).

3. Agafonov A. A., Maksimov A. I., Borodinov A. A. [Study of the efficiency of calculating a reliable shortest path using GPU]. *VI International Conference and Youth School "Information Technologies and Nanotechnologies" (ITNT-2020).* 2020, P. 1–7 (In Russ.).

4. Agafonov A. A., Myasnikov V. V. [A method for determining a reliable shortest path in a stochastic network using parametrically specified stable probability distributions]. *SPIIRAN*. 2020. Vol. 3, Iss. 18, P. 558–582 (In Russ.).

5. Fedorov A. A., Soshilov I. V., Loginov V. N. [Heuristic algorithms for searching for data transmission routes in satellite systems and their validation]. *Proceedings OF MIPT*. 2020, Vol. 12, No. 3, P. 1–9 (In Russ.).

6. Ramzaev V. M., Khaimovich I. N., Martynov I. V. [Methods for finding shortest paths on graphs in organizational and economic systems and their implementation]. *V International Conference and Youth School "Information Technologies and Nanotechnologies" (ITNT-2019).* 2019, P. 1–8 (In Russ.).
7. Stytsenko F. V., Saigin I. A., Bartalev S. A. [Study of the possibilities of long-term monitoring of the state of forests damaged by fires based on satellite data]. *Information technologies in remote sensing of the Earth. RORSE 2018.* IKI RAS, 2019, P. 185–190. Doi: 10.21046/rorse2018.185.

8. Miklashevich T. S., Bartalev S. A., Plotnikov D. E. [Interpolation algorithm for restoring long time series of satellite observations of vegetation cover]. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2019, Vol. 16, P. 1–10 (In Russ.).

9. Zhen B., Noon C. Shortest Path Algorithms: An Evaluation using Real Road Networks Transportation Science, 1998, P. 1–10,

10. Madyatmadja E., Nindito H., Bhaskoro R. et. al. Algorithm to find tourism place shortest route: a systematic literature review. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2021. Vol. 99, No. 4, P. 1–10.

11. Fitriansyah A., Parwati N., Wardhani D., Kustian N. Dijkstra's Algorithm to Find Shortest Path of Tourist Destination in Bali ICASMI, 2018.

12. Basic algorithms for finding shortest paths in weighted graphs. Available at: https://habr. com/ru/post/119158/.

13. Levit's algorithm – search algorithms on graphs. Available at: https://amp.ww.google-info.org/ 3957083/1/algoritm-levita.html.

14. Roopa Dr., Apoorva R., Srinivasu H., Viswanatah M. A Study on Different Algorithms for Shortest Route Problem International. *Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2013, Vol. 2, Iss. 9, P. 1–13.

15. Krutko D. A. [The problem of finding the shortest path in three-dimensional space on the territory of the Torgashinsky ridge]. *Materials of the VIII International Scientific and Practical Conference "Actual problems of aviation and cosmonautics"*. Krasnoyarsk, 2022 (In Russ.).

16. xml.dom.minidom – Minimal DOM implementation. Available at: https://docs.python.org/3/library/xml.dom.minidom.html.

17. Calculation of the distance and initial azimuth between two points on the sphere. Available at: https://gis-lab.info/qa/great-circles.html.

© Крутько Д. А., Калашников А. С., Буряченко В. В., 2022

Крутько Диана Андреевна – студентка группы БПИ18-01; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: krutko.d00@gmail.com.

Калашников Алексей Сергеевич – студент группы А17-02; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: fangy.ko@gmail.com.

Буряченко Владимир Викторович – кандидат технических наук, доцент; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: buryachenko@sibsau.ru.

Krutko Diana Andreevna – student of the BPI18-01 group; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: krutko.d00@gmail.com.

Kalashnikov Aleksey Sergeevich – student of group A17-02; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: fangy.ko@gmail.com.

Buryachenko Vladimir Viktorovich – Cand. Sc., Associate Professor; Reshetnev Siberian State University of Science a Technology. E-mail: buryachenko@sibsau.ru.

УДК 621.391 Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-177-188

Для цитирования: Моделирование алгоритмов уменьшения пик-фактора OFDM сигналов и реализация наилучшего метода для канала с замираниями / П. В. Луферчик, А. Н. Конев, Е. В. Богатырев, Р. Г. Галеев // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 2. С. 177–188. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-177-188. For citation: Luferchik P. V., Konev A. N., Bogatyrev E. V., Galeev R. G. [Simulation of algorithms for reducing the peak factor of OFDM signals and implementation of the best method for fading channgel]. Siberian Aerospace Journal. 2022, Vol. 23, No. 2, P. 177–188. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-177-188.

Моделирование алгоритмов уменьшения пик-фактора OFDM сигналов и реализация наилучшего метода для канала с замираниями

П. В. Луферчик^{*}, А. Н. Конев, Е. В. Богатырев, Р. Г. Галеев

АО «Научно-производственное предприятие «Радиосвязь» Российская Федерация, 660021, г. Красноярск, ул. Декабристов, 19 *E-mail: Luferchikp@gmail.com

Реализация эффективных систем связи с высокими скоростями передачи данных требует применения сигналов с высоким порядком модуляции. Современные тенденции развития систем связи направлены на применение ортогонального частотного мультиплексирования сигналов (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing), позволяющего гибко менять скорость передачи данных, уменьшить частотный ресурс за счет улучшения спектральной эффективности, а также бороться с частотно-селективными замираниями и селективными помехами. Однако цена такого решения также велика. Высокий пик-фактор (PAPR) OFDM сигналов накладывает требование к линейности аналогового тракта, существенно уменьшая КПД выходных усилителей передатчика и приемника, увеличивая габариты и электропотребление системы связи в целом.

В данной статье представлено краткое описание современных алгоритмов уменьшения пикфактора OFDM сигналов, таких как Amplitude Clipping and Filtering (ACF), Peak Shrinking and Interpolation (PSI), Peak Cancelation Crest-Factor Reduction (PC-CFR), Partial Transmit Sequence (PTS), Discrete Fourier Transform spread OFDM (DFT-s-OFDM), Active Constellation Extension (ACE), Tone Reservation (TR). Представлены результаты моделирования наиболее перспективных алгоритмов понижения пик-фактора для модуляций QPSK, QAM16, QAM64, QAM128 и QAM256 в составе OFDM сигнала. Разработан и промоделирован метод комбинации наиболее подходящих алгоритмов уменьшения пик-фактора. Приведена структурная схема метода, характеристики структурных блоков системы; описана реализация схемы алгоритма в программной среде Simulink.

Практическая новизна работы заключается в возможности использования разработанного метода уменьшения пик-фактора в системах со сложными каналами связи, таких как системы тропосферной и ближнепольной магнитной связи, где наблюдается значительное влияние селективных помех, межсимвольной интерференции, частотно-селективных замираний. Также результаты данной работы позволят ориентироваться в большом количестве алгоритмов уменьшения пик-фактора OFDM сигналов и применить нужный алгоритм в конкретной задаче.

Ключевые слова: пик-фактор, мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов, межсимвольная интерференция, цифровая обработка сигналов, канал с замираниями, тропосферная связь, ближнепольная магнитная связь.

Simulation of algorithms for reducing the peak factor of OFDM signals and implementation of the best method for fading channgel

P. V. Luferchik^{*}, A. N. Konev, E. V. Bogatyrev, R. G. Galeev

JSC "Scientific and Production Enterprise "Radiosvyaz" 19, Dekabristov St., Krasnoyarsk, 660021, Russian Federation *E-mail: Luferchikp@gmail.com

The implementation of efficient communication systems with high data transfer rates requires the usage of signals with a high modulation order. Current trends in the development of communication systems are aimed at orthogonal frequency multiplexing of signals (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing) usage, which allows you to flexibly change the data transfer rate, to reduce the frequency resource by improving spectral efficiency, as well as to combat frequency-selective fading and selective interference. However, the price of such a solution is also high. The high peak-to-average power ratio (PAPR) OFDM signals imposes a requirement for the linearity of the analogical path, significantly reducing the efficiency of the transmitter and receiver output amplifiers, increasing the dimensions and power consumption of the communication system as a whole.

The practical novelty of the work lies in the possibility of using the developed method for reducing the PAPR factor in systems with complex communication channels, such as troposcatter and near-field magnetic induction communication systems, where significant effect of selective interference, intersymbol interference, and frequency-selective fading is present. The results of this work give the opportunity to navigate a large number of algorithms for reducing the peak factor of OFDM signals and apply the desired algorithm in a specific task.

Keywords: peak-to-average power ratio, orthogonal frequency division multiplexing, intersymbol interference, digital signal processing, fading channel, tropospheric communication, near-field magnetic communication.

Введение

Передача данных со многими поднесущими в форме мультиплексирования с ортогональным частотным разделением широко признана как одна из перспективных схем доступа для использования в разрабатываемых системах беспроводной связи [1]. Этот режим передачи данных используется в наземном телевизионном вещании, в системах связи поколения 4G и 5G и др. [2] Принцип работы OFDM заключается в том, чтобы высокоскоростная передача данных разбивалась на множество потоков передачи данных с меньшими скоростями. Далее эти потоки параллельно поступают на ортогональные подканалы. На каждом подканале может быть независимо расположен свой тип модулятора: BPSK, QPSK, QAM и т. д. [3]. Такая универсальность позволяет гибко задавать скорость передачи данных, эффективно бороться с селективными замираниями и помехами [4–7].

РАРК зависит от числа поднесущих у рассматриваемого сигнала, а также от модуляции. Количество поднесущих определяется предполагаемым радиоканалом, в котором будет использоваться система связи. Для каналов с сильным влиянием селективных замираний и значительной межсимвольной интерференцией, оптимальное число поднесущих начинается от 2048. OFDM символ с N = 2048 использующихся поднесущих будет иметь максимально возможный РАРК для QPSK равный 10*log10(N) = 33,3 дБ, а для QAM-256 10*log10(2.6*N) = 37,3 дБ [8].

Определение РАРR. Пусть Р – вектор, содержащий мощности всех отсчетов некоторого OFDM символа, [BT], Pav = sum(P)/length(P) – средняя мощность данного OFDM символа, [BT]. Тогда пик-фактор рассматриваемого OFDM символа

$$PAPR = 10 \log\left(\frac{\max\{P\}}{Pav}\right) [\pi \mathsf{B}],\tag{1}$$

где max {P} – функция, определяющая наибольшее значение среди вектора значений P.

Под эффективностью или производительностью алгоритмов снижения PAPR далее будем подразумевать то, как сильно алгоритм снижает PAPR OFDM символа после обработки. Например, алгоритм, который снижает PAPR на 3 дБ (при прочих равных) более эффективен (производителен), чем тот, что снижает его на 1 дБ.

В зарубежной и отечественной литературе имеется множество алгоритмов уменьшения пикфактора OFDM сигналов, позволяющих ослабить требования к аналоговому тракту передачи и приема. Были проанализированы следующие алгоритмы: Peak Cancelation Crest-Factor Reduction (PC-CFR), Partial Transmit Sequence (PTS), Selected Mapping (SLM), Discrete Fourier Transform spread OFDM (DFT-s-OFDM), Active Constellation Extension (ACE), Tone Reservation (TR).

Алгоритмы прямого ограничения сигнала

Алгоритмы прямого ограничения сигнала [9; 10] (Peak Shrinking and Interpolation (PSI), Peak Cancelation Crest-Factor Reduction (PC-CFR), Amplitude Clipping and Filtering) ограничивают сигнал по определенному уровню, нивелируя последствия данной операции. Они дают средний результат снижения PAPR. Это достигается ценой значительного ухудшения битовой ошибки всей системы связи в целом. Появляется внеполосное излучение, которое приходится уменьшать путем дополнительной фильтрации, что добавляет к сложности реализации данного алгоритма.

Алгоритм Partial Transmit Sequence

Алгоритм Partial Transmit Sequence (PTS) разделяет входной OFDM блок на W подблоков, над которыми производится W раздельных операций ОБПФ (обратное быстрое преобразование Фурье), результаты умножаются на W оптимизационных коэффициентов и суммируются друг с другом.

Коэффициенты $K_1, K_2 \dots K_M$ имеют V разрешенных значений. Данные коэффициенты вычисляются таким образом, чтобы минимизировать PAPR выходного символа. Структурная схема данного метода представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема РТЅ

Далее проводилось моделирование работы алгоритма PTS при разных сочетаниях блоков W и V разрешенных значений коэффициентов. На рис. 2 приведен результат снижения PAPR в зависимости от CCDF (кумулятивная функция распределения). Показано, что при увеличении количества разрешенных значений коэффициентов V растет эффективность работы алгоритма. Увеличение блоков W приводит к несущественному уменьшению пик-фактора. Данный алгоритм требует дополнительной обработки на приемной стороне и дополнительного канала для

Fig. 1. Block diagram of PTS

передачи данных коэффициентов приемнику (log2(W^M-1) бит на OFDM символ. Резюмируя, его производительность низкая, если учитывать вычислительную сложность.

Алгоритм Selected Mapping

Алгоритм Selected Mapping (SLM) [11] схож с РТS. Передатчик создает несколько потенциальных OFDM блоков данных, из которых выбирается блок с наименьшим показателем PAPR. Каждый блок данных X умножается на U различных фазовых последовательностей B, каждая длиной N, B(u) = [bu0, bu1, ..., buN–1]T. К результату применяется ОБПФ, таким образом, получая U OFDM блоков x(1), x(2), ... x(U). В итоге среди них выбирается тот блок, что имеет наименьшее значение максимума. Эффективность снижения PAPR зависит от числа фазовых последовательностей, что также увеличивает число необходимых ОБПФ блоков. Также в классической реализации требуется дополнительный канал данных для передачи приемнику фазовых коэффициентов. Сложность реализации упирается в U ОБПФ блоков.

На рис. 3 показаны результаты работы алгоритма при U = 4 для OFDM символа с потоком данных QAM-256. Видно, что уменьшение PAPR составляет около 2 дБ. Резюмируя, производительность алгоритма низкая, если учитывать вычислительную сложность.



Рис. 2. Результат обработки OFDM сигнала алгоритмом PTS

Fig. 2. Result of OFDM signal processing by the PTS algorithm



Рис. 3. Результат обработки OFDM сигнала алгоритмом SLM

Fig. 3. The result of OFDM signal processing by the SLM algorithm

Алгоритм DFT-spread-OFDM

Подход DFT-spread-OFDM широко используется при передаче сигнала по восходящей линии в стандартах мобильной связи LTE (Long-Term Evolution) и 5G NR (SC-OFDMA) [12]. Принцип работы алгоритма заключается в прекодировании поднесущих с данными при помощи БПФ (быстрое преобразование Фурье) на стороне передатчика до OFDM модуляции. На стороне приемника после OFDM демодуляции блок также декодируется с помощью дополнительной операции ОБПФ. Производительность метода не зависит от модуляции сигнала.

Качество работы алгоритма DFT-spread-OFDM оценивалось на LTE сигнале с модуляцией QAM-4 и полосой 20МГц. На рис. 4 показаны результаты моделирования алгоритма. UL – кривая пик-фактора после алгоритма, DL – сигнал без алгоритма, DL х8 – сигнал с увеличенным разрешением в 8 раз.

На рис. 4 видно, что алгоритм DFT-spread-OFDM уменьшает PAPR на 2,4 дБ. Резюмируя, производительность алгоритма средняя, при низкой вычислительной сложности.



Рис. 4. Результат обработки OFDM сигнала методом DFT-spread-OFDM

Fig. 4. The result of OFDM signal processing by the DFT-spread-OFDM method

Алгоритм Tone Reservation

Алгоритм Tone Reservation (TR) является очень гибким методом. Его производительность сильно зависит от выбранного кернел-блока и числа итераций. В работе [13] подробно описан процесс и подходы проектирования кернел-блока, а также сам алгоритм TR.

На рис. 5 представлена структурная схема алгоритма TR [14], из которой видно, что во входном OFDM блоке х ищется максимальное значение по модулю, а также его позиция (Peak detection), затем производится циклический сдвиг (Circular shifting) хранящегося в памяти кернел-блока (Reference kernel) на соответствующее позиции максимума число отсчетов. Затем ищется оптимальный коэффициент в блоке Scale and phase rotating, который умножается на циклически сдвинутый кернел-блок, получая сигнал C_n . Далее сигнал C_n складывается с входным OFDM сигналом X_n , получая блок у с уменьшенным PAPR относительно X_n .



Рис. 5. Структурная схема алгоритма TR

Fig. 5. Block diagram of the TR algorithm

Преимущества алгоритма TR: экономичен по ресурсам ПЛИС, не искажает сигнал, одинаково эффективен для всех типов модуляции (от QAM-4 до QAM-256) и не требует обратного канала. Недостатки алгоритма TR: снижает потенциально возможную скорость передачи данных, повышает среднюю мощность сигнала, требует от 10 итераций для высокой эффективности, немного ухудшает BER (из-за увеличения средней мощности сигнала). Эффективность работы алгоритма TR оценивалась на сигнале с модуляцией QAM-16. Результат работы алгоритма приведены на рис. 6.

Алгоритм моделировался для 2048 поднесущих с 10 итерациями, где использовался кернелблок из стандарта DVB-T2. Процент TR поднесущих относительно всех полезных поднесущих меньше 5 %, поэтому были рассмотрены кернел-блоки с большим числом TR поднесущих (5, 10 и 20 %) и с разным количеством итераций, как показано на рис. 7.



Тип модуляции на понижение пик-фактора в алгоритме TR не влияет, поэтому аналогичный выигрыш будет для всех созвездий. Видно, что алгоритм может давать снижение PAPR от 3 дБ (5 % 10 итераций) до 5,8 дБ (20 % 100 итераций). Резюмируя, TR имеет хорошую производительность при средней сложности.

Алгоритм Active Constellation Extension

Алгоритм Active Constellation Extension (ACE) использует возможность расширения сигнального созвездия по бокам без искажения передаваемых символов [15]. Очевидно, что с повышением порядка модуляции число символов, которые можно расширить в бок будет сокращаться относительно общего числа символов, что будет сказываться на производительности алгоритма. Так, для QPSK 100 % символов можно расширить вбок, а для QAM-16 только 75 %.

На рис. 8 представлена структурная схема алгоритма ACE, где блоки FFT и IFFT выполняют функцию БПФ и ОБПФ. Блок Clip ограничивает сигнал во временной области по заданному уровню и операция 4x-FFT(БПФ) переносит сигнал обратно в частотную область.

Между полученными после ограничения поднесущими X' и исходными поднесущими X ищется разница в блоке Cclip. Данная разница представляет собой набор комплексных векторов со случайной фазой, далее определяются только те вектора, которые указывают в разрешенном для соответствующей поднесущей (символа) направлении. Это делается с помощью фильтрующей логики, в результате получается сигнал C. Далее сигнал C при помощи 4-х IFFT(ОБПФ) переводится в вектор с. Затем по максимуму амплитуды OFDM блока и проекции вектора с на исходный сигнал x определяется балансирующий коэффициент u, который вместе с с используется при корректировке входного сигнала ($y = x + u^*c$).

Преимущества алгоритма ACE: никак не влияет на скорость передачи данных, не имеет обратного канала, не искажает сигнал. Недостатки алгоритма ACE: эффективность снижается по мере повышения порядка модуляции (от QAM-4 до QAM-256), повышает среднюю мощность сигнала, сложен в аппаратной реализации (требует 3 операции FFT), ухудшает BER (из-за увеличения средней мощности сигнала).



Рис. 8. Структурная схема алгоритма АСЕ

Fig. 8. Block diagram of the ACE algorithm

На рис. 9 показаны результаты работы ACE для 4-QAM OFDM сигнала. После первой итерации (кривая асе x1) PAPR сократился на 4,4 дБ, после второй итерации (кривая асе x2) – еще на 1,2 дБ, а суммарно – на 5,6 дБ. Резюмируя, ACE имеет хорошую производительность при средней сложности.



Рис. 9. Результат обработки OFDM сигнала алгоритмом ACE

Fig. 9. Result of OFDM signal processing by ACE algorithm

Комбинация алгоритмов снижения PAPR

Комбинация нескольких алгоритмов понижения пик-фактора может дать большее понижение пик-фактора, чем каждый алгоритм по отдельности. Так, имеется возможность осуществить комбинацию алгоритмов АСЕ и TR.

Структурная схема блока комбинации алгоритмов снижения PAPR представлена на рис. 10. В предлагаемой реализации на входной сигнал сначала применяется алгоритм ACE, затем TR. На рис. 11 представлена подсистема ACE, на рис. 12 – подсистема PAPR.



Рис. 10. Структурная схема комбинированной системы снижения пик-фактора

Fig. 10. Structural diagram of the combined PAPR reduction system



Рис. 11. Структурная схема подсистемы АСЕ

Fig. 11. Structural diagram of the ACE subsystem



Рис. 12. Структурная схема подсистемы TR Fig. 12. Structural diagram of the TR subsystem

Программная реализация алгоритма АСЕ изображена на рис. 13, программная реализация алгоритма TR – на рис. 14.

```
1
     function [y,Y] = krongold2003(x,X,M,Vclip,Nsym,NsymH, L)
 2
    Nfft = 2048;
 3
    x = x^{*L};
 4
    X = X*L;
    %% SGP-ACE proc.
 5
     for j = 1:Nsym
 6
 7
         if j <= NsymH
             extborder = 2;
 8
 9
         else
10
            if M == 256 || M == 128 || M == 64
11
                 extborder = 4;
12
             elseif M == 16
                 extborder = 2.82;
13
14
             else
15
                extborder = 2;
16
             end
17
         end
        xl = x((j-1)*Nfft*L+1:j*Nfft*L);
18
19
         XL = fftshift(X((j-1)*Nfft*L+1:j*Nfft*L));
20
         $1) Starting with the data symbols in X ...
21
         avp = mean(abs(x1).^2); % Symbol average power
         % 2) Clip
22
         A = sqrt(avp*10^(Vclip/10));% !! Convert clipping level (dB to V)
23
24
         x11 = x1;
25
        x11(abs(x1) > A) = A*exp(1i*angle(x1(abs(x1) > A)));
26
         % 3) Compute the clipped signal portion
27
         cclip = x11-x1;
28
         % 4) FFT
29
         Cclip = fft(cclip)/sqrt(length(cclip));
30
31
         % 5) Keep only extension with acceptable direction
32
         X1 = XL+1*Cclip;
         absRe = abs(real(XL));
33
34
         absIm = abs(imag(XL));
35
         reisext = absRe < abs(real(X1)) & absRe >= extborder & absIm > 0;
36
37
         imisext = absIm < abs(imag(X1)) & absIm >= extborder & absIm > 0;
38
39
         Cre = zeros(Nfft*L,1);
         Cim = zeros(Nfft*L,1);
40
41
         Cre(reisext) = real(Cclip(reisext));
42
         Cim(imisext) = imag(Cclip(imisext));
43
         C = complex(Cre,Cim);
44
45
         c = ifft(C)*sqrt(length(C));
46
47
         % Determine a step size u
48
         % 1') Find max sample
         [E,nmax] = max(abs(x1));
49
50
         % 2') Compute projection of c
         cproj = real(x1.*conj(c))./abs(x1);
51
52
         % 3') Compute approx balancing
53
         u = (E-abs(xl(cproj > 0)))./(cproj(cproj > 0)-cproj(nmax));
         % 4') Find minimum u
54
55
         if isempty(u(u>0))
56
            mu = 1;
57
         else
58
             mu = min(u(u>0));
59
         end
60
         % 6) Compute x[i+1]
         X((j-1)*Nfft*L+1:j*Nfft*L) = XL+mu*C; % For next iteration
61
         x((j-1)*Nfft*L+1:j*Nfft*L) = xl+mu*c; % Output
62
63
     end
64
    Y = X*0.25;
65
    y = x*0.25;
```

Рис. 13. Программная реализация алгоритма АСЕ

Fig. 13. Software implementation of the ACE algorithm



Рис. 14. Программная реализация алгоритма TR



Графики вероятности превышения PAPR показаны на рис. 15 для 10000 OFDM символов для основных модуляций и всех режимов. К данным графикам можно обращаться также при рассмотрении работы алгоритма TR отдельно от ACE.



Рис. 15. Результат снижения пик-фактора алгоритмами ACE и TR: *а* – для QPSK; *б* – 256-QAM сигнала

Fig. 15. The result of reducing the crest factor by the ACE and TR algorithms: a -for QPSK; b - 256-QAM signal

Заключение

В статье приведены основные методы уменьшения пик-фактора OFDM сигналов, пригодные для использования в каналах, подверженных значительному влиянию селективных помех, межсимвольной интерференции, частотно-селективных замираний.

Применение алгоритмов понижения пик-фактора позволяет существенно ослабить требования к линейности усилителя передатчика системы связи. Приведена программная реализация комбинированного метода борьбы в программной среде Simulink, который, в дальнейшем, будет реализован в серийном изделии. Комбинация алгоритмов АСЕ и TR дает возможность уменьшить пик-фактор для OFDM сигналов ~5,5 дБ для BPSK потока данных и ~4,5 дБ для 8-PSK, QAM-16, QAM-64, QAM-128 и QAM-256 потоков данных, тем самым повысить эффективность системы связи в целом.

Библиографические ссылки

1. Технология OFDM / М. Г. Бакулин, В. Б. Крейнделин, А. М. Шлома, А. П. Шумов. М. : Горячая линия – Телеком, 2017. 360 с.

2. Sethy N., Swain S. BER Analysis of MIMI-OFDM system in different fading channel // International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management. 2013. Vol. 2, No. 4. P. 405–409.

3. BER Analysis of Clipping Process in the Forward Link of the OFDM-FDMA Communication System / H. G. Ryu, T. P. Hoa, N. T. Hieu, J. Jianxue // IEEE Transactions of Consumer Electronics. 2004. Vol. 50, No. 4. P. 1058–1064.

4. Umesha G. B., Shanmukha Swamy M. N. Performance of OFDM System for Wireless Communication through Channel Estimation // International Journal of Electronics, Electrical and Computational System. 2017. Vol. 6, No. 1. P. 21–26.

5. Hu M. K., Chen Xihong. New generation Troposcatter Communication Based on OFDM Modulation // Proceedings of the International Conference on Electronic Measurement & Instruments 2009 (ICEMI'09). Beijing (China), 2009. P. 164–167.

6. Wang F. The Application of MIMO-OFDM System. in troposcatter communication // Proceedings of the International Conference on in Microwave and Millimeter Wave Technology, ICMMT 2008. Nanjing (China), 2008.

7. Performnce of OFDM System Under Troposcatter Fading Channels / M. K. Hu, J. Z. Hu Sun, X. H. Chen, Q. Zhang // Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition). 2013. Vol. 43, No. 1. P. 212–216.

8. Ding L. Memory polynomial predistorter based on the indirect learning architecture // Proc. of GLOBECOM. 2002. Vol. 1. P. 967–971.

9. Mehdi Hosseinzadeh Aghdam, Abbas Ali Sharif. PAPR reduction in OFDM systems: An effcient PTS approach based on particle swarm optimization. Department of Computer Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran.

10. Singh M., Patra S. K. Partial transmit sequence optimization using improved harmony search algorithm for PAPR reduction in OFDM // ETRI J. 2017. No. 39 (6). P. 782–793.

11. Lee B. M., Kim Y., R.P.F. Performance analysis of the clipping scheme with SLM technique for PAPR reduction of OFDM signals in fading channels // Wirel. Pers. Commun. 2012. No. 63 (2). P. 331–344.

12. DFT-Spread OFDM with Frequency Domain Reference Symbols / Alphan Şahin, Erdem Bala, Rui Yang, Robert L. Olesen // GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global communications Conference.

13. Filippo Tosato, Magnus Sandell, Makoto Tanahashi. Tone Reservation for PAPR Reduction: an Optimal Approach through Sphere Encoding. IEEE ICC 2016 – Signal Processing for Communications Symposium.

14. Sandeepkumar Vangalaa , Anuradha Sundrub. Adaptive Clipping Active Constellation Extension for PAPR Reduction of OFDM/OQAM System. 6th International Conference On Advances In Computing & Communications, ICACC 2016, 6–8 September 2016, Cochin, India.

15. Gayatri Sanadhya, Jitendra Yadvendra. PAPR Reduction Using PTS, SLM and Cuckoo Search Optimized Companding // 2018 2nd International Conference on Micro-Electronics and Telecommunication Engineering (ICMETE). 2018. P. 168–175.

References

1. Bakulin M. G., Kreyndelin V. B., Shloma A. M., Shumov A. P. Tehnologiya OFDM. Uchebnoye posobiye dlya vuzov [OFDM Technology. Textbook for high educational establishments]. Moscow, Hotline – Telecom Publ., 2017, 360 p.

2. Sethy N., Swain S. BER Analysis of MIMI-OFDM system in different fading channel. International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management. 2013, Vol. 2, No. 4, P. 405–409.

3. Ryu H. G., Hoa T. P., Hieu N. T., Jianxue J. BER Analysis of Clipping Process in the Forward Link of the OFDM-FDMA Communication System. IEEE Transactions of Consumer Electronics. 2004, Vol. 50, No. 4, P. 1058–1064.

4. Umesha G. B., Shanmukha Swamy M. N. Performance of OFDM System for Wireless Communication through Channel Estimation. International Journal of Electronics, Electrical and Computational System. 2017, Vol. 6, No, 1. P. 21–26.

5. Hu M. K., Chen Xihong. New generation Troposcatter Communication Based on OFDM Modulation. In Proceedings of the International Conference on Electronic Measurement & Instruments 2009 (ICEMI'09). Beijing (China), 2009, P. 164–167.

6. Wang F. The Application of MIMO-OFDM System. in troposcatter communication. In Proceedings of the International Conference on in Microwave and Millimeter Wave Technology, ICMMT 2008. Nanjing (China), 2008.

7. Hu M. K., Hu Sun J. Z., Chen X. H., Zhang Q. Performnce of OFDM System Under Troposcatter Fading Channels. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition). 2013. Vol. 43, No. 1. P. 212–216.

8. Ding L. Memory polynomial predistorter based on the indirect learning architecture. Proc. of GLOBECOM. 2002. Vol. 1. P. 967–971.

9. Mehdi Hosseinzadeh Aghdam, Abbas Ali Sharif. PAPR reduction in OFDM systems: An effcient PTS approach based on particle swarm optimization. Department of Computer Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran.

10. Singh M., Patra S. K. Partial transmit sequence optimization using improved harmony search algorithm for PAPR reduction in OFDM. ETRI J. 2017. No. 39 (6). P. 782–793.

11. Lee B. M., Kim Y., R.P.F. Performance analysis of the clipping scheme with SLM technique for PAPR reduction of OFDM signals in fading channels. Wirel. Pers. Commun. 2012. No. 63 (2). P. 331–344.

12. Alphan Şahin, Erdem Bala, Rui Yang, Robert L. Olesen. DFT-Spread OFDM with Frequency Domain Reference Symbols. GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global communications Conference.

13. Filippo Tosato, Magnus Sandell, Makoto Tanahashi. Tone Reservation for PAPR Reduction: an Optimal Approach through Sphere Encoding. IEEE ICC 2016 – Signal Processing for Communications Symposium.

14. Sandeepkumar Vangalaa , Anuradha Sundrub. Adaptive Clipping Active Constellation Extension for PAPR Reduction of OFDM/OQAM System. 6th International Conference On Advances In Computing & Communications, ICACC 2016, 6-8 September 2016, Cochin, India.

15. Gayatri Sanadhya, Jitendra Yadvendra. PAPR Reduction Using PTS, SLM and Cuckoo Search Optimized Companding. 2018 2nd International Conference on Micro-Electronics and Telecommunication Engineering (ICMETE). 2018, P. 168–175.

© Луферчик П. В., Конев А. Н., Богатырев Е. В., Галеев Р. Г., 2022

Луферчик Павел Валерьевич – начальник отдела; АО «НПП «Радиосвязь». E-mail: Luferchikp@gmail.com.

Конев Александр Николаевич – инженер-конструктор 3 категории; АО «НПП «Радиосвязь». Е-mail: FBRLC@ya.ru.

Богатырев Евгений Владимирович – кандидат технических наук, заместитель генерального директора по научно-техническому развитию; АО «НПП «Радиосвязь». Е-mail: info@krtz.su.

Галеев Ринат Гайсеевич – доктор технических наук, генеральный директор; АО «НПП «Радиосвязь». E-mail: info@krtz.su.

Luferchik Pavel Valerievich – Head of the Department; JSC SPE "Radiosvyaz". E-mail: Luferchikp@gmail.com. Konev Aleksandr Nikolayevich – Design Engineer 3rd category; JSC SPE "Radiosvyaz". E-mail: FBRLC @gmail.com

Bogatyrev Evgeny Vladimirovich – Cand. Sc., Deputy General Director for Scientific and Technical Development; JSC SPE "Radiosvyaz". E-mail: info@krtz.su.

Galeev Rinat Gaiseevich - Dr. Sc., General Director; JSC SPE "Radiosvyaz". E-mail: info@krtz.su.

УДК 621.391.01 Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-189-196

Для цитирования: Методы повышения энергетической эффективности OFDM модемов в каналах связи с частотно-селективными замираниями / П. В. Луферчик, А. Н. Конев, Е. В. Богатырев, Р. Г. Галеев // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 2. С. 189–196. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-189-196.

For citation: Luferchik P. V., Konev A. N., Bogatyrev E. V., Galeev R. G. [Methods for improving the energy characteristics of OFDM modems in frequency selective fading communication channels]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 2, P. 189–196. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-189-196.

Методы повышения энергетической эффективности OFDM модемов в каналах связи с частотно-селективными замираниями

П. В. Луферчик^{*}, А. Н. Конев, Е. В. Богатырев, Р. Г. Галеев

АО «Научно-производственное предприятие «Радиосвязь» Российская Федерация, 660021, г. Красноярск, ул. Декабристов, 19 *E-mail: Luferchikp@gmail.com

Известно, что при передаче данных может возникать межсимвольная интерференция, вызванная наличием многолучевого распространения и частотно-селективных замираний в радиоканале, которая может существенно понижать энергетическую эффективность систем связи. Одним из методов борьбы с такими эффектами, актуальным на сегодняшний день, является применение модуляции вида ортогонального частотного мультиплексирования сигналов (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing), позволяющего гибко менять скорость передачи данных, уменьшить частотный ресурс за счет улучшения спектральной эффективности, а также бороться с частотно-селективными замираниями и селективными помехами.

Однако существуют каналы, особенно сильно подверженные влиянию межсимвольной интерференции, такие как, например, тропосферный канал. Также проблема селективных помех особо остро стоит в системах ближнепольной магнитной связи. Для таких каналов само применение OFDM модуляции не является панацеей, актуальной является задача повышения энергетической эффективности OFDM сигнала. В данной работе приведены ключевые особенности режима работы OFDM, позволяющие повысить энергетический потенциал радиолинии в каналах, подверженных межсимвольным искажениям. Представлены результаты моделирования методов понижения пик-фактора и цифровых предыскажений для линеаризации передающего тракта.

Практическая значимость работы состоит в том факте, что применение методов линеризации передающего тракта позволит увеличить максимальную пропускную способность систем связи, в первую очередь, использующих тропосферный, радиорелейный и ближнепольный магнитный канал связи. В настоящее время этот вопрос стоит особо остро, поскольку высокоскоростные тропосферные станции со скоростью передачи данных 50 Мбит/с в России отсутствуют. Увеличение пропускной способности в тропосферной связи позволит обеспечить связью труднодоступные населенные пункты со сложным рельефом местности. Также применение высокоскоростной тропосферной связи является экономически выгодной альтернативой спутниковой связи, поскольку ее применение не требует аренды спутникового канала.

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов, мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов, тропосферный радиоканал, канал с селективными помехами, межсимвольная интерференция, частотно-селективные замирания, многолучевость.

Methods for improving the energy characteristics of OFDM modems in frequency selective fading communication channels

P. V. Luferchik^{*}, A. N. Konev, E. V. Bogatyrev, R. G. Galeev

JSC "Scientific and Production Enterprise "Radiosvyaz" 19, Dekabristov St., Krasnoyarsk, 660021, Russian Federation *E-mail: Luferchikp@gmail.com

It is a fact that during data transmission, inter-symbol interference can occur, caused by the presence of multipath propagation and frequency-selective fading in the radio channel, which can significantly reduce the energy efficiency of communication systems. One of the methods to combat such effects, relevant today, is the use of OFDM modulation (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing), which allows to flexibly change the data rate, reduce the frequency resource by improving the spectral efficiency, and also deal with frequency – selective fading and selective interference.

However, there are channels that are particularly susceptible to inter-symbol interference, such as, for example, the tropospheric channel. Also, the problem of selective interference is particularly acute in near-field magnetic induction communication systems. For such channels, the use of OFDM modulation itself is not a panacea; the task of increasing the energy efficiency of an OFDM signal is an urgent one. This paper presents the key features of the OFDM mode of operation, which make it possible to increase the energy potential of the radio link in channels subject to intersymbol distortion. The results of modeling methods for PAPR reduction and digital predistortion for the linearization of the transmission path are presented.

The practical significance of the work lies in the fact that the use of transmission path linearization methods will increase the maximum bandwidth of communication systems, primarily those using tropospheric, radio relay and near-field magnetic induction communication channels. At present, this issue is particularly acute, since there are no high-speed tropospheric stations with a data transfer rate of 50 Mbps in Russia. Increasing the throughput in tropospheric communication will provide communication to hard-toreach settlements with difficult terrain. Also, the use of high-speed tropospheric communication is a costeffective alternative to satellite communication, since its use does not require the lease of a satellite channel.

Keywords: digital signal processing, orthogonal frequency-division multiplexing, tropospheric radio channel, frequency-selective fading channel, intersymbol interference, frequency-selective fading, multipath

Введение

В каналах, в которых возможно возникновение отраженных, задержанных по времени прихода сигналов, особенно остро стоит борьба с последствиями межсимвольной интерференции, вызванной частотно-селективными замираниями и селективными помехами [1]. Явление многолучевого распространения приводит к флуктуациям амплитуды, фазы, угла прибытия, что, в свою очередь, вызывает искажение формы корелляционного пика сигнала и смещение оценки истинной задержки [2]. Цель данной работы разработать алгоритмы, повышающие энергетическую эффективность связи в таких каналах, повысить устойчивость к частотно-селективным замираниям и увеличить тем самым пропускную способность. Ниже рассмотрим основные особенности, которые позволяют повысить энергетический потенциал в радиоканале с частнотноселективными замираниями.

OFDM

На сегодняшний день, применение OFDM модуляции является актуальным для целого ряда задач, таких как цифровое телевидении и цифровое радиовещании [3]. Данный тип цифровой модуляции применяется в сетях WLAN (IEEE 802.11 Wi-Fi), MAN (LTE, IEEE 802.16 WiMax), и

множестве других приложений [4; 5]. Ключевыми факторами, способствовавшими столь широкому распространению, являются устойчивость в многолучевом радиоканале и сравнительно низкая вычислительная трудоемкость, что, в особенности, проявляется при существенной длительности профиля временного рассеяния (большой задержке вторичных лучей) [6].

ОFDM является системой со многими несущими частотами, ее наиболее часто применяемая структура упрощенно описывается следующим образом, входной поток модулированных символов с символьной скоростью F_s преобразуется из последовательного в N параллельных потоков символов со скоростью F_s / N . Например, в первом потоке символов будут присутствовать 1-й, N+1, 2N+1, 3N+1 и т. д. символы. Таким образом, длительность каждого символа возрастает в N раз и становится равной $T_s \cdot N$. Каждый из N символьных потоков передается на своей несущей частоте. Расстояние между частотами выбирается таким образом, чтобы колебания на данных частотах были ортогональными, в результате чего каждый из символьных потоков передается независимо, потоки не влияют друг на друга. Спектр системы практически не расширяется, так как каждый из потоков имеет ширину спектра в N раз меньшую, чем ширина спектра исходного потока. Один из важнейших недостатков OFDM сигнала – это высокий пикфактор [7].

Пик-фактор OFDM

Пик-фактор (PAPR – peak to average power ratio) зависит от числа поднесущих у рассматриваемого сигнала, а также от модуляции. Так, OFDM символ с N = 2048 использующихся у нас поднесущих будет иметь максимально возможный PAPR[8] для QPSK (quadrature phase-shift keying) равный $10\log(N) = 33,3$ дБ.

Определение PAPR OFDM. Пусть Р – вектор, содержащий мощности всех отсчетов некоторого OFDM символа, [Вт], Раv – средняя мощность данного OFDM символа, [Вт]. Тогда пикфактор рассматриваемого OFDM символа:

$$PAPR = 10 \log\left(\frac{\max(P)}{F_{av}}\right) [\Box \mathbf{B}], \tag{1}$$

где max(*P*) – функция, определяющая наибольшее значение среди вектора значений.

Под эффективностью или производительностью алгоритмов снижения PAPR далее будем подразумевать то, как сильно алгоритм снижает PAPR OFDM символа после обработки. Например, алгоритм, который снижает PAPR на 3 дБ (при прочих равных) более эффективен (производителен), чем тот, что снижает его на 1 дБ.

Ряд алгоритмов понижения пик-фактора были отсеяны на этапе анализа и моделирования обзорных статей [7–10]. Методы понижения пик-фактора, которые применимы для нашей задачи снижение PAPR при больших размерах ОБПФ (обратного быстрого преобразования Фурье), перечислены ниже:

- Peak Cancelation Crest-Factor Reduction (PC-CFR);
- Partial Transmit Sequence (PTS);
- Selected Mapping (SLM);
- Discrete Fourier Transform spread OFDM (DFT-s-OFDM);
- Active Constellation Extension (ACE);
- Tone Reservation (TR).

Наилучших результатов удалось добиться последовательно соединив ACE и TR. Active Constellation Extension (ACE) использует возможность расширения сигнального созвездия по бокам без искажения передаваемых символов. Очевидно, что с повышением порядка модуляции число символов, которые можно расширить в бок будет сокращаться относительно общего числа символов, что будет сказываться на производительности алгоритма. Так, для QPSK 100 % символов можно расширить вбок. В нашей работе используется классический алгоритм [11].

Tone Reservation (TR) является очень гибким методом. Его производительность сильно зависит от выбранного числа итераций [12]. В работе подробно описан процесс и подходы проектирования алгоритма TR[13]. Результаты моделирования методов понижения пик-фактора TR и ACE приведены на рис. 1.



Рис. 1. Результат снижения PAPR в зависимости от CCFD (кумулятивная функция распределения) алгоритмами ACE и TR для OFDM с модуляцией QPSK



Моделирование OFDM размером БПФ 2048 точек с модуляцией QPSK, снижает пик-фактор до 7,2 дБ относительно исходного сигнала с пик фактором 12 дБ с вероятностью 10^{-3} при совместном использовании алгоритмов TR (Tone Reservation) и ACE (Active Constellation Extension). Таким образом, выигрыш от применения алгоритма уменьшения пик-фактора составил 4,8 дБ.

Реализация цифровых предыскажений для линеаризации радиопередающего тракта

Использование системы ввода цифровых предыскажений предполагает наличие в тракте формирования сигналов функционального блока, позволяющего искажать полезный сигнал в соответствии с инверсной передаточной характеристикой радиочастотного тракта [14]. Структурная схема системы ввода предыскажений с обучением представлена на рис. 2.



Рис. 2. Структурная схема системы ввода предыскажений с обучением

Fig. 2. Block diagram of the system for entering pre-orders with training

Адаптация параметров системы ввода предыскажений происходит по сигналу ошибки, который является разностью между сигналом на выходе блока ввода предыскажений в прямом канале и сигнала на выходе обучающегося фильтра в обратном канале [15]. Коэффициенты системы ввода предыскажений постоянно подстраиваются (рекурсивный алгоритм) при сравнении двух сигналов с выхода блока ввода предыскажений и выхода обучающегося фильтра [16]. Основными алгоритмами адаптации для систем с обучением являются:

- метод наименьших квадратов (LMS);

- нормализованный метод наименьших квадратов (NLMS);

- рекурсивный метод наименьших квадратов (RLS);

- рекурсивный метод прогноза ошибки (RPEM).

Для оценки алгоритмов цифровых предыскажений в среде matlab/simulink была paspaботана модель для методов LMS, NLMS, RLS, RPEM и модель усилителя мощности с реальными характеристиками. Параметры модели усилителя мощности:

- диапазон частот - 4,4-5 ГГц;

максимальная излучаемая мощность – 100 Вт;

- интермодуляционные искажения третьего порядка - минус 27 дБ.

По результатам моделирования алгоритмов был выбран RLS. Кроме того, в рамках данной работы был разработан модифицированный вариант алгоритма адаптации на основе рекурсивного метода наименьших квадратов (RLSm). Основным результатом модификации стало:

 – уменьшение количества арифметических операций, необходимых для выполнения одной итерации (более чем в 5 раз);

повышение стабильности алгоритмов адаптации за счёт введения методов регуляризации;

 – уменьшение времени сходимости за счёт введения экспоненциальной зависимости фактора «забывания».

Разработанная модель позволила оценить спектральные характеристики сигналов (ACPR), скорость сходимости алгоритмов и модуль вектора ошибки (EVM) относительно входного сигнала.

Данная модель в matlab/simulink позволила получить результаты в автоматическом режиме для всех разработанных алгоритмов, частот излучения усилителя мощности и излучаемой мощности. На рис. 3 представлен спектр сигнала на выходе модели для полосы 28 МГц и частоты несущего сигнала 5 ГГц.



Рис. 3. Спектр сигнала на выходе модели до и после алгоритмов предыскажений

Fig. 3. The signal spectrum at the model output before and after the pre-detection algorithms

Как видно из рис. 3, использование предыскажений позволяет существенно снизить уровень нелинейных искажений (уровень помехи в соседнем канале снизился на 10 дБ). Использование предыскажений позволяет снизить величину модуля вектора ошибки (EVM) на 13,5 дБ, а также существенно увеличить соотношение модуляция/ошибка (MER) на 13,6 дБ.

Заключение

В результате анализа и моделирования были выработаны методы, позволившие увеличить энергетическую эффективность режима OFDM. Проведено моделирование различных алгоритмов понижения пик-фактора. Реализованы два наилучших алгоритма снижения PAPR наиболее подходящих для применения в канале с замираниями из-за использования большого количества поднесущих OFDM, а именно Active Constellation Extension (ACE) и Tone Reservation (TR), которые используются каскадно и позволяют уменьшить пик-фактор на 4,8 дБ. Для увеличения линейности передающего тракта был выбран и модернизирован алгоритм ввода цифровых предыскажений RLSm, он позволил снизить величину модуля вектора ошибки (EVM) на 13,5 дБ, а также увеличить соотношение модуляция/ошибка (MER) на 13,6 дБ. Полученные результаты позволят значительно повысить энергетическую эффективность режима OFDM, приведут к устойчивой связи в нестационарном канале, подверженном межсимвольной интерференции, и увеличению пропускной способности.

Библиографические ссылки

1. R. Gustafsson. Combating Intersymbol Interference and Cochannel Interference in Wireless Communication Systems. Blekinge Institute of Technology, 2003.

2. ITU-R P.1407-8. Multipath propagation and parameterization of its characteristics. International Telecommunication Union, 2021.

3. G. B. Umesha, M. N. Shanmukha Swamy, "Performance of OFDM System for Wireless Communication through Channel Estimation", International Journal of Electronics // Electrical and Computational System. 2017. Vol. 6, No. 1. P. 21–26.

4. Rahman M., Das S., Fitzek F. Ofdm based wlan systems. Center for TeleInFrastruktur (CTiF), Technical report R-04- 1002, 2005.

5. Songchar Jiang, White Lin and Shao-kuang Tsou. Performance evaluation and improvement of the OFDM-based Wireless Metropolitan Area Networks // 2007 Asia-Pacific Conference on Communications. 2007. P. 137–140. Doi: 10.1109/APCC.2007.4433522.

6. Wang F. The application of MIMO-OFDM system in troposcatter communication // 2008 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. 2008. P. 1957–1959. Doi: 10.1109/ICMMT.2008.4540872.

7. Mehdi Hosseinzadeh Aghdam, Abbas Ali Sharif. PAPR reduction in OFDM systems: An effcient PTS approach based on particle swarm optimization. Department of Computer Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran.

8. Krongold B. S., Jones, D. L. Par reduction in ofdm via active constellation extension // IEEE Transactions on Broadcasting. 2003. No. 49(3). P. 258–268. Doi: 10.1109/TBC.2003.817088 (https://doi.org/10.1109/TBC.2003.817088).

9. Singh M., Patra S. K. Partial transmit sequence optimization using improved harmony search algorithm for PAPR reduction // OFDM, ETRI J. 2017. No. 39 (6). P. 782–793.

10. Lee B. M., Kim Y., R.P.F. Performance analysis of the clipping scheme with SLM technique for PAPR reduction of OFDM signals in fading channels // Wirel. Pers. Commun. 2012. No. 63 (2). P. 331–344.

11. Tellado J. Multicarrier Modulation with Low PAR. The International Series in Engineering and Computer Science. 2002. Doi:10.1007/b117134 (https://doi.org/10.1007/b117134).

12. Seung Hee Han, Jae Hong Lee. Modulation, coding and signal processing for wireless communications – An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission // IEEE Wireless Communications. 2005. No. 12(2). P. 56–65. Doi: 10.1109/MWC.2005. 1421929 (https://doi.org/10.1109/MWC.2005.1421929).

13. A generalized memory polynomical model for digital predistortion of RF power amplifiers / D. Morgan, Ma, Kim, Zierdt, Pastalan // IEEE Trans. Sig. Proc. 2006. Dol. 54. P. 3852–3860.

14. Кащенко И. Е. Метод линеаризации декаметрового радиопередающего тракта на основе таблиц компенсации нелинейных искажений // Техника радиосвязи. 2015. № 1 (24). С. 78–85.

15. Gan L. Adaptive digital predistortion of nonlinear systems // Ph.D. Thesis, Faculty of Electrical and Information Engineering, Graz University of Technology, Graz, Austria. 2009.

16. Ding L. A least square/Newton method for digital predistortion of wideband signals / L. Ding, Z. Ma, D. R. Morgan et al. // IEEE Trans. on Communications. 2006. Vol. 54, No. 5. P. 833–840.

References

1. Gustafsson R. Combating Intersymbol Interference and Cochannel Interference in Wireless Communication Systems. Blekinge Institute of Technology, 2003.

2. ITU-R P.1407-8. Multipath propagation and parameterization of its characteristics. International Telecommunication Union, 2021.

3. Umesha G. B., Shanmukha Swamy M. N. "Performance of OFDM System for Wireless Communication through Channel Estimation" // International Journal of Electronics, Electrical and Computational System. 2017. Vol. 6, No. 1. P. 21–26.

4. Rahman M., Das S., Fitzek F. Ofdm based wlan systems, Center for TeleInFrastruktur (CTiF), Technical report R-04- 1002, 2005.

5. Songchar Jiang, White Lin and Shao-kuang Tsou. Performance evaluation and improvement of the OFDM-based Wireless Metropolitan Area Networks. 2007 Asia-Pacific Conference on Communications. 2007, P. 137–140. Doi: 10.1109/APCC.2007.4433522.

6. Wang F. The application of MIMO-OFDM system in troposcatter communication. 2008 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. 2008, P. 1957–1959. Doi: 10.1109/ICMMT.2008.4540872.

7. Mehdi Hosseinzadeh Aghdam, Abbas Ali Sharif. PAPR reduction in OFDM systems: An effcient PTS approach based on particle swarm optimization. Department of Computer Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran.

8. Krongold B. S., Jones, D. L. Par reduction in ofdm via active constellation extension. *IEEE Transactions on Broadcasting*. 2003, No. 49(3), P. 258–268. Doi:10.1109/TBC.2003.817088 (https://doi.org/10.1109/TBC.2003.817088).

9. Singh M., Patra S. K. Partial transmit sequence optimization using improved harmony search algorithm for PAPR reduction. *OFDM, ETRI J.* 2017, No. 39 (6), P. 782–793.

10. Lee B. M., Kim Y., R. P. F, Performance analysis of the clipping scheme with SLM technique for PAPR reduction of OFDM signals in fading channels. *Wirel. Pers. Commun.* 2012, No. 63 (2), P. 331–344.

11. Tellado J. Multicarrier Modulation with Low PAR. The International Series in Engineering and Computer Science. 2002. Doi:10.1007/b117134 (https://doi.org/10.1007/b117134).

12. Seung Hee Han, Jae Hong Lee. Modulation, coding and signal processing for wireless communications – An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission. *IEEE Wireless Communications*. 2005, No. 12(2), P. 56–65. Doi: 10.1109/MWC.2005.1421929 (https://doi.org/10.1109/MWC.2005.1421929).

13. Morgan D. Ma, Kim, Zierdt, Pastalan. A generalized memory polynomical model for digital predistortion of RF power amplifiers. *IEEE Trans. Sig. Proc.* 2006, Vol. 54, P. 3852–3860.

14. Kashchenko I. E. [Linearization method for a decameter radio transmission path based on nonlinear distortion compensation tables]. *Tekhnika radiosvyazi*. 2015, No. 1 (24), P. 78–85 (In Russ.).

15. Gan L. Adaptive digital predistortion of nonlinear systems. Ph.D. Thesis, Faculty of Electrical and Information Engineering, Graz University of Technology, Graz, Austria. 2009.

16. Ding L., Ma Z., Morgan D. R., Zierdt M., Pastalan J. A least square/Newton method for digital predistortion of wideband signals. *IEEE Trans. on Communications*. 2006, Vol. 54, No. 5, P. 833–840.

🚾 Луферчик П. В., Конев А. Н., Богатырев Е. В., Галеев Р. Г., 2022

Луферчик Павел Валерьевич – начальник отдела; АО «НПП «Радиосвязь». E-mail: Luferchikp@gmail.com.

Конев Александр Николаевич – инженер-конструктор 3 категории; АО «НПП «Радиосвязь». Е-mail: FBRLC@ya.ru.

Богатырев Евгений Владимирович – кандидат технических наук, заместитель генерального директора по научно-техническому развитию; АО «НПП «Радиосвязь». E-mail: info@krtz.su.

Галеев Ринат Гайсеевич – доктор технических наук, генеральный директор; АО «НПП «Радиосвязь». E-mail: info@krtz.su.

Luferchik Pavel Valerievich – Head of the Department; JSC SPE "Radiosvyaz". E-mail: Luferchikp@gmail.com. Konev Aleksandr Nikolayevich – Design Engineer 3rd category; JSC SPE "Radiosvyaz". E-mail: FBRLC @gmail.com.

Bogatyrev Evgeny Vladimirovich – Cand. Sc., Deputy General Director for Scientific and Technical Development; JSC SPE "Radiosvyaz". E-mail: info@krtz.su.

Galeev Rinat Gaiseevich – Dr. Sc., General Director; JSC SPE "Radiosvyaz". E-mail: info@krtz.su.

УДК 629.78 Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-197-208

Для цитирования: Разработка методики тестирования сетевых коммутаторов SpaceWire / A. C. Максютин, Д. С. Казайкин, Д. В. Дымов, Д. В. Ивленков // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 2. C. 197-208. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-197-208.

For citation: Maksyutin A. S., Kazaykin D. S., Dymov D. V., Ivlenkov D. V. [Development of a methodology for testing SpaceWire network switches]. Siberian Aerospace Journal. 2022, Vol. 23, No. 2, P. 197-208. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-197-208.

Разработка методики тестирования сетевых коммутаторов SpaceWire

А. С. Максютин^{1, 2*}, Д. С. Казайкин¹, Д. В. Дымов¹, Д. В. Ивленков¹

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 работе представлены основные пункты разработанной методики тестирования сетевых коммутаторов SpaceWire. Обозначены главные цели тестирования данного оборудования. Приведена структурная схема рабочего места, а также список оборудования с его кратким описанием для проведения тестов. Для проведения тестов было разработано специальное программное обеспечение, реализованное в виде консольного пользовательского приложения. В методике подробно описывается каждый шаг работы с данным приложением. В рамках данной статьи описываются алгоритмы, которые реализуются при работе с приложением. Эти алгоритмы представлены в виде блок-схем, а также текстового описания. Среди алгоритмов выделены две группы: базовые и расширенные. Для первой группы можно выделить базовый тест для проверки принципа удаления заголовка в соответствии с путевой адресацией; нагрузочный тест для проверки корректной работы коммутатора при высокой загрузке коммутирующей матрицы, а также проверки удаления поступающих пакетов, не содержащих в своем заголовке адреса для отправки на один из портов коммутатора; тест исключительной ситуации для проверки корректности работы коммутатора при высокой загрузке приемного буфера поступающими данными. Для второй группы можно выделить тест таблицы маршрутизации для проверки корректности обработки коммутатором строк, записанных в таблицу маршрутизации; тест широковещания для проверки возможности коммутатора отправлять один пакет данных с нескольких портов одновременно; тест групповой адаптивной маршрутизации для проверки возможности коммутатора при выборе множества портов для передачи данных отправлять их с порта, имеющего наивысший приоритет. Все обозначенные алгоритмы были опробованы радиационно-стойкой отказоустойчивой сверхбольшой интегральной схемой программируемого мастер-коммутатора 3-го уровня. В заключение обозначены дальнейшие планы по развитию методики.

Ключевые слова: коммутаторы, методики тестирования, алгоритмы тестирования, SpaceWire.

Development of a methodology for testing SpaceWire network switches

A. S. Maksyutin^{1, 2*}, D. S. Kazaykin¹, D. V. Dymov¹, D. V. Ivlenkov¹

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

The paper presents the main points of the developed methodology for testing SpaceWire network switches. The main objectives of testing this equipment are outlined. A block diagram of the workplace is provided, as well as a list of equipment with its brief description for conducting tests. To conduct the tests, special software was developed, implemented in the form of a console user application. The methodology describes in detail each step of working with this application. This article describes the algorithms that are implemented when working with the application. These algorithms are presented in the form of flowcharts, as well as in the form of a text description. Two groups are distinguished among the algorithms: basic and advanced tests. For the first group, we can distinguish: a basic test - to check the principle of removing the header in accordance with the path addressing; a load test - to check the correct operation of the switch at high load of the switching matrix, as well as checking the deletion of incoming packets that do not contain addresses in their header to be sent to one of the switch ports; an exceptional situation test is used to check the correct operation of the switch when the receiving buffer is loaded with incoming data. For the second group, we can distinguish: the routing table test - to check the correctness of the processing by the switch of the rows recorded in the routing table; the broadcast test - to check the ability of the switch to send one data packet from several ports at the same time; the adaptive group routing test - to check the ability of the switch when selecting multiple ports for data transmission to send them from the port having the highest priority. All the indicated algorithms were tested on a radiation-resistant fault-tolerant ultra-large integrated circuit of a programmable master switch of the 3rd level. In conclusion, further plans for the development of the methodology are outlined.

Keywords: switches, testing methods, testing algorithms, SpaceWire.

Введение

Сетевой коммутатор предназначен для объединения различных устройств в единый сегмент сети, позволяя данным устройствам осуществлять информационное взаимодействие. Коммутатор при помощи таблицы маршрутизации определяет, какому именно устройству адресованы данные, и посылает их непосредственно адресату [1].

Коммутаторы активно используются при построении сетевых структур в космической отрасли. В рамках данной статьи рассматриваются коммутаторы на основе сетевой технологии SpaceWire.

SpaceWire – технология обеспечивающая высокоскоростную передачу больших объемов информации, создание единой инфраструктуры высокоскоростной обработки данных для соединения датчиков, элементов системы обработки данных и блоков массовой памяти [2]. В актуальной версии стандарта ECSS-E-ST-50-12C Rev.1 [3] предъявляются требования к коммутаторам SpaceWire, такие как поддержка различных видов адресации, принципа удаления заголовка пакета, червячной маршрутизации и т. д.

Методика тестирования

В связи с предъявляемыми требованиями была разработана методика тестирования сетевых коммутаторов SpaceWire. В рамках разработки данной методики объектом испытаний являлся неблокирующий сетевой 12-портовый коммутатор SpaceWire (объектом также может быть коммутатор SpaceWire с произвольным количеством портов, возможностью задания таблицы маршрутизации, неблокирующей архитектурой).

Целью проведения тестирования является проверка следующих возможностей коммутатора SpaceWire:

 корректность обработки поступающих пакетов в соответствии с принципом удаления заголовка для всех портов;

 отбрасывание коммутатором принимаемых пакетов данных, не содержащих в своем путевом адресе номера порта для отправки на другое устройство, т. е. не уходящих с коммутатора;

 – корректность работы коммутатора при загрузке приёмного буфера в результате отправки на него пакета, создающего очередь;

- запись данных в таблицу маршрутизации [4];

- проверка возможности широковещательной передачи пакетов данных [5];
- проверка поддержки адаптивной групповой маршрутизации (АГМ) [6].

Были использованы технические средства, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Список	обор	улования
CHIEGOR	vvvp.	удования

No	Оборудование	Количество	Описание	
1	ПК	1	Управляющее устройство	
2	Mocr Ethernet- SpaceWire [7]	1	Устройство для связи интерфейсов Ethernet и SpaceWire	
3	12-портовый коммута- тор SpaceWire	1	Тестируемый коммутатор. В испытаниях может использо- ваться коммутатор с другим количеством портов	
4	Адаптер питания моста	1	Адаптер питания (АП-1) на 12 В	
5	Адаптер питания ком- мутатора	1	Адаптер питания (АП-2) на 5 В	
6	Кабель Ethernet	1	Кабель для соединения ПК с мостом	
7	Кабель SpaceWire	2	Кабели для соединения моста с коммутатором	
8	Loopback кабель SpaceWire [8]	10	Кабели, замыкающие порты коммутатора петлей	

Структурная схема данного рабочего места приведена на рис. 1.



Рис 1. Рабочее место тестирования коммутатора SpaceWire

Fig. 1. SpaceWire switch testing workplace

Мост Ethernet-SpaceWire, используемый при создании тестов, является разработкой коллектива ООО НПЦ «МиТ» [9] – отечественной компании, занимающейся производством и разработкой оборудования и ПО для проектирования и тестирования авиационных и космических вычислительных систем на стандартах SpaceWire и SpaceFibre.

Коммутатор SpaceWire, используемый в испытаниях, является радиационно-стойкой отказоустойчивой сверхбольшой интегральной схемой (СБИС) [10] программируемого мастеркоммутатора 3-го уровня [11].

Алгоритмы тестирования

Для тестирования коммутатора было разработано специальное программное обеспечение (СПО). Для взаимодействия оператора с данным СПО используется консольное пользовательское приложение, работа с которым подробно описана в методике тестирования [12]. Работа с приложением может быть разделена на 3 основные части: подготовка к тестированию (без взаимодействия с коммутатором);

- базовое тестирование коммутатора;

- расширенное тестирование коммутатора.

В части подготовки к тестированию описано проведение необходимой конфигурации интерфейсного моста, а также задание требуемых параметров тестирования.

В части базового тестирования коммутатора описываются 3 основных теста для данной методики: базовый тест, нагрузочный тест и тест исключительной ситуации.

Базовый тест предназначен для проверки корректности обработки поступающих пакетов в соответствии с принципом удаления заголовка для всех портов коммутатора (путевая адресация).

С первого порта тестирующего устройства отправляются пакеты с малым объемом данных, в путевом адресе которых содержится соответствующий номер порта коммутатора и номер порта для отправки обратно на мост. После отправки пакетов на каждый порт мост ожидает их возвращения. В случае, если все пакеты были получены, выводится сообщение об успешном прохождении теста. В случае, если пакеты не приходят обратно на тестирующее устройство, то по истечении нескольких секунд будет выведено сообщение о завершении теста с ошибкой.

Блок-схема базового теста коммутатора приведена на рис. 2.



Рис. 2. Блок-схема базового теста коммутатора

Fig. 2. Block diagram of the basic test of the switch

Главной задачей нагрузочного теста является проверка реакции коммутатора на принимаемые пакеты данных, не содержащие в своем путевом адресе номера порта для отправки на другое устройство, т. е. не уходящих с коммутатора. На тестирующем устройстве формируются и отправляются пакеты двух видов. Пакеты первого вида должны отправляться с первого порта тестирующего устройства, успешно проходить по путевым адресам коммутатора и затем приходить обратно на мост, после чего отображаться в приемном буфере. Пакеты второго вида, которые отправляются со второго порта тестирующего устройства, не содержат в своем путевом адресе номер порта коммутатора для возвращения на мост, следовательно, они циркулируют внутри коммутатора до полного прохождения путевой адресации, что приводит к загрузке коммутирующей матрицы [13]. Путевые адреса пакетов каждого вида увеличиваются с каждым вторым пакетом до тех пор, пока не будет достигнуто предельное значение числа пакетов, заданного в конфигурационном файле перед началом тестирования.

Путевые адреса пакетов, поступающих с каждого порта тестирующего устройства, не пересекаются.

Тест считается пройденным, если мост получает все пакеты первого вида. В противном случае выводится сообщение о завершении теста с ошибкой.

Блок-схема нагрузочного теста коммутатора приведена на рис. 3.



Рис. 3. Блок-схема нагрузочного теста коммутатора

Fig. 3. Block diagram of the switch load test

Главной задачей теста исключительной ситуации является проверка работоспособности коммутатора при загрузке его приемного буфера в результате отправки на него пакета, создающего очередь.

На тестирующем устройстве формируется и отправляется пакет данных, содержащий в своем путевом адресе номер порта (физически замкнутого на loopback кабель), повторяющийся 2 или более раза подряд. Такие пакеты отправляются для каждого порта коммутатора. Тест проверяет обработку ситуации, когда порт занят передачей пакета и на него поступают ещё данные, тем самым создавая очередь. Пока порт не освободится, поступающие новые данные помещаются в приёмный буфер коммутатора. Исключительная ситуация достигается, когда приёмный буфер переполняется [14].

Коммутатор должен успешно передавать пакеты данных, если его размер не превышает выделенного размера приемного буфера порта. Длина пакета данных задается в файле перед началом тестирования.

Тест считается пройденным, если мост получает пакеты данных при их предельной длине, заданной в конфигурационном файле перед началом тестирования. В противном случае выводится сообщение о завершении теста с ошибкой.

Блок-схема теста исключительной ситуации приведена на рис. 4.





Fig. 4. Block diagram of the exceptional situation test

Для проведения расширенного тестирования необходима предварительная конфигурация коммутатора, заключающаяся в записи определенных значений в строки таблицы маршрутизации. Области памяти разных коммутаторов организованы по-разному, в связи с чем данная часть СПО может редактироваться. В части расширенного тестирования коммутатора описываются три основных теста для данной методики: тест таблицы маршрутизации, тест широковещания и тест АГМ.

Для коммутатора записываются строки таблицы маршрутизации, соответствующие табл. 2.

Таблица 2

Логический адрес (hex)	Физический порт коммутатора	Примечание
20	1	-
21	2	-
22	3	-
23	4	-
24	5	-
25	6	-
26	7	-
27	8	-
28	9	-
29	10	-
2A	11	-
2B	12	-
2C	1, 2	Широковещательно
2D	3–12	Широковещательно
2E	1, 2	АГМ
2F	3–7	АГМ
30	8–12	АГМ

Строки таблицы маршрутизации

Тест таблицы маршрутизации является полным аналогом базового теста коммутатора. Он также проверяет корректность обработки поступающих пакетов в соответствии с принципом удаления заголовка для всех портов коммутатора, но при этом заголовки пакетов задаются в соответствии со строками, записанными в таблице маршрутизации.

Блок-схема теста таблицы маршрутизации коммутатора приведена на рис. 5.

Главной задачей теста широковещания является проверка способности коммутатора отправлять один пакет данных с нескольких портов одновременно (широковещательно).

На тестирующем устройстве формируется пакет данных с двумя адресами в заголовке: 2d и 2c. Данный пакет после отправки должен достичь коммутатора, затем по первому адресу 2d отправиться на 10 различных портов коммутатора (с 3-го по 12-й). В связи с тем, что эти порты замкнуты на loopback кабели, на коммутатор после этого придет 10 пакетов с адресом 2c в заголовке. Каждый из них отправляется широковещательно в 1-й и 2-й порты коммутатора, которые соединены с тестирующим устройством. Как итог на интерфейсный мост отправляется уже 20 пакетов данных. Если все пакеты были получены, то выводится сообщение об успешном завершении теста, в противном случае выводится сообщение о завершении теста с ошибкой.

Блок-схема теста широковещания приведена на рис. 6.

Главной задачей теста АГМ является проверка способности коммутатора при выборе множества портов для передачи данных (широковещательно) отправлять эти пакеты с порта с наивысшим приоритетом.

Тест включает в себя дополнительную конфигурацию коммутатора в виде задания уровней приоритета для портов. Коммутатор, используемый при тестировании поддерживает 8 уровней приоритета, в связи с чем нет возможности задать свой собственный уровень приоритета для каждого порта (12). Для портов задаются следующие уровни приоритета: для портов 1 и 2 – 1 и 2, соответственно; для портов 3–7 – от 1 до 5, соответственно; для портов 8–12 – от 1 до 5, соответственно.



Рис. 5. Блок-схема теста таблицы маршрутизации

Fig. 5. Block diagram of the routing table test



- Рис. 6. Блок-схема теста широковещания
- Fig. 6. Block diagram of the broadcast test

С интерфейсного моста отправляется тестовый пакет данных с тремя адресами: 2f, 30 и 2e. Пакет данных должен достичь коммутатора, затем по первому адресу отправиться на 5 различных портов коммутатора (с 3-го по 7-й). Однако, так как задана АГМ, то выбирается порт с наивысшим приоритетом, т. е. 7-й. В связи с тем, что данный порт замкнут на loopback кабель, на коммутатор после этого придет 1 пакет, с адресом 30, 2e в заголовке. Аналогично пакет отправляется на 7–12-й порты. Благодаря АГМ выбирается только порт с наивысшим приоритетом. После этого пакет отправляется по адресу 2e на 1-й и 2-й порт, из которых будет выбран 2-й из-за более высокого приоритета. В результате на интерфейсный мост должен прийти единственный пакет данных. В таком случае выводится сообщение об успешном завершении теста. Если пакет не получен или получено несколько пакетов, то выводится сообщение о завершении теста с ошибкой.

Блок-схема теста АГМ приведена на рис. 7.



Рис. 7. Блок-схема теста адаптивной групповой маршрутизации

Fig. 7. Block diagram of adaptive group routing test

Заключение

В ходе работы с коммутатором была подтверждена корректность каждого из тестов разработанной методики, благодаря чему можно говорить о том, что методика способна обеспечить проверку части пунктов стандарта SpaceWire, таких как удаление заголовка, широковещательная передача данных, АГМ. Также методика позволяет проверить положения документации коммутаторов, такие как возможность задания таблицы маршрутизации, установленный размер приемного буфера каждого из портов, стирание пакетов с отсутствующим адресом отправки на порт.

В дальнейшем методика тестирования будет дополняться новыми проверками, среди которых сейчас можно выделить проверку возможности зеркалирования поступающего и исходящего с устройства трафика [15].

Библиографические ссылки

1. Коммутаторы как основа сети передачи данных [Электронный ресурс]. URL: https://www.sekventa.ru/service/sks/aktivnoe-setevoe-oborudovanie.html (дата обращения: 25.12.2021).

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. ECSS-E-ST-50-12C Rev.1. Space engineering. SpaceWire – Links, nodes, routers and networks. ECSS Secretariat. ESA-ESTEC Requirements & Standards. Division Noordwijk, The Netherlands.

4. Маршрутизация – принцип работы и таблица маршрутизации [Электронный ресурс]. URL: https://zvondozvon.ru/tehnologii/kompyuternye-seti/marshrutizatsiya (дата обращения: 03.01.2022).

5. Виды трафика в IP сетях: unicast, broadcast, multicast, anycast. Loopback адреса и интерфейсы [Электронный ресурс]. URL: https://zametkinapolyah.ru/kompyuternye-seti/4-8-vidy-trafikav-ip-setyax-unicast-broadcast-multicast-anycast-loopback-adresa-i-interfejsy.html#484__broadcast (дата обращения: 03.01.2022).

6. Калимолдаев М. Н., Тулемисова Г. Е. Алгоритм адаптивной маршрутизации информационного потока сетей интегрального обслуживания // Институт проблем информатики и управления МОН РК. 2013. № 2.

7. Мосты, интерфейсы и внешние накопители данных [Электронный pecypc]. URL: https://www.ixbt.com/storage/bridges.shtml (дата обращения: 04.01.2022).

8. Введение петлевого кабеля [Электронный pecypc]. URL: http://ru.fibresplitter.com/ news/introduction-of-loopback-cable-24290794.html (дата обращения: 04.01.2021).

9. МиТ. Официальный сайт [Электронный ресурс]. URL: http://www.spacewire.ru/mit (дата обращения: 05.01.2022).

10. Чепрасова А. С., Мамелин Ю. В. Будущее и настоящее СБИС // Молодой ученый. 2016. № 17. С. 79–81.

11. Бортовые сети космических аппаратов нового поколения [Электронный ресурс]. URL: https://docplayer.com/137755601-Bortovye-seti-kosmicheskih-apparatov-novogo-pokoleniya-na-osnove-setey-tehnologii-spacewire.html (дата обращения: 06.01.2022).

12. Создание консольного приложения [Электронный pecypc]. URL: https://ci-builder.ru/07/ Index05.htm (дата обращения: 07.01.2022).

13. Буферы, потоки и двоичные данные [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/ company/ruvds/blog/348970/ (дата обращения: 17.01.2022).

14. Объяснение зеркалирования портов [Электронный ресурс]. URL: https://community. fs.com/ru/blog/port-mirroring-explained-basis-configuration-and-fa-qs.html (дата обращения: 24.01.2022).

15. Архитектура и реализация коммутационных матриц современными производителями элементной базы [Электронный pecypc]. URL: http://nano-e.ucoz.ru/publ/publikacii_studentov_mifi/referaty/arkhitektura_i_realizacija_kommutacionnykh_matric_switch_fabrics_sovremennymi_pro izvoditeljami_ehlementnoj_bazy_so/8-1-0-372 (дата обращения: 25.01.2022).

References

1. *Kommutatory kak osnova seti peredachi dannyh* [Switches as the basis of a data transmission network] (In Russ.). Available at: https://www.sekventa.ru/service/sks/aktivnoe-setevoe-oborudovanie.html (accessed: 25.12.2021).

2. Gorbunov S. F., Grishin V. Yu., Eremeev P. M. [Network interfaces of spacecraft: prospects of development and problems of implementation]. *Nanoindustriya*. 2019, No. 89, P. 128–130 (In Russ.).

3. ECSS-E-ST-50-12C Rev.1. Space engineering. SpaceWire – Links, nodes, routers and networks. ECSS Secretariat. ESA-ESTEC Requirements & Standards. Division Noordwijk, The Netherlands.

4. *Marshrutizaciya – princip raboty i tablica marshrutizacii* [Routing - the principle of operation and the routing table] (In Russ.). Available at: https://zvondozvon.ru/tehnologii/kompyuternye-seti/marshrutizatsiya (accessed: 03.01.2022).

5. *Vidy trafika v IP setyah: unicast, broadcast, multicast, anycast. Loopback adresa i interfejsy* [Types of traffic in IP networks: unicast, broadcast, multicast, unicast. Loopback addresses and interfaces] (In Russ). Available at: https://zametkinapolyah.ru/kompyuternye-seti/4-8-vidy-trafika-v-ip-setyax-unicast-broadcast-multicast-anycast-loopback-adresa-i-interfejsy.html#484_broadcast (accessed: 03.01.2022).

6. *Kalimoldaev M. N., Tulemisova G. E.* [Algorithm of adaptive routing of information flow of integrated service networks]. *Institut problem informatiki i upravleniya MON RK.* Kazakhstan, 2013. No. 2. (In Russ.).

7. *Mosty, interfejsy i vneshnie nakopiteli dannyh* [Bridges, interfaces and external data storage] (In Russ.). Available at: https://www.ixbt.com/storage/bridges.shtml (accessed: 04.01.2022).

8. *Vvedenie petlevogo kabelja* [Introduction of loop cable] (In Russ.). Available at: http://ru. fibre-splitter.com/news/introduction-of-loopback-cable-24290794.html (accessed: 04.01.2022).

9. *MiT. Oficial'nyj sajt* [MiT. Official website] (In Russ.). Available at: http://www. space-wire.ru/mit (accessed: 05.01.2022).

10. *Cheprasova A. S., Mamelin Yu. V.* [The future and present of FPGA]. *Molodoy uchenyy.* 2016, No. 17, P. 79–81 (In Russ.).

11. *Bortovye seti kosmicheskih apparatov novogo pokoleniya* [Onboard networks of new generation spacecraft] (In Russ). Available at: https://docplayer.com/137755601-Bortovye-seti-kosmicheskih-apparatov-novogo-pokoleniya-na-osnove-setey-tehnologii-spacewire.html (accessed: 06.01.2022).

12. *Sozdanie konsol'nogo prilozheniya* [Creating a console application] (In Russ.). Available at: https://ci-builder.ru/07/Index05.htm (accessed: 07.01.2022).

13. *Bufery, potoki i dvoichnye dannye* [Buffers, streams, and binary data] (In Russ.). Available at: https://ci-builder.ru/07/Index05.htm (accessed: 17.01.2022).

14. *Ob"yasnenie zerkalirovaniya portov* [Explanation of port mirroring] (In Russ.). Available at: https://ci-builder.ru/07/Index05.htm (accessed: 24.01.2022).

15. Arhitektura i realizaciya kommutacionnyh matric sovremennymi proizvoditelyami elementnoj bazy [Architecture and implementation of switching matrices by modern manufacturers of the element base] (In Russ). Available at: https://ci-builder.ru/07/Index05.htm (accessed: 25.01.2022).

🖾 Максютин А. С., Казайкин Д. С., Дымов Д. В., Ивленков Д. В., 2022

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.

Казайкин Дмитрий Семенович – начальник группы базового центра системного проектирования бортовой аппаратуры космических аппаратов; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: s6202@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.

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

Kazaykin Dmitry Semenovich – Head of the Group of the Basic Center for System Design of Onboard Spacecraft Equipment; JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems". E-mail: s6202@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.

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

УДК 536.2:623.5 Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-209-226

Для цитирования: Идентификационно-имитационная математическая модель теплофизического нагружения малокалиберного артиллерийского ствола / А. В. Подкопаев, А. Б. Бабаджанов, И. А. Подкопаев, В. И. Должиков // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 2. С. 209–226. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-209-226.

For citation: Podkopaev A. V., Babadzhanov A. B., Podkopaev I. A., Dolzhikov V. I. [Identification and simulation mathematical model of thermo and physical loading of a small-caliber artillery barrel]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 2, P. 209–226. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-209-226.

Идентификационно-имитационная математическая модель теплофизического нагружения малокалиберного артиллерийского ствола

А. В. Подкопаев^{*}, А. Б. Бабаджанов, И. А. Подкопаев, В. И. Должиков

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» Российская Федерация, 394064, г. Воронеж, ул. Старых большевиков, 54а *E-mail: aleksanpodkopaev@mail.ru

Артиллерийский выстрел представляет собой сложный газо- и термодинамический процесс быстрого превращения химической энергии пороха в тепловую, а затем в механическую работу перемещения снаряда и откатных частей артиллерийского орудия. Отличительной особенностью применения авиационного артиллерийского оружия (ААО) является малое время, в течение которого возможна стрельба с летательного аппарата по цели, что требует производства не одного артиллерийского выстрела, а отстрела максимального количества снарядов с минимальными перерывами между очередями выстрелов. Анализ сложившихся физических представлений о процессах, протекающих в малокалиберном артиллерийском стволе (далее – ствол), позволяет выделить основную количественную характеристику температурного состояния, влияющую на качество функционирования ААО, – температурное поле ствола. Высокое по уровню и градиентам температурное поле, образующееся в стенке ствола при выстреле, очередях и сериях выстрелов, оказывает существенное влияние на снижение тактико-технических и эксплуатационных характеристик ААО. Поэтому задача синтеза математической модели теплофизического нагружения ствола (далее – модель, если из контекста изложения материала ясно, что речь идет именно о разработанной модели) и дефиниции температурного поля имеет большое значение для решения ряда практических приложений. К ним относятся: оценка износа канала ствола в зависимости от нагрева; анализ термопрочности материала ствола; анализ условий ведения снаряда по каналу ствола и экстракции гильзы при выстреле; оценка различных способов и методов искусственного охлаждения стволов; определение безопасности ААО по исключению события самосрабатывания термонагруженного патрона, находящегося в разогретом стрельбой стволе; обеспечение условий сохранения работоспособности взрывателей и т. д. Вместе с тем адекватный расчет нестационарного теплообмена в канале ствола затруднен, что связано с неполной достоверностью исходных данных и динамикой быстропротекающих процессов применения ААО. Целью работы установлено совершенствование математических средств, описывающих термодинамические состояния ствола на основе базовых функциональных зависимостей внутренней баллистики и рассредоточенного комбинирования методов теплообмена и конечных разностей. Многочисленное и всестороннее тестирование синтезированной модели, сравнение результатов расчета с данными классической теории, автомодельными решениями и с экспериментальными данными подтвердили достоверность и предопределили достаточную приспособленность модели к использованию по назначению по мере усложнения объектов исследований.

Ключевые слова: режим стрельбы, теплопроводность, теплоотдача, дифференциальное уравнение, разностное уравнение, достоверность.

Identification and simulation mathematical model of thermo and physical loading of a small-caliber artillery barrel

A. V. Podkopaev^{*}, A. B. Babadzhanov, I. A. Podkopaev, V. I. Dolzhikov

Air Force Military educational and scientific center "Air Force academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin" 54a, Starykh bol'shevikov St., Voronezh, 394064, Russian Federation *E-mail: aleksanpodkopaev@mail.ru

An artillery shot is a complex gas and thermodynamic process of rapidly converting the chemical energy of gunpowder into heat, and then into mechanical work of moving the projectile and the recoil parts of the artillery gun. A distinctive feature of the use of aviation artillery weapons is the short time during which firing from an aircraft at a target is possible, which requires the production of not one artillery shot, but the firing of the maximum number of shells with minimal interruptions between bursts of shots. An analysis of the existing physical concepts of the processes occurring in a small-caliber artillery barrel (hereinafter referred to as the barrel) makes it possible to single out the main quantitative characteristic of the temperature state that affects the quality of the functioning of aviation artillery weapons – the temperature field of the barrel. The temperature field, high in level and gradients, formed in the barrel wall during firing, bursts and series of shots, has a significant impact on the reduction in the tactical, technical and operational characteristics of aviation artillery weapons. Therefore, the problem of synthesizing a mathematical model of thermophysical loading of a wellbore (hereinafter referred to as the model, if it is clear from the context of the presentation of the material that we are talking about the developed model) and the definition of the temperature field is of great importance for solving a number of practical applications. These include: assessment of bore wear depending on heating; analysis of the thermal strength of the barrel material; analysis of the conditions of projectile guidance along the bore and cartridge case extraction during firing; evaluation of various ways and methods of artificial cooling of shafts; determination of the safety of aviation artillery weapons by eliminating the event of self-activation of a thermally loaded cartridge located in a barrel heated by firing; ensuring the conditions for maintaining the operability of fuses, etc. At the same time, an adequate calculation of non-stationary heat transfer in the bore is difficult, due to the incomplete reliability of the initial data and the dynamics of fast processes in the use of aviation artillery weapons. The aim of the work is to improve mathematical tools that describe the thermodynamic states of the barrel based on the basic functional dependencies of internal ballistics and a dispersed combination of heat transfer methods and finite differences. Numerous and comprehensive testing of the synthesized model, comparison of the calculation results with the data of the classical theory, self-similar solutions and experimental data confirmed the reliability and predetermined the sufficient suitability of the model for its intended use as the objects of research become more complex.

Keywords: firing mode, thermal conductivity, heat transfer, differential equation, difference equation, reliability.

Введение

Рост требований к интенсификации режимов стрельбы (увеличению количества выстрелов в очереди и количества очередей выстрелов, уменьшению интервалов времени между очередями выстрелов), непрерывность разработок по созданию новых скорострельных артиллерийских орудий, обусловливают исключительную важность корректировок методов и способов описания процесса нагрева ствола, ограничивающего боевые свойства ААО [1]. Поэтому научнотехническая задача формализации температурного поля ствола, циклично подвергающегося высоким термомеханическим нагрузкам, представляется приоритетной задачей проектирования и исследования ААО.

При решении введенной в рассмотрение проблемы необходимо определить, во-первых, в какой мере будут действенны традиционные методы решения обобщенной задачи нагрева инженерных

конструкций и, во-вторых, какие новые подходы можно предложить для достижения цели, поставленной в работе. Так, в статьях [2–4] предложены схемы экспериментальных исследований и методы обработки выходных данных, обеспечивающие повышение точности определения температуры тела и расширение диапазона измерений; в публикации [5] представлен уникальный вариант тепловой модели, разработанной на основе аппарата теории вероятностей; в работе [6] численными решениями многомерной задачи теплопроводности определены температурные поля оребренных стенок различной конфигурации; трудом [7] предложены инструменты моделирования температурного поля в узлах газовых турбин, максимально учитывающие совокупность параметров в многофакторных граничных условиях пограничного слоя; в статье [8] получены корреляционные регрессионные зависимости оптимальных экстремумов нагружения стволов стрелково-пушечного артиллерийского вооружения. В качестве примеров работ подобной тематики в области авиационной артиллерийской науки можно привести публикации [9–13].

В анализируемых подходах находит применение как простой метод перебора различных вариантов и их комбинаций, так и группа сложных методов класса «предиктор – корректор», предусматривающих экстраполирующие и исправляющие формулы. Естественно, указать какую-либо определенную, строго регламентированную методику, дающую истинные результаты по нагреву тел разнообразных конструкций и условий эксплуатации нельзя. Тем не менее поиск решений, адекватно сопоставляющих сложность объекта со сложностью математических или экспериментальных средств (закон адекватности объекта и регулятора) актуален в ближайшей и долгосрочной перспективе. По принятой терминологии [14; 15] непосредственное построение отдельных блоков модели подразумевает процесс имитации. В случае использования известных заимствований и установлении соответствующей организации параметров, в работе различима проблема идентификации модели.

Синтез дифференциальных операторов идентификации и имитации температурного поля ствола

При решении задач теплопроводности используется основное дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье, в общем случае описывающее распределение температуры в твердом теле [16]. Для ствола, имеющего сложную геометрическую форму составного цилиндра, уравнение теплопроводности Фурье целесообразно представить в цилиндрической системе координат, а так как ствол является телом вращения и симметричен относительно продольной оси, рассмотрение задачи определения температурного поля ствола ограничено двумерной формой в одной из радиальных плоскостей [16; 17]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right),\tag{1}$$

где T – температура ствола; τ – время; a – коэффициент температуропроводности стали ствола; r, θ – радиус вектор и полярный угол, соответственно, цилиндрической системы координат.

Коэффициент температуропроводности материала в уравнении (1), характеризующий скорость изменения температуры тела, особо важен для описания именно нестационарных тепловых процессов и рассчитывается по формуле:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho},\tag{2}$$

где λ, *c*, ρ – коэффициенты теплопроводности, удельной теплоемкости и плотность, соответственно, стали ствола.

Реальное явление нагрева и охлаждения ствола абстрагируется некоторыми допущениями, упрощающими, но не снижающими качества построения модели и основанными на обобщении опыта, аккумулированного в прикладных исследованиях, отмеченных ранее:

материал ствольной стали ОХНЗМФА считается изотропным и однородным;
- начальная температура ствола равна температуре окружающей среды ($T_0 = T_{\rm B}$);

 теплообменом между каморной частью ствола и патроном во время выстрела пренебрегают вследствие незначительности рассматриваемого периода;

 – патрон представляется модельным концентратором температур с постоянными теплофизическими характеристиками.

Принятие крайнего допущения при исследовании вопроса о безопасном нахождении очередного патрона в разогретом стрельбой стволе, диктует объективную необходимость прямого учета в формуле (2) зависимости коэффициентов теплопроводности λ и удельной теплоемкости *с* ствольной стали от температуры ствола *T* путем процедурных запросов требуемых значений из массива данных [18]. Вместе с тем нелинейность теплофизических коэффициентов материала ствола, несомненно, приводит к существенному усложнению задачи и увеличению времени машинного счета. Поскольку цилиндр является осесимметричным, то из соображений целесообразности рассмотрено его продольное сечение. Исходя из первого допущения, в целях дифференциации расчетных процедур, при известной связи цилиндрических координат с прямоугольными декартовыми координатами [17], уравнение (1) заменено двумя одномерными дифференциальными уравнениями, одно из которых записано в цилиндрических, а другое – в прямоугольных декартовых координатах. В результате получена система уравнений вида:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right);$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2},$$
(3)

где *х* – ось абсцисс прямоугольной декартовой системы координат.

Дуализм условий в формуле (3) объясняется потребностью в согласовании точностных характеристик применяемых физико-математических методов с располагаемыми характеристиками машинного времени, памяти и разрядной сетки вычислителя. Такой прием предполагает последовательное подключение подпрограмм-процедур, содержащих вызовы более упрощенных, по сравнению с полной, математических моделей, которые описывают локальные изменения температурного поля ствола в поперечном *r* и продольном *x* направлениях.

В приложении к моделированию теплофизического нагружения ствола первое уравнение системы (3) определяет нестационарную температуру ствола *T* исключительно в радиальном направлении *r*. Второе уравнение системы (3) определяет эту же величину в продольном направлении по оси *x*. В целом система уравнений (3) характеризует пространственно-временное изменение температуры цилиндра в любой точке, объединяя все типы явления теплопроводности независимо от физических свойств тела и условий взаимодействия с окружающей средой. Для выделения изучаемого явления к системе уравнений (3) присоединены условия однозначности, специфичные для объекта и предмета исследования. В условия однозначности включены требуемые интерпретации геометрических, краевых (совокупность начального и граничных), физических условий однозначности. На рис. 1 представлена схема осевой симметрии ствола наиболее распространенной авиационной пушки ГШ-301.





При самой большой для 30-миллиметровых пушек скорострельности на один ствол, данное AAO с типовым осколочно-фугасно-зажигательным снарядом ОФЗ-30 обеспечивает режимы стрельбы с максимальной тепловой нагрузкой ствола. Ось x на рис. 1 совмещена с продольной осью ствола, и рассмотрение области, расположенной только по одну сторону от продольной оси ствола, вполне достаточно.

Начальные условия однозначности определяются заданным распределением температур в стволе для фиксированного времени, предшествующему рассматриваемому и принимаемому за начальный момент времени τ = 0. Уравнение температурного поля ствола для этого момента времени τ записано в виде:

$$T(r, x, 0) = T_0(r, x).$$
(4)

Так как начальная температура ствола T_0 в любой точке (r, x) в момент времени $\tau = 0$ равна температуре окружающей среды, уравнение (4) имеет вид:

$$T(r, x, 0) = T_{\rm B} = \text{const.}$$
⁽⁵⁾

Граничные условия определяют значения параметров теплопередачи на границах ствола. Ствол авиационной пушки ГШ-301 является нетеплоизолированным, поэтому граничные условия заданы в виде температур окружающей среды и законов теплообмена между средой и поверхностями ствола, в зависимости от конструктивных параметров и условий применения ААО (условия III-го рода) [16].

Интенсивность теплообмена между пороховыми газами (далее – газы), образующимися в процессе горения пороха, стволом и воздухом зависит от физико-механических процессов, протекающих у границ ствола. Эти процессы достаточно точно описываются известными уравнениями основной задачи внутренней баллистики для автоматических артиллерийских орудий [1; 19; 20] и уравнением теплового баланса [16].

Для каждой точки внутренней границы ствола граничное условие, в котором входящие величины зависят от времени т и координаты *x*, записано через уравнение теплового баланса:

$$\alpha_{\rm r} \left[T_{\rm r}(\tau) - T(x,\tau) \right] = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r},\tag{6}$$

где $\alpha_{\rm r}$ – коэффициент теплоотдачи от газов к каналу ствола; $T_{\rm r}$ – температура газов в канале ствола.

Уравнением (6) определяется конвективный тепловой поток от газов, направленный вглубь стенки ствола к его внешней поверхности в данной точке.

Воздействие движущегося снаряда на канал приводит к дополнительному нагреву ствола. При использовании в автоматической стрельбе медных ведущих поясков средняя температура трения рассчитывается по эмпирической формуле, учитывающей текущую по координатам и времени скорость газов в канале ствола v [20].

Граничное условие для каждой точки внешней границы ствола, на которой действует конвективный тепловой поток от воздуха, образовано аналогично уравнению (6)

$$\alpha_{\rm B} \left[T_{\rm B} - T(x,\tau) \right] = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r},\tag{7}$$

где $\alpha_{\rm B}$ – коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности ствола к воздуху.

На дульном срезе ствола действует конвективный тепловой поток, формируемый температурой газов у дульного среза $T_{\rm q}$. В этом случае уравнения (6) и (7) записаны для окончания процесса выстрела

$$\alpha_{r} \left[T_{\pi}(\tau) - T(r,\tau) \right] = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}.$$
(8)

Для интервалов времени между очередями выстрелов уравнения (7) и (8) имеют вид:

$$\alpha_{\rm B} \left[T_{\rm B} - T(r, \tau) \right] = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}.$$
(9)

Так как канал ствола является замкнутым, т. е. непосредственное распространение теплового излучения во внешнюю среду отсутствует, а величина потока теплового излучения от внешней стенки ствола в окружающую среду незначительна и по предварительным расчетам составляет менее 1 % от температуры ствола T на его внешней поверхности, то расчеты теплового потока лучистой энергии в работе не проводятся.

При очередях выстрелов канал и внешняя поверхность ствола имеют достаточно высокие температуры, поэтому необходим учет особенностей конструкции опорного образца ААО. Моделирование процесса функционирования штатной системы охлаждения авиационной пушки ГШ-301 реализовано введением локального коэффициента теплоотдачи.

Учет влияния гильзы, находящейся во время выстрела в казенной части, на распределение температурного поля ствола необходим. Поскольку гильза, располагаемая на расстоянии x = 0,175 м длины ствола, под действием давления газов плотно прижимается к стенке патронника, можно принять допущение о том, что такой контакт является идеальным, т. е. перенос тепла осуществляется лишь посредством теплопроводности. Так как толщина стенки гильзы сравнительно мала, предположен ее мгновенный прогрев до температуры газов в канале ствола $T_{\rm r}$. На основании вышеуказанного сформулировано граничное условие на поверхности патронника в характерных точках ствола, где происходит непосредственный контакт гильзы со стенкой (условие I-го рода) [16]

$$T(r=0, x=0...0, 175) = T_{r}(\tau), \tag{10}$$

Физические процессы конвективного переноса тепла при автоматической стрельбе и в перерывах между очередями выстрелов носят достаточно сложный характер. Совершенный математический учет теплообмена на стенках ствола посредством коэффициентов теплоотдачи от газов к каналу ствола α_1 и от внешней поверхности ствола к воздуху α_2 представляется самостоятельной задачей, базирующейся, как правило, на применении аппарата теории подобия процессов теплообмена в артиллерийских орудиях [19; 20].

Таким образом, при заданных дифференциальных уравнениях процесса (3), геометрических условиях однозначности, показанных на рис. 1, физических условиях однозначности, двумерная, нестационарная, нелинейная задача по определению температурного поля ствола представлена системой уравнений, полностью определяющей краевую задачу (4)–(10):

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right);$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2};$$

$$\alpha_{r} \left[T_{r}(\tau) - T(x, \tau) \right] = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r};$$

$$\alpha_{B} \left[T_{B} - T(x, \tau) \right] = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r};$$

$$\alpha_{r} \left[T_{A}(\tau) - T(r, \tau) \right] = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x};$$

$$\alpha_{B} \left[T_{B} - T(r, \tau) \right] = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x};$$

$$T(r = 0, x = 0...0, 175) = T_{r}(\tau);$$

$$T(r, x, 0) = T_{B} = \text{const.}$$
(11)

Достоинства системы уравнений (11) заключаются в простоте группирования исходных данных и наглядности их распределения по уровням иерархии с постоянно нарастающей степенью детализации.

Тем не менее система уравнений (11) не может быть непосредственно применена для решения поставленной задачи. Дело в том, что аналитическое решение задач теплопроводности и теплоотдачи возможно для тел простых форм и при несложных граничных условиях [21; 22]. Аналитические методы решения задач теплопередачи подробно изложены в работе [23]. Сложная двумерная, нестационарная, нелинейная прикладная задача теплопередачи в области со сложной конфигурацией границ в такой постановке не имеет точного аналитического решения. Получение результата, близкого к вероятно существующему аналитическому решению, возможно лишь селекцией численных методов, суть которых сводится к конечно-разностным аппроксимациям системы уравнений (11).

Формирование разностной схемы и селекция методов расчета температурного поля ствола

Приближенное решение задачи теплообмена в стволе проведем применением метода конечных разностей как наиболее апробированного и приемлемого для тел с переменными по длине сечениями [21-24]. Область непрерывного изменения аргумента заменена разностной сеткой (далее – сетка) – дискретным множеством точек, пересечения которых образует узлы. Вместо функций непрерывных аргументов введены функции дискретных аргументов – сеточные функции, определяемые в узлах сетки. Частные производные, входящие в инегродифференциальные уравнения и краевые условия, заменены (аппроксимированы) разностными соотношениями. В результате подобных замен, систему дифференциальных уравнений в частных производных (11) требуется свести к системе конечно-разностных алгебраических (далее – разностных) уравнений – разностным схемам. Если решение системы разностных уравнений существует и при увеличении степени подробности сетки стремится к решению поставленной задачи, то это решение и будет являться искомым приближенным решением аналитической задачи. Несмотря на то, что число неизвестных в системе разностных уравнений будет весьма значительно, ее решение с точки зрения математических трудностей проще, чем решения исходной системы дифференциальных уравнений (11). Следовательно, при решении системы (11) необходимо: осуществить выбор конфигурации и размеров сетки; построить разностную схему; определить устойчивость разностной схемы; выполнить многошаговую аппроксимацию исходной дифференциальной задачи; выяснить сходимость разностной схемы.

Итак, заменим область Ω_T непрерывного изменения аргументов искомой величины T некоторым конечным множеством точек, лежащих в этой области. Точки сетки формирования конечной разности функции целочисленного аргумента T_{kj} по оси x будем обозначать через k, а такие же точки по оси r – через j. В соответствии со спецификой решаемой задачи, область Ω_T трансформируется в область $\Omega_{T_{kj}}$ расчета температуры T_{kj} в k_j -точках сечений ствола при вели-

чине τ . Решение исходной задачи сводится к нахождению таблицы числовых значений функции T_{kj} в узлах сетки области $\Omega_{T_{kj}}$.

В соответствии с выбранной системой координат (0, *x*, *r*,) разобьем ствол в направлении оси *x* на 9 равных частей $9 = l / \Delta x$, а в направлении оси *r* на v равных частей $v = r_y / \Delta r$, где Δx , Δr шаги сетки по соответствующим координатам; l -длина ствола; $r_y -$ максимальная толщина ствола. Для этого проведем 9 - 1 лучей в направлении, перпендикулярном оси *x* и v - 1 лучей в направлении, перпендикулярном оси *r*, как представлено на рис. 2. В результате такого разбиения будем иметь сетку, состоящую из совокупности внутренних (на рис. 2 обозначены •) и граничных (на рис. 2 обозначены •) узлов. Так как в рассматриваемом случае $\Delta x = l / 9 = \text{const u } \Delta r = r_y / v = \text{const, то множество узлов } x_k$, определяемых точками с номерами $k = 0, 1, 2, \dots, K_9$, и множество узлов r_j , определяемых точками с номерами $j = 0, 1, 2, \dots, J_v$, представляет собой равномерную пространственную сетку в области Ω_{T_u} .



Рис. 2. Сеточная схема ствола авиационной пушки ГШ-301

Fig. 2. Grid diagram of the GSh-301 aircraft gun barrel

Здесь следует остановиться на одной из особенностей построения сетки. Эта особенность заключается в том, что разбиение осей x и r на отрезки производится не от начала координат, а от поверхности ствола с учетом конфигурации его продольного сечения и нарезов. Такое разбиение делается для того, чтобы в процессе составления разностных уравнений граничные узлы максимально совпадали с положением поверхности области $\Omega_{T_{ki}}$. При этом, конечно, не все

граничные узлы окажутся на линии, определяющей границу поверхности ствола, а расстояние между r_{j-1} и r_j узлами не на всех v лучах может оказаться равным Δr . Однако эти обстоятельства менее существенны по сравнению с выполнением граничных условий III-го рода, так как они в основном и определяют характер описания процесса его нагрева и охлаждения.

При построении разностных аналогов дифференциальных операторов системы (11) воспользуемся методом формальной замены производных конечно-разностными отношениями. Наиболее естественный способ замены производной основывается на определении производной (например, по координате *r* 1-го уравнения системы (11)) как предела [17; 24]

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \lim_{\Delta r \to 0} \left[T(r + \Delta r) - T(r) \right] \frac{1}{\Delta r}.$$
(12)

Если в равенстве (12) зафиксировать шаг Δr , то получим приближенную формулу для первой производной, выраженной через конечные разности.

Для так называемого правого разностного отношения или разности «вперед»

$$\frac{\partial T}{\partial r} \approx \left[T(r + \Delta r) - T(r) \right] \frac{1}{\Delta r}.$$
(13)

Аналогично вводится левое разностное отношение (разность «назад»), записываемое в виде:

$$\frac{\partial T}{\partial r} \approx \left[T(r) - T(r - \Delta r) \right] \frac{1}{\Delta r}.$$
(14)

При решении задач теплопроводности необходимо аппроксимировать и вторую производную. Для второй производной рассматривается линейная комбинация отношений (13) и (14)

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \approx \left[T(r + \Delta r) - 2T(r) + T(r - \Delta r) \right] \frac{1}{\Delta r^2}.$$
(15)

Каждый переход на 1 шаг «вперед» условно обозначен через «+1», а «назад» – через «-1». Тогда для *j*-й точки сетки формирования конечной разности величины T_{kj} по оси *r* правое разностное соотношение (13) преобразуется к виду

$$\frac{\partial T}{\partial r} = (T_{j+1} - T_j) \frac{1}{\Delta r}.$$
(16)

Аналогично преобразовано левое разностное отношения (14)

$$\frac{\partial T}{\partial r} = (T_j - T_{j-1}) \frac{1}{\Delta r}.$$
(17)

Разностный аналог второй производной, соответствующий формуле (15), представлен отношением:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = (T_{j+1} - 2T_j + T_{j-1}) \frac{1}{\Delta r^2}.$$
(18)

Формулы (12) – (18) и их обоснования справедливы и при замене разностными отношениями производной $\partial^2 T/\partial x^2$ во втором уравнении системы (11). В этом случае в уравненияханалогах вместо переменной *r* будет присутствовать переменная *x*, а индекс *j* будет замещен индексом *k*. Показанные аналогии будем иметь в виду далее, иногда не прибегая к прямой детализации задачи по второй пространственной переменной *x*.

Для построения соотношений, аппроксимирующих временну́ю производную $\partial T/\partial \tau$ в первом и втором уравнениях системы (11), в принципе можно использовать значения температур в *kj*-точках сечений ствола в различные моменты времени: $T_{k,j,i}$, $T_{k,j,i-1}$, $T_{k,j,i-2}$, ..., где *i* – точка сетки формирования конечной разности величины температуры T_{kj} в *kj*-точках сечений ствола по времени τ . Однако в практике решения большинства задач теплопроводности в подавляющем большинстве случаев используются исключительно двухслойные (по времени τ) разностные схемы, аппроксимирующие значения искомых температур на текущей *i*-й и предыдущей (*i* – 1)-й временно́й точке. Значительно реже учитываются значения температур в (*i* – 2)-й момент времени получением трехслойных разностных схем [21–24].

При получении вариантов двухслойных разностных схем, производная по времени т аппроксимирована временной разностью «назад»

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = (T_i - T_{i-1}) \frac{1}{\Delta \tau},\tag{19}$$

где $\Delta \tau$ – шаг сетки по времени τ .

Пространственные дифференциальные операторы при двухслойной разностной схеме аппроксимированы также на основе значений температуры T_{kj} в kj-точках сечений ствола в *i*-й и (i-1)-й моменты времени τ . При этом возможны два предельных случая.

В первом случае в аппроксимации задействованы только значения температуры T_{kj} в kj-точках сечений ствола для текущего *i*-го момента времени τ . Так, для пространственной переменной *r* одномерная пространственно-временная аппроксимация соответствующего дифференциального оператора уравнения (11) будет иметь вид:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = (T_{j+1,i} - 2T_{j,i} + T_{j-1,i}) \frac{1}{\Delta r^2}.$$
(20)

Во втором случае при аппроксимации используются только значения температуры T_{kj} в kj-точках сечений ствола для предыдущего момента времени (i - 1)

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = (T_{j-1,i-1} - 2T_{j,i-1} + T_{j-1,i-1}) \frac{1}{\Delta r^2}.$$
(21)

Принимая во внимание формулу (2), в соответствии с уравнениями (19) – (21) представлено два различных разностных уравнения, аппроксимирующих первое уравнение системы (11) в одномерной версии:

$$\frac{T_{j,i} - T_{j,i-1}}{\Delta \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} (T_{j+1,i} - 2T_{j,i} + T_{j-1,i}) \frac{1}{\Delta r^2};$$
(22)

$$\frac{T_{j,i} - T_{j,i-1}}{\Delta \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} (T_{j-1,i-1} - 2T_{j,i-1} + T_{j-1,i-1}) \frac{1}{\Delta r^2}.$$
(23)

Разностное уравнение вида (23) позволяет выразить решение задачи теплопроводности в стволе в явном виде на *i*-м временном слое через известные решения на предыдущем (i - 1)-м слое. В совокупности с аппроксимацией условий однозначности (4)–(10), разностное уравнение (23) образует явную разностную схему. Алгоритмы численного расчета по явной разностной схеме достаточно просты в программировании, но предъявляют требования к машинному времени.

Разностная схема, заданная разностным уравнением вида (22), сложнее, поскольку в каждое разностное уравнение вида (22) кроме неизвестного решения для *j*-й пространственной точки входят еще два искомых решения для соседних (j - 1)-й и (j + 1)-й пространственных точек. Все искомые решения оказываются «завязанными» друг с другом в общую нераспадающуюся систему разностных уравнений. Таким образом, в данном случае на каждом *i*-м временном слое решения определяются не по явным формулам вида (23), а из решения системы разностных уравнений, поэтому разностная схема, заданная разностным уравнением вида (22) неявна. Эффективные алгоритмы решения системы уравнений (11) по неявной разностной схеме значительно сложнее алгоритмов численного расчета по явным выбором шагов Δx , Δr и $\Delta \tau$.

Для построения конечно-разностного аналога системы уравнений (11) в работе использована исключительно неявная разностная схема в силу ее безусловной устойчивости, т. е. способности обеспечивать точность решения при любой степени подробности сетки.

При решении двумерной в пространственных координатах задачи достаточно действенным оказался локально-одномерный метод, относящийся к группе методов расщепления [21; 23] Сложная краевая задача математической физики сведена к последовательному решению одномерных задач. При решении двумерной задачи по определению температурного поля ствола локально-одномерный метод позволил в два этапа вычислить температуру T в множестве точек ствола в фиксированное время τ путем последовательного решения двух одномерных задач. Шаг сетки по времени t при этом на каждом этапе решения поделен пополам – 0,5 $\Delta \tau$.

В развитие приведенных обоснований, с учетом выражения (22), система уравнений (11) примет вид:

$$\frac{T_{k,j,i} - T_{k,j,i-1/2}}{0,5\Delta\tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \left[\frac{T_{k,j+1,i} - 2T_{k,j,i} + T_{k,j-1,i}}{\Delta r^2} + \frac{1}{r} \left(\frac{T_{k,j,i} - T_{k,j,i-1}}{\Delta r} \right) \right];$$

$$\frac{T_{k,j,i} - T_{k,j,i-1/2}}{0,5\Delta\tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{T_{k+1,j,i} - 2T_{k,j,i} + T_{k-1,j,i}}{\Delta x^2} \right);$$

$$\alpha_{r} \left[T_{r}(\tau) - T_{k,j-1,i}(x,\tau) \right] = -\lambda \frac{T_{k,j,i}(x,\tau) - T_{k,j-1,i}(x,\tau)}{\Delta r};$$

$$\alpha_{B} \left[T_{B} - T_{k,j,i}(x,\tau) \right] = -\lambda \frac{T_{k,j,i}(x,\tau) - T_{k-1,j,i}(r,\tau)}{\Delta r};$$

$$\alpha_{r} \left[T_{R}(\tau) - T_{k-1,j,i}(r,\tau) \right] = -\lambda \frac{T_{k,j,i}(r,\tau) - T_{k-1,j,i}(r,\tau)}{\Delta x};$$

$$\alpha_{B} \left[T_{B} - T_{k-1,j,i}(r,\tau) \right] = -\lambda \frac{T_{k,j,i}(r,\tau) - T_{k-1,j,i}(r,\tau)}{\Delta x};$$

$$T(r = 0, x = 0...0, 175) = T_{r}(\tau);$$

$$T(r, x, 0) = T_{B} = \text{const.}$$

$$(24)$$

Разрешением разностных уравнений системы (24) относительно $T_{k,i,i-1/2}$, $T_{k,i-1,i}(x,\tau)$, $T_{k,i,i}(x,\tau)$, $T_{k-1,i,i}(r,\tau)$, $T_{k,i,i}(r,\tau)$, T

$$\begin{split} T_{k,j,i-1/2} &= -\left(\frac{0,5\lambda\Delta\tau}{c\rho\Delta r^2}\right) T_{k,j+1,i} + \left(\frac{\lambda\Delta\tau}{c\rho\Delta r^2} - \frac{0,5\lambda\Delta\tau}{c\rho(r_0\Delta r + \Delta r^2J_v)} + 1\right) T_{k,j,i} - \\ &- \left(\frac{0,5\lambda\Delta\tau}{c\rho\Delta r^2} - \frac{0,5\lambda\Delta\tau}{c\rho(r_0\Delta r + \Delta r^2J_v)}\right) T_{k,j-1,i};\\ T_{k,j,i-1/2} &= -\left(\frac{0,5\lambda\Delta\tau}{c\rho\Delta x^2}\right) T_{k+1,j,i} + \left(1 + \frac{\lambda\Delta\tau}{c\rho\Delta x^2}\right) T_{k,j,i} - \left(\frac{0,5\lambda\Delta\tau}{c\rho\Delta x^2}\right) T_{k-1,j,i};\\ T_{k,j-1,i}(x,\tau) &= T_{k,j,i}(x,\tau) \left(\frac{\lambda}{\lambda + \alpha_r\Delta r}\right) + \left(\frac{\alpha_r T_r(\tau)\Delta r}{\lambda + \alpha_r\Delta r}\right);\\ T_{k,j,i}(x,\tau) &= T_{k,j-1,i}(x,\tau) \left(\frac{\lambda}{\lambda - \alpha_B\Delta r}\right) - \left(\frac{\alpha_B T_B(\tau)\Delta r}{\lambda - \alpha_B\Delta r}\right);\\ T_{k,j,i}(r,\tau) &= T_{k,j,i}(r,\tau) \left(\frac{\lambda}{\lambda - \alpha_B\Delta x}\right) + \left(\frac{\alpha_r T_n(\tau)\Delta x}{\lambda - \alpha_B\Delta x}\right);\\ T_{k,j,i}(r,\tau) &= T_{k-1,j,i}(r,\tau) \left(\frac{\lambda}{\lambda - \alpha_B\Delta x}\right) - \left(\frac{\alpha_B T_B(\tau)\Delta x}{\lambda - \alpha_B\Delta x}\right);\\ T(r = 0, x = 0...0,175) = T_r(\tau); \quad T(r, x, 0) = T_B = \text{const}, \end{split}$$

где *r*₀ – расстояние от продольной оси ствола до его внутренней стенки.

Для решения системы разностных уравнений (25) можно применять обычные методы линейной алгебры или методы итераций. Но реализация локально-одномерного метода расщепления позволяет организовать вычисления методом прогонки или методом факторизации [21–23], наиболее выгодным и экономичным по объему вычислений.

Обозначением выражений в скобках через коэффициенты метода прогонки при искомой температуре T_{kj} на текущем *i*-м временном слое, система разностных уравнений (25) преобразована к компактной форме

$$T_{k,j,i-1/2} = -A_j T_{k,j+1,i} + C_j T_{k,j,i} - B_j T_{k,j-1,i};$$

$$T_{k,j,i-1/2} = -A_k T_{k+1,j,i} + C_k T_{k,j,i} - B_k T_{k-1,j,i};$$

$$T_{k,j-1,i}(x,\tau) = T_{k,j,i}(x,\tau)\xi_{\Gamma}^r + \varphi_{\Gamma}^r;$$

$$T_{k,j,i}(x,\tau) = T_{k,j-1,i}(x,\tau)\xi_{B}^r - \varphi_{B}^r;$$

$$T_{k-1,j,i}(r,\tau) = T_{k,j,i}(x,\tau)\xi_{\Gamma}^x + \varphi_{\Gamma}^x;$$

$$T(r = 0, x = 0...0, 175) = T_{\Gamma}(\tau);$$

$$T(r,x,0) = T_{B} = \text{const.}$$

$$(26)$$

Идентичность в системе разностных уравнений (26) группировок параметров при коэффициентах метода прогонки значительно упрощает составление машинной программы (далее – программа) расчета температурного поля ствола, учитывающей специальный вид матриц прогонки первых двух разностных уравнений системы (26) – их трехдиагональность. Так, например, для первого разностного уравнения системы (26) матрица прогонки имеет вид

1 <i>A</i> ₁	ξ^r_r C_1	0 B_1	····	0 0	0 0	0 0	 	0 0	0 0	0 0	
 0	 0	 0		\dots A_j	C_j	 B _j	····	 0	 0	0	. (27)
 0	 0	 0		 0	 0	 0		\dots A_{r_j-1}	\dots C_{r_j-1}	$ B_{r_j-1}$	
0	0	0		0	0	0		0	$\xi^r_{\scriptscriptstyle m B}$	1	

При заданных граничных условиях однозначности III-го рода порядок матрицы (27) равен $r_j - 1$, причем отличны от нуля только коэффициенты прогонки, располагающиеся на трех диагоналях – главной и двух соседних. Трехдиагональная форма матрицы вида (27) позволяет организовать вычисления по методу Гаусса [17; 23; 24] так, чтобы не проводить операции с нулевыми элементами. Тем самым объем вычислений удастся значительно уменьшить. Достоинством схемы (26), (27) является то, что она позволяет реализовать прямоугольную сетку, наиболее апробированную при решении задач теплопроводности, а также; существенно упростить процессы получения объективных результатов. Кроме того, система уравнений (26) позволяет применить неявную форму представления конечно-разностных аналогов дифференциального уравнения (11), описывающего теплопередачу в стволе, что обеспечивает абсолютную устойчивость разностной схемы. Время решения задачи при этом существенно уменьшается путем выбора сколь угодно большой величины $\Delta \tau$ шага сетки по времени τ без риска нарушить устойчивость разностной схемы.

Однако выполнение требования устойчивости разностной схемы совершенно не означает выполнение условия аппроксимации исходной дифференциальной задачи. Поэтому существенно важным является решение вопроса выбора степени подробности сетки, влияющей на точность результатов. При этом необходимо учитывать, что чрезмерное уменьшение шагов Δx и Δr сетки по соответствующим осям x и r приводит к возрастанию числа неизвестных в разностной схеме (26), (27), а, следовательно, и к увеличению времени машинного счета. Укрупнение шагов Δx и Δr сетки по соответствующим осям x и r не способствует повышению точности требуемого результата. Сопряжение величины $\Delta \tau$ шага сетки по времени τ со значением аналогичной величины, задаваемой в процедурах решения основной задачи внутренней баллистики и периода последействия [1; 19; 20] определяет переменность отрезков времени τ . При отладке модели выбор значений шагов сетки Δx , Δr по соответствующим координатам x, r и величины шага по времени $\Delta \tau$ осуществлен, исходя из условий наибольшей точности решения, наименьшего числа неизвестных в системе разностных уравнений, учета реальных размеров области дискретного изменения аргументов Ω_{T_k} величины T_{kj} температуры в kj-точках сечений ствола.

Первоочередным в решении задачи представлялся учет конфигурации нарезов, поскольку их наличие приводит к неравномерности распределения температуры по периметру нарезной части канала ствола [8; 9; 11]. Исходное требование несравненной малости величина Δr шага сетки по оси *r* в отношении к высоте поля нареза очевидна.

Математический анализ степени подробности разностных схем представляет собой достаточно сложную задачу. Результаты исследований влияния значений шагов сетки Δx , Δr по соответствующим координатам x, r и величины шага по времени $\Delta \tau$ на точность решения задачи в данной работе приведены без доказательств. Наличие аппроксимации легко устанавливалось на практике путем численных экспериментов в процессе проведения пробных расчетов элементарных задач теплопроводности в цилиндрических стенках и сравнения полученных результатов с известными [25].

При измельчении пространственно-временной сетки точность решения задач возрастает, что свидетельствует о стремлении к нулю погрешности аппроксимации, но при этом, естественно,

увеличивается время машинного счета. Приемлемыми следует считать шаги сетки по координате $x - \Delta x = 0,001$ м, по координате $r - \Delta r = 4 \cdot 10^{-4}$ м, поскольку осредненная среднеквадратическая погрешность по всем точкам в этом случае не превышает 10 %, а время моделирования однократного нагружения – не более 17 с. Дальнейшее увеличение степени подробности сетки, например, в 2 раза, приводит к увеличению времени решения задач на порядок при увеличении точности счета всего на 3 %.

Так как скорость газов в канале ствола v во времени τ и по длине ствола l постепенно возрастает, то такая особенность не позволяет построить равномерную сетку по времени $\Delta \tau$, поскольку по длине ствола l величина шага Δx сетки по оси x так же будет увеличиваться. Это, в свою очередь, может привести к тому, что точность результатов решения полученных в различных точках области дискретного изменения аргументов $\Omega_{T_{ir}}$ температуры в kj-точках сече-

ний ствола T_{kj} , будет существенно отличаться между собой, что недопустимо. Учитывая также и то, что вычисления на каждом *i*-м временном слое производятся на основании значений предыдущего (*i* – 1)-го временного слоя, ошибка будет накапливаться достаточно быстро. В целях исключения этого события целесообразно использовать переменный шаг по времени, определяемый исходя из скорости газов в канале ствола *v*, получаемой решением основной задачи внутренней баллистики [1; 19; 20]

$$\Delta \tau = \frac{\Delta x}{v(l)}.$$
(28)

В отличие от пространственной сетки множество узлов τ_i , определяемых точками $i = 0, 1, 2, ..., I_0$, представляет собой неравномерную временну́ю сетку в области Ω_{τ} .

Формула (28) предъявляет жесткую связь величины $\Delta \tau$ шага сетки по времени τ со значениями Δx шага сетки по оси x, поскольку точность решения задачи непосредственно зависит от правильности выбора последнего.

Сходимость всех типов разностных схем при наличии условий их устойчивости и аппроксимации доказана в трудах [21–24].

Расчет температурного поля ствола при применении ААО сводится к многократному (по количеству выстрелов в очереди, количеству очередей выстрелов и интервалам времени между очередями выстрелов) решению системы уравнений (26) при начальном распределении температуры ствола T, которое устанавливается к началу очередного выстрела и определяется при решении той же системы уравнений (26) для предыдущего выстрела. Завершенной формой разработки модели явилась программа, позволяющая рассчитывать температурное поле ствола авиационной пушки ГШ-301.

Вследствие принятия некоторых допущений модель обладает определенным уровнем абстракции и, по причине неизбежной потери информации, не дает полную картину, характеризующую исследуемые физические процессы. Обоснование частных формулировок и дальнейшие обсуждения следствий представляются возможными после проверки адекватности модели реальным процессам теплообмена в стволе.

Проверка адекватности и ресурсоемкости модели

Достоверность разработанной модели установлена проверкой пространственного распределения нестационарных значений температуры ствола *T* при различных режимах стрельбы. Значения рассматриваемого основного теплофизического параметра для орудийной стали ОХНЗМФА хорошо известны и позволяют сравнить результаты моделирования с экспериментальными данными, классифицированными, например, в [8; 10; 11] и результатами моделирования, наиболее близкими к опытным, зарегистрированными в работах [8; 9; 12; 13]. Анализ выходных данных показал, что расхождение результатов вычислений и эксперимента не превышает 10 % и отличие результатов моделирования от других теоретических расчетов не существенно. Сопоставление совместных расчетных и экспериментальных данных показывает незначительное (не более 1,3 %) увеличение точности получения совокупных нестационарных значений температуры ствола T. Вместе с тем оценка ресурсов, необходимых для проведения заявленных вычислений, обнаружила некоторые преимущества модели. В качестве оцениваемого ресурса рассмотрена временная эффективность [26], зависящая от списка, типа и структуры взаимодействия операторов программы и, естественно, от быстродействия вычислительной машины (тактовой частоты процессоров, объема оперативной памяти). Учитывалось то обстоятельство, что одна и та же программа при одних и тех же случаях на разных вычислителях выполняется за разное время.

С целью сравнения временной эффективности модели версии программ, ранее применяемые в работах [9; 12; 13], импортировались на один и тот же современный вычислитель. По итогам прямого хронометража и абсолютных количественных сравнений наблюдалось сокращение времени машинного счета с использованием модели в 1,6 раза, что считается вполне приемлемым для задач такого класса. Указанные выводы обусловливают возможность моделирования рабочих процессов выстрела и нагружения ствола с точностью, как минимум не снижающей прежнюю, но с немаловажным выигрышем во времени.

Экономии временных затрат на моделирование теплового состояния ствола способствовало, по-видимому, проведение следующих мероприятий:

– рациональный выбор значений шагов сетки Δx , Δr по соответствующим координатам x, r и величины шага по времени $\Delta \tau$, систематизированных по итогам оценок окончательных данных численных экспериментов, проведенных в работе;

 – адаптация величины шага по времени Δτ, влияющего, в первую очередь, на временные ресурсы, к идентифицируемым параметрам теплоносителей в канале ствола;

 успешное сочетание достоинств (безусловная устойчивость) и компенсация недостатков (повышенные затраты машинного времени) неявных разностных схем.

Рекомендации по распространению решений при исследовании разнотипных образцов артиллерийских орудий

В качестве опорного образца в работе выбрано ААО типа ГШ-301, имеющее базовую одноствольную схему автоматики, стоящее на вооружении большей части современных, а также планирующееся на оснащение перспективных комплексов авиационного вооружения. Однако направленность исследований не исключает факта трансформирования разработанной модели к исследованиям других моделей ААО, прочих типов сухопутных и морских скорострельных артиллерийских орудий, а также артиллерийских орудий крупных калибров при выполнении ряда условий:

1. Решение основной задачи внутренней баллистики применительно к артиллерийскому орудию конкретной схемы действия и конструктивного оформления. Так, известны решения для безоткатных артиллерийских орудий, гаубиц, минометов и т. д. [19; 20].

2. Построение схемы осевой симметрии и сеточной схемы для области с конкретной геометрией. Отдание предпочтения тому или иному варианту в настоящее время является вопросом разрешаемым, но не закрытым [21–25]. Во многом предпочтения диктуются особенностями решаемой задачи, во многом зависят от вкуса исследователя.

3. Многофакторная композиция дифференциальных и разностных операторов, представляющая собой две стороны единого процесса моделирования. К примеру, несравненно бо́льшая длина и относительно малая толщина стенок в аналогичных агрегатах танковых и противотанковых пушек заставляют дополнительно учитывать тепло от солнечной радиации. В части касаемой аппроксимации системы уравнений (11), отметим, что обычно после проведения сопоставления явной и неявной разностных схем, делается вывод о нецелесообразности применения первой. Однако практика решения реальных задач не подтверждает безусловную правильность такой рекомендации. В пользу явной разностной схемы можно привести следующие соображения. Во-первых, при анализе быстропротекающих процессов преимущество неявной разностной схемы, заключающееся в более свободном выборе величины временно́го шага, может не проявиться. Во-вторых, явные разностные схемы удобны при реализации на вычислителях с несколькими параллельными процессорами, которые получили широкое распространение в настоящее время.

4. Нахождение решения сложнейшей задачи о теплообмене между стволом и окружающими газами. Полная система дифференциальных уравнений теплоотдачи включает уравнения переноса теплоты, теплоотдачи, движения, неразрывности [16], а решение должно быть относительно простым и приемлемым для инженерной практики.

5. Непременный учет взаимного влияния нагретых стволов в ААО, высокотемпных сухопутных и морских артиллерийских орудиях многоствольной схемы служит критерием полезности выводов и повышает практическую значимость модели.

Заключение

Способами и приемами дифференциально-разностного описания быстропротекающих тепловых процессов образован один из возможных вариантов модели, позволяющей достаточно объективно, но с меньшими затратами времени производить расчет нестационарного температурного поля разностенного составного цилиндра. Определены направления модификации модели при включении в инструменты исследований многообразной типологии артиллерийских орудий.

Таким образом, предлагаемая модель может быть использована в научно-исследовательских организациях Воздушно-космических сил России для определения оптимальных условий применения ААО в составе комплексов авиационного вооружения ударных носителей; в проектно-конструкторских организациях при проведении расчетов, связанных с определением теплового состояния ствола; в образовательной деятельности для развития научных основ учебных дисциплин.

Библиографические ссылки

1. Миропольский Ф. П., Морозов А. А., Пырьев Е. В. Баллистика авиационных средств поражения. Ч. 1. Внутренняя баллистика ствольных систем и ракетные двигатели твердого топлива. М. : ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 2008. 255 с.

2. Деревянко В. А., Макуха А. В. Измерение распределения температуры с помощью трехпроводной системы датчиков на основе термисторов // СибЖНТ. 2019. Т. 20, № 3. С. 334–343.

3. Анализ экспериментальных данных по плавлению и движению расплава металла по цилиндрической поверхности / П. Д. Лобанов, Э. В. Усов, А. И. Светоносов и др. // Теплофизика и аэромеханика. 2020. № 3. С. 483–490.

4. Cruz C., Marshall A. Surface and gas measurements along a film cooled wall // Thermophysics and Heat Transfer. 2007. No. 21. P. 181–189.

5. Гусев С. А., Николаев В. Н. Параметрическая идентификация теплового состояния радиоэлектронного оборудования в приборном отсеке самолета // Сибирский журнал науки и технологий. 2019. Т. 20, № 1. С. 62–67.

6. Васильев Е. Н. Расчет характеристик теплообмена оребренной стенки // Сибирский аэрокосмический журнал. 2020. Т. 21, № 2. С. 226–232.

7. Зуев А. А., Арнгольд А. А., Ходенкова Э. В. Теплоотдача в поле центробежных сил для элементов газовых турбин // Сибирский аэрокосмический журнал. 2020. Т. 21, № 3. С. 364–376.

8. Исследование термоэрозионной стойкости стволов методом планирования эксперимента / В. Ф. Захаренков, О. Г. Агошков, В. А. Девяткин и др. // Фундаментальные основы баллистического проектирования : материалы III Всерос. науч.-техн. конф. (2–6 июня 2012, г. Санкт-Петербург) : в 2 т. / Балтийский гос. техн. ун-т «Военмех». СПб., 2012. Т. 1. С. 79–86. 9. Ашурков А. А., Лазовик И. Н., Никитенко Ю. В. Исследование процесса износа стволов импульсных тепловых машин комплексов авиационного вооружения // Проблемы повышения боевой готовности, боевого применения, технической эксплуатации и обеспечения безопасности полетов летательных аппаратов с учетом климатических условий Сибири, Забайкалья и Дальнего Востока : материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. (25–27 июня 2003, г. Иркутск) : в 2 ч. / ИВАИИ. Иркутск, 2003. Ч. 1. С. 97–100.

10. Экспериментальные исследования предельных тепловых нагрузок на ствол скорострельной пушки / А. В. Подкопаев, Н. Ф. Крайнов, И. Н. Лазовик и др. // Проблемы повышения боевой готовности, боевого применения, технической эксплуатации и обеспечения безопасности полетов летательных аппаратов с учетом климатических условий Сибири, Забайкалья и Дальнего Востока : материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. (25–27 июня 2003, г. Иркутск) : в 2 ч. / ИВАИИ. Иркутск, 2003. Ч. 1. С. 127–129.

11. Захарченко А. С., Ашурков А. А., Лазовик И. Н. Способ оценки живучести стволов авиационного артиллерийского оружия // Проблемы повышения боевой эффективности ракетноартиллерийского вооружения : материалы XIV Всерос. науч.-практ. конф. (14–17 марта 2006, г. Москва) / ВВИА им. Н. Е. Жуковского. М., 2006. С. 28–35.

12. Подкопаев А. В., Гусев А. В. Исследование возможности уточнения конечно-разностной схемы решения многомерных задач теплопроводности // Инновации в авиационных комплексах и системах военного назначения : материалы Всерос. науч.-практ. конф. (26 ноября 2009, г. Воронеж) : в 12 ч. / ВАИУ. Воронеж, 2009. Ч. 11. С. 157–161.

13. Даниленко Р. А., Подкопаев А. В. Синтез математической модели функционирования системы «оружие – патрон» на основе решения квазилинейного нестационарного уравнения теплопроводности // Академические Жуковские чтения. : материалы V Всерос. науч.-практ. конф. (22-23 ноября 2017, г. Воронеж) / ВУНЦ ВВС «ВВА». Воронеж, 2018. С. 67–73.

14. Дейч А. М. Методы идентификации динамических объектов. М. : Энергия, 1979. 240 с.

15. Острейковский В. А. Теория систем. М. : Высшая школа, 1997. 240 с.

16. Сапожников С. В., Китанин Л. В. Техническая термодинамика и теплопередача. СПб. : СПбГТУ, 1999. 319 с.

17. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М. : Наука, 1984. 832 с.

18. Справочник по авиационным материалам и технологии их применения / под ред. В. Г. Александрова. М. : Транспорт, 1979. 242 с.

19. Проектирование ракетных и ствольных систем / под ред. Б. В. Орлова. М. : Машиностроение, 1974. 828 с.

20. Алферов В. В. Конструкция и расчет автоматического оружия. М. : Машиностроение, 1977. 248 с.

21. Самарский А. А., Николаев Е. С. Методы решения сеточных уравнений. М. : Наука, 1978. 592 с.

22. Зарубин В. С., Станкевич И. В. Расчет теплонапряженных конструкций. М. : Машиностроение, 2005. 352 с.

23. Дульнев Г. Н., Парфенов В. Г., Сигалов А. В. Применение электронных вычислительных машин для решения задач теплообмена. М. : Высшая школа, 1990. 207 с.

24. Власова Е. А., Зарубин В. С., Кувыркин Г. Н. Приближенные методы математической физики. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 700 с.

25. Задачник по технической термодинамике и теории тепломассообмена / В. Н. Афанасьев, С. И. Исаев, И. А. Кожинов и др.; под ред. В. И. Крутова и Г. Б. Петражицкого. СПб. : БВХ-Петербург, 2011. 384 с.

26. Столяр С. Е., Владыкин А. А. Информатика. Представление данных и алгоритмы. СПб. : Невский диалект; М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 382 с.

References

1. Miropolsky F. P., Morozov A. A., Pyriev E. V. *Ballistika aviatsionnykh sredstv porazheniya*. *Ch. 1. Vnutrennyaya ballistika stvol'nykh sistem i raketnyye dvigateli tverdogo topliva* [Ballistics of means of destruction. P. 1. Internal ballistics of barrel systems and solid propellant rocket engines]. Moscow, AFIA named after N. E. Zhukovsky Publ., 2008, 255 p.

2. Derevianko V. A., Makukha A. V. [Measuring the temperature distribution with a three-wire thermistor sensor system]. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologiy*. 2019, Vol. 20, No. 3, P. 334–343 (In Russ.).

3. Lobanov P. D., Usov E. V., Svetonosov A. I., Lezhnin S. I. [Analysis of experimental data on melting and movement of a metal melt over a cylindrical surface]. *Teplofizika i aeromekhanika*. 2020. No. 3, P. 483–490 (In Russ.).

4. Cruz C., Marshall A. Surface and gas measurements along a film cooled wall. *Thermophysics and Heat Transfer*, 2007. No. 21. P. 181–189.

5. Gusev S. A., Nikolaev V. N. [Parametric identification of the thermal state of electronic equipment in the aircraft instrument compartment]. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologiy*. 2019, Vol. 20, No. 1, P. 62–67 (In Russ.).

6. Vasiliev E. N. [Calculation of heat transfer characteristics of a ribbed wall]. *Sibirskiy aerokos-micheskiy zhurnal*. 2020, Vol. 21, No. 2, P. 226–232 (In Russ.).

7. Zuev A. A., Arngold A. A., Khodenkova E. V. [Heat transfer in the field of centrifugal forces for elements of gas turbines]. *Sibirskiy aerokosmicheskiy zhurnal*. 2020, Vol. 21, No. 3, P. 364–376 (In Russ.).

8. Zakharenkov V. F., Agoshkov O. G., Devyatkin V. A., Yurchenko N. A. [Study of the thermal erosion resistance of barrel by the method of planning an experiment]. *Materialy III Vseros. nauch.-tekhn. konf. "Fundamental'nyye osnovy ballisticheskogo proyektirovaniya"* [Materials III All-Russ. Scient. and Technic. Conf. "Fundamentals of ballistic design"]. St. Petersburg, 2012, P. 79–86 (In Russ.).

9. Ashurkov A. A., Lazovik I. N., Nikitenko Yu. V. [Study of the process of wear of barrels of pulsed heat engines of aviation weapons systems]. *Materialy XIII Vseros. nauch.-tekhn. konf. "Problemy povy-sheniya boyevoy gotovnosti, boyevogo primeneniya, tekhnicheskoy ekspluatatsii i obespecheniya bezopas-nosti poletov letatel'nykh apparatov s uchetom klimaticheskikh usloviy Sibiri, Zabaykal'ya i Dal'nego Vos-toka"* [Materials XIII All-Russ. Scient. and Technic. Conf. "Problems of increasing combat readiness, combat use, technical operation and ensuring flight safety of aircraft, taking into account the climatic conditions of Siberia, Transbaikalia and the Far East"]. Irkutsk, 203, P. 97–100 (In Russ.).

10. Podkopaev A. V., Krainov N. F., Lazovik I. N., Morozov S. A. [Experimental studies of limiting thermal loads on the barrel of a rapid-firing gun]. *Materialy XIII Vseros. nauch.-tekhn. konf. "Problemy povysheniya boyevoy gotovnosti, boyevogo primeneniya, tekhnicheskoy ekspluatatsii i obespecheniya bezopasnosti poletov letatel'nykh apparatov s uchetom klimaticheskikh usloviy Sibiri, Zabaykal'ya i Dal'nego Vostoka"* [Materials XIII All-Russ. Scient. and Technic. Conf. "Problems of increasing combat readiness, combat use, technical operation and ensuring flight safety of aircraft, taking into account the climatic conditions of Siberia, Transbaikalia and the Far East"]. Irkutsk, 2003, P. 127–129 (In Russ.).

12. Podkopaev A. V., Gusev A. V. [Study of the possibility of refining the finite-difference scheme for solving multidimensional problems of heat conduction]. *Materialy Vseros. nauch.-prakt. konf.* "*Innovatsii v aviatsionnykh kompleksakh i sistemakh voyennogo naznacheniya*" [Materials All-Russ. Scient. and Practic. Conf. "Innovations in aviation complexes and military systems"]. Voronezh, 2009, P. 157–161 (In Russ.).

13. Danilenko R. A., Podkopaev A. V. [Synthesis of a mathematical model for the functioning of the "weapon-cartridge" system based on the solution of a quasi-linear non-stationary heat conduction equation]. *Materialy V Vseros. nauch.-prakt. konf. "Akademicheskiye Zhukovskiye chteniya"* [Materials V All-Russ. Scient. and Practic. Conf. "Academic Zhukovsky reading"]. Voronezh, 2018, P. 67–73 (In Russ.).

14. Deutsch A. M. *Metody identifikatsii dinamicheskikh ob"yektov* [Methods for identifying dynamic objects]. Moscow, Energiya Publ., 1979, 240 p.

15. Ostreikovsky V. A. Teoriya sistem [Systems theory]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1997, 240 p.

16. Sapozhnikov S. V., Kitanin L. V. *Tekhnicheskaya termodinamika i teploperedacha* [Technical thermodynamics and heat transfer]. St. Petersburg, SPbSTU Publ., 1999, 319 p.

17. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Mathematical handbook for scientists and engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 832 p.

18. *Spravochnik po aviatsionnym materialam i tekhnologii ikh primeneniya* [Handbook of aviation materials and technologies for their application]. Ed. by V. G. Alexandrov. Moscow, Transport Publ., 1979, 242 p.

19. *Proyektirovaniye raketnykh i stvol'nykh sistem* [Design of rocket and barrel systems]. Ed. by B. V. Orlov. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1974, 828 p.

20. Alferov V. V. Konstruktsiya i raschet avtomaticheskogo oruzhiya [Design and calculation of automatic weapons]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1977, 248 p.

21. Samarsky A. A., Nikolaev E. S. *Metody resheniya setochnykh uravneniy* [Methods for solving grid equations]. Moscow, Nauka Publ., 1978, 592 p.

22. Zarubin V. S., Stankevich I. V. *Raschet teplonapryazhennykh konstruktsiy* [Calculation of heat-stressed structures]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2005, 352 p.

23. Dulnev G. N., Parfenov V. G., Sigalov A. V. *Primeneniye elektronnykh vychislitel'nykh mashin dlya resheniya zadach teploobmena* [The use of electronic computers for solving heat transfer problems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990, 207 p.

24. Vlasova E. A., Zarubin V. S., Kuvyrkin G. N. *Priblizhennyye metody matematicheskoy fiziki* [Approximate methods of mathematical physics]. Moscow, MSTU named after N. E. Bauman Publ., 2001, 700 p.

25. *Zadachnik po tekhnicheskoy termodinamike i teorii teplomassoobmena* [Task book on technical thermodynamics and the theory of heat and mass transfer]. Ed. by V. I. Krutov and G. B. Petrazhitsky. St. Petersburg, BVH-Petersburg Publ., 2011, 384 p.

26. Stolyar S. E., Vladykin A. A. *Informatika*. *Predstavleniye dannykh i algoritmy*. [Informatics. Data representation and algorithms]. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2007, 382 p.

ⓒ Подкопаев А. В., Бабаджанов А. Б., Подкопаев И. А., Должиков В. И., 2022

Бабаджанов Азизулло Бахшиллоевич – адъюнкт; Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж). E-mail: azizullobabadzanov@mail.ru.

Подкопаев Илья Александрович – адъюнкт; Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж). E-mail: ilya.podkopaev.96@bk.ru.

Должиков Василий Иванович – кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры эксплуатации комплексов авиационного вооружения (и прицельных систем); Военный учебно-научный центр Военновоздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж). E-mail: Link707@mail.ru.

Podkopaev Aleksandr Vladimirovich – Cand. Sc., associate professor, professor of the department operation of aircraft weapon systems (and sighting systems); Air Force Military educational and scientific center "Air Force academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin" (Voronezh). E-mail: aleksanpodkopaev@mail.ru.

Babadzanov Azizullo Bakhshilloevich – adjunct; Air Force Military educational and scientific center "Air Force academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin" (Voronezh). E-mail: azizulloba-badzanov@mail.ru.

Podkopaev Ilya Aleksandrovich – adjunct; Air Force Military educational and scientific center "Air Force academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin" (Voronezh). E-mail: ilya.podkopaev.96@bk.ru.

Dolzhikov Vasily Ivanovich – Cand. Sc., associate professor, head of the department operation of aircraft weapon systems (and sighting systems); Air Force Military educational and scientific center "Air Force academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin" (Voronezh). E-mail: Link707@mail.ru.

Подкопаев Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры эксплуатации комплексов авиационного вооружения (и прицельных систем); Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж). E-mail: aleksanpodkopaev@mail.ru.

УДК 519.85 Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-227-240

Для цитирования: Рурич М. А., Вахнин А. В., Сопов Е. А. Сравнение эффективности различных подходов к формированию популяции при решении задач многокритериальной нестационарной оптимизации // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 2. С. 227–240. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-227-240.

For citation: Rurich M. A., Vakhnin A. V., Sopov E. A. [The comparison of efficiency of the population formation approaches in the dynamic multi-objective optimization problems]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 2, P. 227–240. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-227-240.

Сравнение эффективности различных подходов к формированию популяции при решении задач многокритериальной нестационарной оптимизации^{*}

М. А. Рурич, А. В. Вахнин, Е. А. Сопов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31 E-mail: mariar8@yandex.ru

Многокритериальная нестационарная оптимизация является недостаточно изученным на данный момент классом задач оптимизации, однако представляет собой большую практическую ценность. В задачах многокритериальной нестационарной оптимизации целевые функции, их параметры и ограничения, накладываемые на область поиска, изменяются во времени, из этого следует изменение решения задачи. При возникновении изменений в задаче алгоритму необходимо адаптироваться к изменениям таким образом, чтобы скорость сходимости к решению задачи была достаточно высокой. Работа посвящена сравнению эффективности использования трех разных подходов к формированию популяции при возникновении изменений в задаче многокритериальной нестационарной оптимизации: использование полученных на предыдушем шаге решений, случайная инициализация популяции и частичное использование предыдущих решений. В первой части статьи приводится классификация изменений, возникающих в задачах этого типа; рассматриваются существующие на данный момент подходы к решению задач, основанные на использовании эволюционных алгоритмов. В ходе исследования при решении задач многокритериальной нестационарной оптимизации используются алгоритмы многокритериальной оптимизации NSGA-2 и SPEA2, для сравнения подходов к формированию популяции используется набор тестовых задач. Полученные результаты были обработаны с помощью статистического критерия Манна – Уитни. Было выявлено, что скорость изменений в задаче влияет на эффективность использования при формировании популяции решений, полученных в предыдущий момент времени.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация в нестационарной среде, оптимизация в нестационарной среде, многокритериальная оптимизация, эволюционные алгоритмы.

^{*} Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № FEFE-2020-0013.

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within limits of state contract № FEFE-2020-0013.

The comparison of efficiency of the population formation approaches in the dynamic multi-objective optimization problems

M. A. Rurich, A. V. Vakhnin, E. A. Sopov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology 31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation E-mail: mariar8@yandex.ru

Dynamic multi-objective optimization problems are challenging and currently not-well understood class of optimization problems but this class is important since many real-world optimization problems are changing over time. In such problems, the objective functions, their parameters and restrictions imposed on the search space can change over time. This fact means that solutions of the problem change too. When changes appear in the problem, an optimization algorithm needs to adapt to the changes in such a way that the convergence rate is sufficiently high. The work is devoted to the comparison of the different approaches to formation of a new population when changes in the dynamic multi-objective optimization problem appear: using solution, which obtained in the previous step; using a random generating of the population; partial using solutions which obtained in the previous step. In the first part of the article the classification of the changes in the problems is provided; the currently existing approaches to solving the problems based on evolutionary algorithms are considered. During the research NSGA-2 and SPEA2 algorithms are used to solving the dynamic optimization problems, the benchmark problems set is used to the comparison of the approaches. Obtained results being processed by Mann–Whitney U-test. It was obtained that changes rate in the problem is affect to the efficiency of the application of the solutions which obtained in the previous step in the forming of the new population.

Keywords: dynamic multi-objective optimization, dynamic optimization, multi-objective optimization, evolutionary algorithms.

Введение

Многокритериальная оптимизация в нестационарной среде (dynamic multi-objective optimization, DMOO) является сложным и на данный момент недостаточно изученным классом задач оптимизации. В подобных задачах целевые функции, их параметры и ограничения, накладываемые на область поиска, могут изменяться во времени [1]. При этом целевые функции в данном случае представляют собой «черный ящик», следовательно, вид целевых функций и их свойства остаются неизвестными, а также отсутствует возможность вычисления производных, что значительно затрудняет выбор подходящего метода для решению задач, однако эти подходы могут обеспечить успешное решение задачи только в случае, если она имеет строго определенный вид – из этого следует, что необходимо продолжать исследование подходов для решения такого типа задач.

Многокритериальная нестационарная оптимизация

Задача DMOO может быть представлена как совокупность двух других задач оптимизации: задачи многокритериальной оптимизации (multi-objective optimization, MOO) и задачи оптимизации в нестационарной среде (dynamic optimization, DO).

Особенностью задачи многокритериальной оптимизации является наличие двух или более целевых функций, которые должны быть оптимизированы одновременно. Таким образом, при нахождении решения задачи необходимо учитывать значения всех целевых функций. Формально задача многокритериальной оптимизации может быть представлена как

$$\{f_1(\overline{x}), f_2(\overline{x}), \dots, f_k(\overline{x})\} \to \min_{\overline{x}} , \qquad (1)$$

где f_i – набор оптимизируемых функций; $i \in [1, k]$; k – количество целевых функций; x – вектор решения из допустимой области S.

Как было сказано выше, целевые функции в большинстве практических задач конфликтуют между собой, т. е. редко существует такое решение, которое было бы оптимальным сразу по всем целевым функциям. Зачастую приходится выбирать компромиссное решение, при котором значения целевых функций являются приемлемыми в некотором смысле, используя множество, оптимальное по Парето (МП) [2].

Множество прикладных задач оптимизации находятся в условиях, изменяющихся с течением времени. Такие задачи называются задачами оптимизации в нестационарной среде или задачами оптимизации, зависящими от времени (time-dependent optimization problems). Особенность задач DO заключается в том, что поисковое пространство задачи и ландшафт целевой функции изменяются с течением времени, а вместе с тем изменяется и оптимальное решение задачи [3].

Во многих публикациях, рассматривающих DO, для поиска решения такого типа задач предлагается использовать эволюционные алгоритмы (ЭА). Класс ЭА является хорошим инструментом для решения DO, поскольку эти алгоритмы вдохновлены естественными системами, которые постоянно находятся под воздействием изменяющихся факторов. ЭА оперируют популяцией решений, поэтому в том случае, когда оптимальное решение задачи изменяется, одно из имеющихся решений может быть достаточно близким к оптимальному.

Задача DO может быть формально определена следующим образом [3]:

$$f(\overline{x},\overline{a}(t)) \to \min_{\underline{n}},$$
 (2)

где f – целевая функция; x – вектор решения из поискового пространства; a(t) – вектор некоторых параметров целевой функции, изменяющихся во времени; $t \in [0, T]$ – интервал времени, в котором происходит рассмотрение задачи.

В практических задачах вектор a(t) может представлять собой параметры внешней среды (такие как, например, температура, доступные ресурсы и т. д.), которые оказывают влияние на целевую функцию. В искусственно сгенерированных тестовых задачах, например, в задачах с перемещаемыми областями экстремума – впадинами, это может быть параметр их глубины, ширины и расположения. Вектор a(t) также может включать в себя и другие изменяемые параметры, например, количество переменных целевой функции [4].

Большинство существующих работ по DO рассматривают эту задачу как последовательность задач на дискретном интервале времени $t \in \{0, ..., T\}$:

$$\{f(\overline{x},\overline{a}(1)) \to \min_{\overline{x}}, f(\overline{x},\overline{a}(2)) \to \min_{\overline{x}}, \dots, f(\overline{x},\overline{a}(T)) \to \min_{\overline{x}}\}.$$
(3)

Определение задачи DMOO может быть представлено следующим образом [4]:

$$\{f_1(\overline{x}, a(t)), f_2(\overline{x}, a(t)), \dots, f_k(\overline{x}, a(t))\} \to \min .$$
(4)

Сложность многокритериальной оптимизации в нестационарной среде заключается в том, что вместе с изменением задачи происходит изменение фронта Парето (ФП).

В публикациях, посвященных DMOO, приводятся различные способы классификации таких задач, в зависимости от вида изменений [4]:

 – классификация на основе скорости изменений. С увеличением скорости изменений уменьшается допустимое время для адаптации алгоритма к возникающим изменениям, что усложняет задачу;

 – классификация на основе степени изменений. Изменения могут быть значительными и незначительными. В случае незначительных изменений имеется возможность использования информации, полученной из предыдущего состояния;

 – классификация на основе предсказуемости изменений. Изменения могут быть регулярными (циклическими) и, как следствие, предсказуемыми, либо случайными (ациклическими); – Классификация на основе изменяемости ФП и МП. Этот вариант классификации включает в себя 4 типа задач: оптимальное МП изменяется, оптимальный ФП не изменяется; и оптимальное МП, и оптимальный ФП изменяются; оптимальное МП не изменяется, оптимальный ФП не изменяется; и оптимальное МП, и оптимальный ФП не изменяются. В последнем случае могут изменяться, например, только локальные экстремумы.

Можно выделить два способа учитывания происходящие в задаче изменения [5]:

1. Рассматривать каждое изменение как возникновение новой задачи оптимизации, которую необходимо решить с нуля.

2. Использовать информацию о предыдущем шаге поиска решения, чтобы ускорить процесс оптимизации после изменения.

При этом первый подход не всегда является подходящим из-за ограничений по времени. Во втором случае алгоритм должен быть способен адаптироваться к изменениям, т. е. должно присутствовать достаточное разнообразие в используемых решениях, чтобы алгоритм мог гибко реагировать на изменения.

В работах, посвященных DMOO, рассматриваются подходы к решению таких задач, основанные на существующих ЭА:

– подходы, основанные на введении механизмов в ЭА, способствующих увеличению разнообразия (diversity based [6,7]);

подходы, основанные на предсказании изменений в задаче (prediction based [8; 9]);

 подходы, основанные на использовании информации о предыдущем состоянии в задаче при поиске решения в текущем состоянии (memory based [10; 11]);

 подходы, основанные на использовании нескольких популяций, эволюционирующих параллельно друг другу и обменивающихся информацией (multi-population based [12; 13]).

Применение. ЭА для решения задач DMOO на данный момент недостаточно изучено, тогда как применение ЭА для решения задач MO развито значительно больше – для этого класса задач существует ряд широко применяемых методов, основанных на ЭА, таких как, например, NSGA-2 и SPEA2, которые позволяют аппроксимировать ФП с высокой точностью. Поэтому имеет смысл использования уже существующих методов МО при формировании подходов к решению задач DMOO.

Алгоритм NSGA-2

NSGA-2 (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm – генетический алгоритм сортировки недоминируемых решений) является одним из самых известных алгоритмов для решения задачи многокритериальной оптимизации. На рис. 1 схематично представлен принцип работы двух механизмов сортировки решений, использующихся в NSGA-2: сортировка недоминируемых решений (Non-dominated sorting) и сортировка по степени скученности (Crowding distance sorting) [14].

Сортировка недоминируемых решений заключается в следующем. Общая популяция R_t состоит из популяции родителей P_t и популяции их потомков Q_t , ее размер составляет 2N, где N – размер популяции. Далее решения в множестве R_t сортируются следующим образом: в подмножество F_1 включаются все недоминируемые решения (т. е. решения, для которых нет доминирующих решений в популяции) – это называется первым недоминируемым фронтом; в подмножество F_2 включаются решения, которые являются недоминируемыми в рамках множества $\{R_t / F_1\}$ (множество R_t , исключая подмножество F_1) – это называется вторым недоминируемым фронтом и т. д.

Далее происходит формирование новой популяции P_{t+1} : подмножества недоминируемых фронтов поочередно, начиная с первого, добавляются к популяции P_{t+1} до тех пор, пока размер подмножества очередного недоминируемого фронта не будет превышать доступный размер P_{t+1} . В этом случае производится сортировка решений по степени их скученности: для решения

і вычисляется расстояние до соседних решений (рис. 2). Таким образом в популяцию попадают разнообразные решения.



Рис. 1. Механизмы сортировки в NSGA-2 [14]

Fig.1. Procedure of sorting a population in NSGA-2 [14]



Рис. 2. Сортировка по степени скученности в NSGA-2 [14]

Fig. 2. Crowding distance sorting in NSGA-2 [14]

После чего к новой популяции *P*_{*t*+1} применяются операторы селекции, рекомбинации и мутации.

Алгоритм SPEA2

Алгоритм SPEA2 (Strength Pareto Evolutionary Algorithm) является так же одним из самых популярных алгоритмов многокритериальной оптимизации. Одной из его особенностей является то, что наряду с популяцией решений в алгоритме используется архив недоминируемых решений (external set – внешнее множество) [15]. Для поддержания заданного количества индивидов, хранящихся в архиве, выполняется их кластеризация по степени удаленности друг от друга, в результате чего в архиве остается только представитель кластера. Использование архива решений позволяет алгоритму лучше в сравнении с другими алгоритмами аппроксимировать фронт Парето.

Другой особенностью алгоритма является подсчет пригодности индивидов. Для начала каждому индивиду *i* в популяции P_t и во внешнем множестве P_t^* присваивается значение «силы» *S*, представляющее собой количество индивидов, которые доминируют над рассматриваемым индивидом [15]:

$$S(j) = \left| \{ j \mid j \in P_t + P_t^* \land i \succ j \} \right|, \tag{5}$$

где \succ означает доминирование по Парето. Однако высокое значение «силы» не гарантирует, что решение находится достаточно близко к фронту Парето. Поэтому далее вычисляется значение *R* для каждого индивида, которое является суммой значений «сил» индивидов, доминирующих над рассматриваемым,

$$R(i) = \sum_{j \in P_l + P_l^*, j \succ i} S(j) .$$
(6)

Таким образом, значение R = 0 соответствует недоминируемому решению (рис. 3):



Рис. 3. Ранжирование решений в SPEA2 [15]

Результирующая пригодность *F*(*i*) индивида вычисляется как величина, обратная к значению *R*:

$$F(i) = \frac{1}{1 + R(i)}.$$
(7)

После этого к популяции решений применяются операторы турнирной селекции, рекомбинации и мутации.

Описание численных экспериментов

При использовании алгоритма многокритериальной оптимизации задача нестационарной оптимизации в каждый момент времени *t* рассматривается как отдельная задача оптимизации. Возможны два варианта формирования начальной популяции при переходе от одного момента времени к следующему:

1. Инициализировать популяцию случайным образом, т. е. производить рестарт алгоритма.

2. Использовать популяцию решений, полученных в предыдущий момент времени.

3. Использовать популяцию решений, одна часть которых была получена в предыдущий момент времени, а другая – инициализирована случайным образом.

Необходимо проверить, имеется ли отличие в точности полученных решений и скорости сходимости между этими тремя способами. Далее эти способы будут рассмотрены на примере использования алгоритмов многокритериальной оптимизации NSGA-2 и SPEA2.

В качестве тестовых задач многокритериальной нестационарной оптимизации был взят набор задач CEC2018 Dynamic Multi-objective Optimization Benchmark Problems, который включает в себя задачи различного вида. В табл. 1 представлены характеристики задач, приведенных в [16].

Fig. 3. Ranking of solutions in SPEA2 [15]

Таблица 1

Задача	К-во ЦФ	Вид изменений	Примечания
DF1	2	Смешанная выпуклость-вогнутость, изменение положения оптимумов	Нестационарные ФП и МП
DF2	2	Изменение положений оптимумов	Стационарный выпуклый ФП, нестационарное МП
DF3	2	Смешанная выпуклость-вогнутость, изменение зависимости между пере- менными, изменение положения опти- мумов	Нестационарные ФП и МП
DF4	2	Изменение зависимости между пере- менными, изменение значений границ МП и ФП	Нестационарные ФП и МП
DF5	2	Изменение числа вогнутых и выгнутых областей, изменение положения опти- мумов	Нестационарные ФП и МП
DF6	2	Смешанная выпуклость-вогнутость, мультимодальность, изменение поло- жения оптимумов	Нестационарные ФП и МП
DF7	2	Изменение диапазона ФП и положения оптимумов	Нестационарные ФП и МП, стационарный центроид МП, выпуклый ФП
DF8	2	Смешанная выпуклость-вогнутость, изменение положения оптимумов, точ- ки МП имеют регулярную структуру распределения	Нестационарные ФП и МП, стацио- нарные центроиды МП, зависи- мость между переменными
DF9	2	Изменение числа несоединенных сег- ментов ФП и положения оптимумов	Нестационарные ФП и МП, зависи- мость между переменными
DF10	3	Смешанная выпуклость-вогнутость, изменение положения оптимумов	Нестационарные ФП и МП, зависи- мость между переменными
DF11	3	Изменение размера области ФП, диапа- зона ФП и положения оптимумов	Нестационарные ФП и МП, вогну- тый ФП, зависимость между пере- менными
DF13	3	Изменение числа несоединенных сег- ментов ФП, изменение положения оп- тимумов	Нестационарные ФП и МП, ФП может быть непрерывным вогнутым или выгнутым сегментом, либо не- сколькими несвязными сегментами
DF14	3	Изменение числа вогнутых и выгнутых областей, изменение положения опти- мумов	Нестационарные ФП и МП, зависи- мость между переменными

Вид задач изменяется в зависимости от значения параметра *t*. Момент времени *t* в тестовых задачах из данного набора определяется следующим образом:

$$t = \frac{1}{n_t} \left\lfloor \frac{\tau}{\tau_t} \right\rfloor,\tag{8}$$

где n_t – интенсивность изменений; $\tau = i \cdot n$; i – номер итерации задачи; n – количество итераций алгоритма оптимизации; τ_t – скорость изменений.

Для оценки точности полученных решений для задач многокритериальной оптимизации используется мера IGD (Inverted Generational Distance), которая показывает степень различия между исходным ФП P и найденным ФП P^* [17]. Для задач нестационарной многокритериальной оптимизации используется усредненная мера MIGD:

$$MIGD = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T} IGD(P_t^*, P_t) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{n_{P_t}} \frac{d_t^i}{n_{P_t}},$$
(9)

где $n_{Pt} = |P_t|$; d_t^i – эвклидово расстояние между *i*-м элементом P_t и ближайшим к нему элементом P_t^* ; T – количество итераций задачи.

Также используется мера *Hypervolume*, которая показывает степень удаленности фронта от некоторой наихудшей точки (reference point), которая задается вручную [18]. Для задач нестационарной многокритериальной оптимизации также используется усредненная мера MHV:

$$MHV = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T} HV_t(P_t^*), \qquad (10)$$

где HV_t – оператор гиперобъема. В [16] предлагается задавать наихудшую точку как ($z_1 + 0.5$, $z_2 + 0.5$, ..., $z_m + 0.5$), где z_j – максимальное значение *j*-й целевой функции в исходном $\Phi\Pi$ в момент времени *t*; *m* – число целевых функций.

При проведении численных экспериментов использовались следующие значения параметров тестовых задач:

- интенсивность изменений *n*_т равна 10;
- количество итераций задачи T равно 30;
- количество переменных задачи равно 10.

Численные эксперименты проводились с использованием двух разных значений скорости изменений τ_t : 10 (быстрые изменения) и 30 (медленные изменения) для того, чтобы проверить, дает ли лучший результат отсутствие рестарта при более медленных изменениях в задаче.

Также для алгоритмов NSGA-2 и SPEA2 размер популяции был задан равным 50 и число поколений равным 30. Каждая тестовая задача была решена 20 раз, результаты усреднялись.

Полученные результаты

В табл. 2 представлены средние значения метрики IGD для каждой тестовой задачи при медленной и быстрой скорости изменений и при использовании алгоритмов NSGA-2 и SPEA2. Между собой сравниваются результаты, полученные при использовании рестарта в алгоритме (инициализация популяции случайно), без использования рестарта (использование популяции, полученной в предыдущий момент времени) и с рестартом 50 % (одна половина популяции инициализируется случайно, а вторая половина является случайно отобранными решениями из популяции, полученной в предыдущий момент времени). В табл. 3 представлены средние значения метрики HV.

Обработка результатов производилась с помощью статистического критерия Манна – Уитни. Зеленым цветом выделены статистически наилучшие значения метрик (в рамках использованного алгоритма); выделение нескольких столбцов цветом означает, что различия между ними статистически незначимы.

Таблица 2

Медленные изменения								
Залана		NSGA-2		SPEA2				
Задача	С рестартом	Без рестарта	Рестарт 50 %	С рестартом	Без рестарта	Рестарт 50 %		
DF1	0,16626	0,05562	0,06047	0,35837	0,19831	0,14915		
DF2	0,4249	0,39807	0,34611	0,64654	0,51556	0,43324		
DF3	1,07812	0,46373	0,63423	1,48503	0,29893	0,31623		
DF4	1,70829	0,2219	0,23465	3,21155	0,31159	0,30098		
DF5	3,27418	2,86193	3,17044	3,54135	3,44858	3,16089		

Значения метрики IGD в зависимости от различной инициализации популяции при медленных и быстрых изменениях для алгоритмов NSGA-2 и SPEA2

Окончание табл. 2

Медленные изменения									
Залана		NSGA-2		SPEA2					
Задача	С рестартом	Без рестарта	Рестарт 50 %	С рестартом	Без рестарта	Рестарт 50 %			
DF6	5,82266	4,37637	3,9914	7,65581	10,31912	6,58776			
DF7	2,88988	0,21077	0,29967	0,57322	0,14004	0,16273			
DF8	0,4861	0,24668	0,46732	0,36439	0,06035	0,07962			
DF9	1,11271	1,00767	0,87972	1,00105	0,77221	0,35849			
DF10	0,63374	0,20805	0,28913	0,80103	0,16978	0,2983			
DF11	1,33799	1,20587	1,21676	1,52398	1,248	1,26458			
DF13	1,14789	0,82343	0,92381	1,99445	0,92517	0,59001			
DF14	1,96974	2,15505	2,46098	0,86397	0,24935	0,24797			
	Быстрые изменения								
20 1010	NSGA-2			SPEA2					
задача	С рестартом	Без рестарта	Рестарт 50 %	С рестартом	Без рестарта	Рестарт 50 %			
DF1	0,15418	0,37973	0,1188	0,34685	0,67789	0,23528			
DF2	0,43164	0,7622	0,3886	0,67347	0,98689	0,53114			
DF3	0,99878	0,8379	0,91423	1,4139	0,65215	0,59109			
DF4	1,75676	0,19023	0,20557	3,34937	0,30802	0,31553			
DF5	5,48928	5,47719	5,51248	5,78571	6,27579	6,03813			
DF6	5,83975	15,35728	7,55838	7,94478	19,964	7,73518			
DF7	3,71561	0,41029	0,66258	0,66013	1,09603	0,562			
DF8	0,4835	0,25431	0,46186	0,35465	0,07659	0,08844			
DF9	1,06701	1,91676	1,07585	0,99857	2,52754	0,94053			
DF10	0,55375	0,19654	0,24747	0,6755	0,15305	0,23408			
DF11	1,31739	1,21583	1,21464	1,51375	1,25063	1,2498			
DF13	1,11659	1,03303	0,91568	2,01859	3,41013	1,16391			
DF14	1.96235	2,78436	2,68979	0,85173	0,51699	0,4661			

Таблица 3

Значения метрики HV в зависимости от различной инициализации популяции при медленных и быстрых изменениях для алгоритмов NSGA-2 и SPEA2

Медленные изменения								
Залана		NSGA-2		SPEA2				
Эадача	С рестартом	Без рестарта	Рестарт 50%	С рестартом	Без рестарта	Рестарт 50%		
DF1	1,32092	1,54591	1,53165	0,96699	1,24592	1,34441		
DF2	1,15173	1,14765	1,2953	0,7926	0,96943	1,11871		
DF3	0,37984	0,84905	0,72257	0,14168	1,09988	1,07317		
DF4	4,05769	7,6282	7,58849	1,28999	7,3678	7,36317		
DF5	137,27398	139,51692	138,1649	111,54741	113,28194	113,31316		
DF6	0,18186	0,60413	0,61594	0,0376	0,21177	0,20861		
DF7	0,60904	2,95476	2,64463	2,05972	3,08956	3,00454		
DF8	0,82234	1,49508	0,94826	1,03271	1,73879	1,6861		
DF9	0,20507	0,39313	0,37082	0,3858	0,88429	1,05993		
DF10	1,37764	2,56913	2,39078	1,10203	2,6405	2,32359		
DF11	0,30304	0,50691	0,49764	0,07836	0,44429	0,41238		
DF13	7,55833	10,14608	8,68482	1,08663	3,19273	4,40662		
DF14	0,0873	0,06332	0,09364	0,1999	0,75084	0,73419		
			Быстрые измене	ния				
201010		NSGA-2		SPEA2				
Задача	С рестартом	Без рестарта	Рестарт 50 %	С рестартом	Без рестарта	Рестарт 50 %		
DF1	1,38279	1,07766	1,45141	1,02725	0,80304	1,22049		
DF2	1,14435	0,70886	1,20913	0,75946	0,5301	0,95102		

Запаца		NSGA-2		SPEA2			
Задала	С рестартом	Без рестарта	Рестарт 50% С рестартом		Без рестарта	Рестарт 50%	
DF3	0,43748	0,66908	0,60571	0,19885	0,19885	0,77118	
DF4	3,37641	6,5282	6,4919	0,94274	6,24129	6,20666	
DF5	294,16315	295,48085	295,87608	238,39456	236,6676	240,46001	
DF6	0,17802	0,29026	0,28404	0,03593	0,07157	0,12937	
DF7	0,97366	3,33281	2,84268	2,64918	3,08993	3,28456	
DF8	0,85182	1,51224	0,9437	1,0689	1,74353	1,70175	
DF9	0,24943	0,121	0,2484	0,40496	0,17604	0,45905	
DF10	1,72413	2,72373	2,60652	1,4608	2,79819	2,55707	
DF11	0,33402	0,53781	0,53404	0,08475	0,47655	0,45826	
DF13	7,66373	9,09398	8,21799	1,11795	1,1479	2,48469	
DF14	0,0907	0,04726	0,08153	0,2078	0,45549	0,44884	

Окончание табл. 3

Из представленных в таблице результатов видно, что в случае медленных изменений при решении большинства тестовых задач использование популяции, полученной на предыдущем шаге, является наиболее эффективным. Однако в случае быстрых изменений можно увидеть увеличение количества задач, при решении которых использование рестарта (либо полного, либо 50 %) является наиболее эффективным. Это связано с тем, что при быстрых изменениях состояние задачи на предыдущем шаге отличается от состояния на текущем шаге в большей степени в сравнении с медленными изменениями.

На рис. 4 приведены диаграммы значений рангов, присвоенных значению метрики для каждого из шести вариантов алгоритма и суммированных по всем тестовым задачам. Для наилучшего значения метрики присваивался наивысший ранг. Для обеспечения достоверности ранжирования была проведена проверка значимости различий в результатах с использованием критерия Манна – Уитни: критерий применялся к паре рядом стоящих по рангу результатов. Если различия незначимы, то этим двум результатам присваивалось среднее значение их рангов. Видно, что существенного различия между использованием алгоритма NSGA-2 и SPEA2 не наблюдается.



Рис. 4. Диаграммы значений суммарных рангов использованных алгоритмов

Fig. 4. Diagrams of the rank's values of the algorithms

На рис. 5 и 6 на примере двух тестовых задач показаны графики изменения значения метрик IGD и HV на каждой итерации алгоритма NSGA-2 при медленных (сверху) и быстрых (снизу) изменениях. Можно увидеть, что каждые 30 итераций алгоритма происходит резкий скачок значений метрик – в этот момент возникает изменение в задаче.



Рис. 5. Изменение значений метрик на примере задачи DF1 при медленных и быстрых изменениях Fig. 5. Changing values of IGD and HV metrics in DF1 problem in the cases of slow and fast changes



Рис. 6. Изменение значений метрик на примере задачи DF9 при медленных и быстрых изменениях Fig. 6. Changing values of IGD and HV metrics in DF9 problem in the cases of slow and fast changes

При быстрых изменениях в задачах DF1 и DF9 можно увидеть, что при отсутствии рестарта значение ошибки при возникновении изменений гораздо выше в сравнении с использованием рестарта. Также в задаче DF9 при медленных изменениях видно, что на первых итерациях алгоритма при отсутствии рестарта наблюдается низкое значение ошибки, однако на последующих шагах алгоритма ошибка увеличивается. Это говорит о том, что в рамках одной задачи необходимо использовать разные подходы в зависимости от степени возникающих изменений.

Заключение

На наборе тестовых задач многокритериальной нестационарной оптимизации с использованием алгоритмов NSGA-2 и SPEA2 были рассмотрены три подхода к формированию популяции при возникновении изменений в задаче. Было показано, что эффективность использования популяции решений, полученных в предыдущий момент времени, зависит от скорости изменений в задаче.

При медленных изменениях на большинстве тестовых задач лучший результат показывает подход, который подразумевает использование популяции, состоящей только из решений, полученных в предыдущий момент времени, поскольку вид задачи изменяется незначительно. Однако при быстрых изменениях не представляется возможным выделить по предпочтительности какой-либо подход из трех возможных, поскольку все три подхода имеют примерно одинаковое соотношение тестовых задач, в которых их использование было наиболее эффективным. Из этого следует необходимость отслеживания интенсивности происходящих в задаче изменений, и на основе этой информации делать выбор в пользу того или иного подхода формирования популяции.

Библиографические ссылки

1. Yazdani D., Cheng R. A Survey of Evolutionary Continuous Dynamic Optimization Over Two Decades–Part A // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2021. No. 25(4). P. 609–629.

2. Zhang J., Xing L. A Survey of Multiobjective Evolutionary Algorithms // 22017 IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE) and IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC), 2017.

3. Nguyen T. T., Yang S., Branke J. Evolutionary dynamic optimization: A survey of the state of the art // Swarm and Evolutionary Computation. 2012. No. 6. P. 1–24.

4. Azzouz R., Bechikh S., Ben Said L. Dynamic Multi-objective Optimization Using Evolutionary Algorithms: A Survey. Adaptation, Learning, and Optimization. 2016, P. 31–70.

5. Yazdani D., Cheng R. A Survey of Evolutionary Continuous Dynamic Optimization Over Two Decades–Part B. // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2021. No. 25(4). P. 630–650.

6. Li C., Yang S. A general framework of multipopulation methods with clustering in indetectable dynamic environments // IEEE Trans. Evol. Comput. 2012. No. 16(4). P. 556–577.

7. Deb K., Karthik S. Dynamic multi-objective optimization and decision-making using modified NSGA-II: a case study on hydro-thermal power scheduling. Lecture Notes in Computer Science. 2007. P. 803–817.

8. Muruganantham A., Tan K., Vadakkepat P. Evolutionary dynamic multiobjective optimization via kalman filter prediction // IEEE Trans. Evol. Comput. 2016. No. 46(12). P. 2862–2873.

9. Solving dynamic multi-objective problems with a new prediction-based optimization algorithm / Q. Zhang, S. Jiang, S. Yang, H. Song // PLoS ONE. 2021. No. 16(8).

10. Branke J. Memory enhanced evolutionary algorithms for changing optimization problems. Proceedings of the 1999 congress on evolutionary computation, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1999.

11. Goh C., Tan K. A competitive-cooperative coevolutionary paradigm for dynamic multiobjective optimization // IEEE Trans. Evol. Comput. 2009. No. 13(1). P. 103–127.

12. Branke J., Kaussler T., Smidt C., Schmeck H. A Multi-population approach to dynamic optimizaton problems. Evolutionary Design and Manufacture, Springer Science mathplus Business Media. 2000. P. 299–307.

13. Li C., Yang S. Fast Multi-Swarm Optimization for dynamic optimization problems. 2008 Fourth International conference on Natural Computation, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008.

14. Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II // Ieee transactions on evolutionary computation. 2002. No. 6 (2). P. 182–197.

15. Zitzler E., Laumanns M., Thiele L. SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm. Computer Engineering and Networks Laboratory (TIK), Department of Electrical Engineering, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, 2001.

16. Jiang S., Yang S., Yao X., Chen Tan K., Kaiser M. Benchmark Problems for CEC2018 Competition on Dynamic Multiobjective Optimisation. CEC2018 Competition, 2018.

17. Zhang Q., Yang S., Wang R. Novel Prediction Strategies for Dynamic Multiobjective optimization. *IEEE Trans. Evol. Comput.* 2020, 24(2), P. 260–274.

18. Rong M., Gong D., Pedrycz W., Wang L. A multimodel prediction method for dynamic multiobejctive evolutionary optimization. *IEEE Trans. Evol. Comput.* 2020, No. 24(2), P. 290–304.

References

1. Yazdani D., Cheng R. A Survey of Evolutionary Continuous Dynamic Optimization Over Two Decades–Part A. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2021, No. 25(4), P. 609–629.

2. Zhang J., Xing L. A Survey of Multiobjective Evolutionary Algorithms. 22017 IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE) and IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC), 2017.

3. Nguyen T. T., Yang S., Branke J. Evolutionary dynamic optimization: A survey of the state of the art. *Swarm and Evolutionary Computation*. 2012, No. 6, P. 1–24.

4. Azzouz R., Bechikh S., Ben Said L. Dynamic Multi-objective Optimization Using Evolutionary Algorithms: A Survey. Adaptation, Learning, and Optimization. 2016, P. 31–70.

5. Yazdani D., Cheng R. A Survey of Evolutionary Continuous Dynamic Optimization Over Two Decades–Part B. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2021, No. 25(4), P. 630–650.

6. Li C., Yang S. A general framework of multipopulation methods with clustering in indetectable dynamic environments. *IEEE Trans. Evol. Comput.* 2012, No. 16(4), P. 556–577.

7. Deb K., Karthik S. Dynamic multi-objective optimization and decision-making using modified NSGA-II: a case study on hydro-thermal power scheduling. Lecture Notes in Computer Science. 2007, P. 803–817.

8. Muruganantham A., Tan K., Vadakkepat P. Evolutionary dynamic multiobjective optimization via kalman filter prediction. *IEEE Trans. Evol. Comput.* 2016, No. 46(12), P. 2862–2873.

9. Zhang Q., Jiang S., Yang S., Song H. Solving dynamic multi-objective problems with a new prediction-based optimization algorithm. *PLoS ONE*. 2021, No. 16(8).

10. Branke J. Memory enhanced evolutionary algorithms for changing optimization problems. *Proceedings of the 1999 congress on evolutionary computation, Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 1999.

11. Goh C., Tan K. A competitive-cooperative coevolutionary paradigm for dynamic multiobjective optimization. *IEEE Trans. Evol. Comput.* 2009, No. 13(1), P. 103–127.

12. Branke J., Kaussler T., Smidt C., Schmeck H. A Multi-population approach to dynamic optimizaton problems. *Evolutionary Design and Manufacture, Springer Science mathplus Business Media*. 2000, P. 299–307.

13. Li C., Yang S. Fast Multi-Swarm Optimization for dynamic optimization problems. 2008 Fourth International conference on Natural Computation, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008.

14. Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. *Ieee transactions on evolutionary computation*. 2002, No. 6 (2), P. 182–197.

15. Zitzler E., Laumanns M., Thiele L. SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm. *Computer Engineering and Networks Laboratory (TIK), Department of Electrical Engineering, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich,* 2001.

16. Jiang S., Yang S., Yao X., Chen Tan K., Kaiser M. Benchmark Problems for CEC2018 Competition on Dynamic Multiobjective Optimisation. *CEC2018 Competition*, 2018.

17. Zhang Q., Yang S., Wang R. Novel Prediction Strategies for Dynamic Multiobjective optimization. *IEEE Trans. Evol. Comput.*, 2020, 24(2), P. 260–274.

18. Rong M., Gong D., Pedrycz W., Wang L. A multimodel prediction method for dynamic multiobejctive evolutionary optimization. *IEEE Trans. Evol. Comput.* 2020, No. 24(2), P. 290–304.

© Рурич М. А., Вахнин А. В., Сопов Е. А., 2022

Сопов Евгений Александрович – доктор технических наук, доцент; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: evgenysopov@gmail.com.

Рурич Мария Александровна – студентка группы МСД21-01; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: mariar8@yandex.ru.

Sopov Evgenii Aleksandrovich – PhD, Associate Professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: evgenysopov@gmail.com.

Vakhnin Alexey Valerevich – Graduate Student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: alexeyvah@gmail.com.

Rurich Maria Aleksandrovna – Master's Degree Student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: mariar8@yandex.ru.

Вахнин Алексей Валерьевич – аспирант; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: alexeyvah@gmail.com.





УДК 621.454.2 Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-242-261

Для цитирования: Арнгольд А. А., Зуев А. А., Толстопятов М. И., Дубынин П. А. Динамика потока на участках элементов тракта подачи турбонасосного агрегата жидкостных ракетных двигателей // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 2. С. 242–261. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-242-261.

For citation: Arngold A. A., Zuev A. A., Tolstopyatov M. I., Dubynin P. A. [Dynamics of the flow in the sections of the elements of the supply path of the turbopump unit of the LRE]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 2, P. 242–261. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-242-261.

Динамика потока на участках элементов тракта подачи турбонасосного агрегата жидкостных ракетных двигателей

А. А. Арнгольд¹, А. А. Зуев², М. И. Толстопятов², П. А. Дубынин^{2*}

¹АО «Красноярский машиностроительный завод»

Российская Федерация, 660123, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29 ²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31 *E-mail: pavel.dubynin@mail.ru

В работе исследуются участки динамически нестабилизированных течений, характерных для элементов проточных частей турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей; участки прямоугольного переменного сечения, цилиндрического переменного сечения, вращательных течений в полостях с неподвижными стенками, неподвижной и вращающейся стенками. К характерным элементам относятся: подводящие и отводящие аппараты, боковые полости между ротором и статором, полости гидродинамических уплотнений и элементы межлопаточного канала центробежных насосов и газовых турбин.

Ввиду характерных особенностей режимных и конструктивных параметров, начальные участки динамически нестабилизированных течений являются преобладающими в проточных частях агрегатов подачи. Данные участки оказывают существенное влияние на энергетические параметры агрегата и влияют на теплообменные процессы и, как следствие, на надежность элементов конструкций. В характерных элементах систем подачи реализуется как ламинарный, так и турбулентный режимы течения рабочего тела.

С использованием методов теории пространственного пограничного слоя, определены характерные параметры пограничного слоя, такие как: толщина динамического пограничного слоя, вытеснения и потери импульса. Получены зависимости для определения скорости ядра течения, необходимые для оценки потерь в зависимости от длины характерных участков. В целях достоверного определения энергетических параметров необходим корректный выбор законов трения и профилей скорости в пограничном слое и учет начального участка. Полученные зависимости учитывают профиль распределения скорости в пограничном слое на характерных участках для случаев ламинарного и турбулентного режимов.

Ключевые слова: участок динамически нестабилизированного течения, скорость, потери по длине, пространственный пограничный слой.

Dynamics of the flow in the sections of the elements of the supply path of the turbopump unit of the LRE

A. A. Arngold¹, A. A. Zuev², M. I. Tolstopyatov², P. A. Dubynin^{2*}

 ¹JSC "Krasnoyarsk Machine-Building Plant"
 29, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation ²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
 31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation *E-mail: pavel.dubynin@mail.ru

Sections of dynamically non-stabilized flows specific for elements of flow parts of turbo pump assemblies of liquid-propellant rocket engines are considered. Sections of cylindrical variable cross-section, rectangular variable cross-section, rotational flows in cavities with stationary walls, stationary and rotating walls are analyzed. Specific elements include: delivery and discharge assemblies, side cavities between rotor and stator, cavities of hydrodynamic seals and elements of interblade channel of centrifugal type pumps and gas turbines.

Due to specific features of operating and design parameters, initial sections of dynamically nonstabilized flows are dominant in flow parts of delivery assemblies. These sections have significant influence on energy parameters of the assembly and affect heat exchanging processes and, as a consequence, reliability of constructional elements. Both laminar and turbulent flow regimes of the working fluid are realized in specific elements of delivery systems.

With the use of methods of three-dimensional boundary layer theory, specific thicknesses of boundary layer such as thickness of dynamic boundary layer, displacement thickness and momentum loss thickness are determined. Dependences for determination of flow core velocities, necessary for evaluation of losses due to the length of specific sections, are obtained. Proper selection of friction laws and velocities profiles in the boundary layer and consideration of initial section is necessary for the purposes of reliable determination of energy parameters. Obtained dependences consider velocity distribution profile in the boundary layer on specific sections of laminar and turbulent regimes cases.

Keywords: section of dynamically non-stabilized flow, velocity, losses along the length, threedimensional boundary layer.

Введение

При проектировании и анализе конструкций агрегатов подачи жидкостных ракетных двигателей необходимо рассматривать пространственные течения в элементах гидравлического тракта. Гидравлический тракт представляет собой совокупность каналов различной формы. В турбонасосном агрегате (THA) – это полости турбин и насосов, а точнее – роторные и статорные элементы. При проведении анализа геометрических и режимных параметров гидравлического тракта газовых турбин и насосов THA выявлено, что в тракте в основном присутствуют участки динамически нестабилизированного течения (участки с развивающимся динамическим пограничным слоем). Данные участки характеризуются наличием ядра течения и развивающегося пограничного слоя δ , которое изменяется с координатой канала *x*.

В работах [1–7] показано влияние большинства проточных частей турбомашин на энергетические и массогабаритные характеристики, в том числе и на надежность агрегатов.

Исследуются течения в конструктивных элементах ТНА, компрессоров и газовых турбин: полость вращения между ротором и стенкой газовой турбины, подводящее устройство турбин, боковые полости вращения между рабочим колесом и стенкой корпуса лопаточного нагнетателя, полости гидродинамических уплотнений и т. п. В элементах гидравлического тракта присутствуют участки и каналы различной геометрии: цилиндрического переменного сечения, прямоугольного переменного сечения, вращательных течений с неподвижными и вращающимися образующими. Необходимо учитывать, как изменение скоростей рабочего тела, так и потери давления по длине канала. В связи с широким диапазоном режимных параметров течения в элементах энергетических установок жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) реализуются существенно различные параметры потока в пограничном слое (существенно различные эпюры распределения профиля скорости потока). В элементах и каналах систем подачи ЖРД могут реализовываться ламинарные и турбулентные режимы течения [8; 9]. В целях повышения точности и совершенствования расчетных методик необходимо более точно определять численные значения характерных величин пограничного слоя, влияющих как на потери в элементах проточного тракта, так и на энергетические и рабочие параметры турбомашин.

Элементы проточных частей представляют собой относительно короткие каналы с криволинейными поверхностями обтекания. Существуют различные методологические подходы к расчету, проектированию конструктивных элементов, моделированию энергетических параметров: использование критериальных зависимостей, численное моделирование и аналитический подход к решению уравнений динамики и энергии в приложении к теории пространственного пограничного слоя (ППС). У каждого методологического подхода существуют свои достоинства и недостатки.

Исследованиями течений и энергетических параметров в проточных частях занимались многие авторы. В работе [10] проводились численные исследования потерь энергии в проточной части, для прогнозирования поля течения использовались осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса (RANS) в сочетании с моделью турбулентности переноса касательных напряжений (SST). В работе [11] проведено численное моделирование на основе усредненного по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса (RANS) в сочетании с *k-w* моделью турбулентности, результаты моделирования подтверждаются экспериментальными данными. В работе [12] предложен метод оптимизации конструкции типового многоступенчатого центробежного насоса на основе модели потерь энергии и расчетной гидродинамики (ELM / CFD). Авторы [13] исследовали течение в ступенчатом микроканале, учитывали характеристики потока, такие как потери давления, профиль скорости, линии потока и коэффициент трения при различных условиях. В качестве недостатка для приведенных выше работ можно выделить то, что в них не учитывались потери на начальных участках течения рабочего тела в каналах агрегатов подачи.

Предложенные численные методы, в том числе и [14] требуют специализированного программного и аппаратного обеспечения и не всегда пригодны для инженерных методов расчета агрегатов подачи, особенно на стадии эскизного проектирования.

В работе [15] проведено экспериментальное исследование и установлена эмпирическая зависимость между коэффициентом трения и критерием Рейнольдса для ламинарного течения, что ограничивает область и диапазон доверительного использования.

В значительной степени на режим течения оказывает влияние начальный участок, и, как следствие, влияет на гидродинамические потери. На начальном участке, происходит развитие динамического и температурного пространственного пограничных слоев и наблюдается динамически нестабилизированное течение.

В работах авторов [16] предложен аналитический подход и отмечено, что на распределение параметров динамического пограничного слоя существенное влияние оказывают теплообменные процессы (так как параметр вязкости, в значительной степени зависящий от температуры), но также не учитывается влияние начального участка течения.

Задача идентификации динамического начального участка решалась многими авторами [17], тем не менее однозначным образом не решена до настоящего времени. Способы определения коэффициента длины гидродинамического участка, а именно, экспериментальные, аналитические и численного интегрирования уравнений движения, приводят к результатам, отличающимся между собой практически в 4 раза.

Постановка задачи исследования

При решении задачи достоверного определения параметров потока и гидравлических потерь на начальных динамически нестабилизированных участках, характерных проточным частям THA,

необходимо определить выражения для относительных характерных величин динамического пространственного пограничного слоя: толщины пограничного слоя, толщины вытеснения и толщины потери импульса, с учетом влияния распределения эпюры профиля скорости в пограничном слое.

Для определения скорости ядра потока в зависимости от длины канала необходимо учитывать наличие развивающегося пограничного слоя на начальном участке, а при определении эпюры профиля скорости в пограничном слое использовать функции распределения для ламинарного и турбулентного режимов течения.

Необходимо рассмотреть каналы, характерные для элементов проточных частей ТНА: цилиндрический канал переменного сечения; канал прямоугольного переменного сечения; полости вращательных течений с неподвижными стенками, неподвижной и вращающейся стенками, с учетом течения рабочего тела от центра к периферии и от периферии к центру.

1. Определение толщины динамического пограничного слоя

Для определения численных значений характерных величин динамического и температурного пограничных слоев (таких как толщина вытеснения, толщина потери импульса и толщина потери энергии), а также для расчета динамических и тепловых параметров технических систем, необходимо получить выражения для определения толщины динамического пограничного слоя, ламинарного и развитого турбулентного течений в зависимости от расстояния от входной кромки канала [18].

Рассмотрим уравнение количества движения пограничного слоя, полученное Т. Карманом:

$$\rho \frac{d}{dx} \int_{0}^{l} (U-u)u dy - \rho \frac{dU}{dx} \int_{0}^{l} u dy = \tau_{\omega} + l \frac{dp}{dx}.$$
(1)

Используя профили распределения скорости в пограничном слое и уравнение для интеграла количества движения (1), получим:

$$I = \rho \int_{0}^{l} (U - u) u dy = \rho U^{2} \int_{0}^{l} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U} \right) dy.$$
⁽²⁾

Верхний предел интегрирования заменим на толщину динамического пограничного слоя δ , так как для условия интегрирования $y \ge \delta$ скорости U = u и подынтегральное выражение обращается в нуль. Учитывая полученные выражения для толщин потери импульса для ламинарного и турбулентного течений

$$\int_{0}^{\delta} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U} \right) dy = \delta^{**},$$

запишем уравнение (2) в следующем виде:

$$I = \rho U^2 \delta^{**}.$$
 (3)

Ламинарный пограничный слой

Рассмотрим особенности ламинарного течения. Аппроксимируем распределение ламинарного динамического пограничного слоя функцией:

$$\frac{u}{U} = 1 - \left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^m,$$

с учетом полученного выражения для толщины потери импульса для продольного потока случая ламинарного течения в пограничном слое [8; 9] преобразуем уравнение (3):

$$I = \rho U^2 \delta^{**} = \rho U^2 \frac{\delta m}{(m+1)(2m+1)}.$$
 (4)

Согласно [18], касательное напряжение трения определим как

$$\tau_{\omega} = 0.332 \rho U^2 \left(\frac{\nu}{Ux}\right)^{\frac{1}{2}}.$$
(5)

Тогда, учитывая уравнение количества движения (4) и касательное напряжение трения (5), уравнение количества движения приводит к дифференциальному уравнению:

$$\rho U^2 \frac{m}{(m+1)(2m+1)} \frac{d\delta}{dx} = 0,332 \rho U^2 \left(\frac{\nu}{Ux}\right)^{\frac{1}{2}}.$$
 (6)

Проведя сокращение и разделив переменные, получим:

$$d\delta = \frac{0,332}{\frac{m}{(m+1)(2m+1)}} \left(\frac{v}{Ux}\right)^{\frac{1}{2}} dx \,. \tag{7}$$

После интегрирования уравнения (7) получим:

$$\delta = \frac{0,332 \cdot 2}{\frac{m}{(m+1)(2m+1)}} \left(\frac{v}{U}\right)^{\frac{1}{2}} x^{\frac{1}{2}} + C.$$
(8)

Исходя из граничных условий при x = 0, соответственно C = 0, тогда толщина ламинарного пограничного слоя в зависимости от расстояния от входной кромки:

$$\delta = \frac{0,664}{\frac{m}{(m+1)(2m+1)}} \left(\frac{v}{U}\right)^{\frac{1}{2}} x^{\frac{1}{2}} = \frac{0,664}{\frac{m}{(m+1)(2m+1)}} \frac{1}{\operatorname{Re}_{x}^{\frac{1}{2}}} x.$$
(9)

Выражение (9) определяет зависимость толщины динамического пограничного слоя в зависимости от координаты x (длины участка обтекания поверхности или элемента) и от параметра внешнего потока (критерия Re). На рис. 1 приведена графическая зависимость, определенная по выражению (9), для различных значений степеней распределения профиля динамического ламинарного пограничного слоя.



Рис. 1. Зависимость толщины ламинарного динамического слоя от степени профиля и координаты поверхности

Fig. 1. Dependence of laminar dynamic layer thickness from degree of profile and coordinate of surface

Из рис. 1 видно, что на начальном динамически нестабилизированном участке режим и параметры течения внешнего потока существенно влияют на параметр δ/x , что в свою очередь оказывает влияние на потери в пограничном слое и показывает необходимость учета начального участка. Отметим, что начальные динамически нестабилизированные участки характерны и являются преобладающими, в связи с геометрическими и режимными параметрами реализующихся в проточных частях агрегатов подачи ЖРД. Это объясняется относительно короткими участками и высокими скоростями потока: лопатки, рабочие диски, подводящие и отводящие аппараты турбин и насосов и др. Отметим, что при m = 2 значения, полученные по зависимости (9), совпадают с выражением, полученным Г. Шлихтингом.

Переход ламинарного пограничного слоя в турбулентный характеризуется формпараметром [18]

$$H = \frac{\delta^*}{\delta^{**}} \approx 2, 6. \tag{10}$$

Причем при переходе от ламинарного течения к турбулентному данный формпараметр уменьшается от значения 2,6 в ламинарной области до значения 1,4 в турбулентной области [18].

Турбулентный пограничный слой

Рассмотрим турбулентный пограничный слой, аппроксимируем распределение турбулентного динамического пограничного слоя функцией:

$$\frac{u}{U} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{\frac{1}{m}},\tag{11}$$

с учетом полученного выражения для толщины потери импульса для продольного потока случая турбулентного течения в пограничном слое получим [8; 9]:

$$I = \rho U^2 \delta^{**} = \rho U^2 \frac{\delta m}{(m+1)(m+2)}.$$
 (12)

Воспользуемся законом трения на пластине для турбулентного пограничного слоя согласно [30]:

$$\tau_{\omega} = 0,0225\rho U^2 \left(\frac{\nu}{U\delta}\right)^{\frac{1}{4}}.$$
(13)

1

Учитывая уравнение количества движения (12) и закон трения (5) уравнение количества движения приводит к дифференциальному уравнению:

$$\rho U^{2} \frac{m}{(m+1)(m+2)} \frac{d\delta}{dx} = 0,0225 \rho U^{2} \left(\frac{\nu}{U\delta}\right)^{\frac{1}{4}}.$$
 (14)

Произведя сокращение и разделив переменные, получим:

$$\delta^{\frac{1}{4}} d\delta = \frac{0,0225}{\frac{m}{(m+1)(m+2)}} \left(\frac{v}{U}\right)^{\frac{1}{4}} dx.$$
(15)

После интегрирования уравнения (15) и проведения дальнейшего преобразования, получим выражение для определения толщины турбулентного пограничного слоя в зависимости от расстояния от входной кромки:

$$\delta = \frac{0,0572}{\left(\frac{m}{(m+1)(m+2)}\right)^{\frac{4}{5}}} \left(\frac{\nu}{U}\right)^{\frac{1}{5}} x^{\frac{4}{5}} + C.$$
(16)
Если реализуется турбулентный пограничный слой сразу от переднего края, то исходя из граничных условий при x = 0 соответственно C = 0, тогда

$$\delta = \frac{0,0572}{\left(\frac{m}{(m+1)(m+2)}\right)^{\frac{4}{5}}} \left(\frac{\nu}{U}\right)^{\frac{1}{5}} x^{\frac{4}{5}} = \frac{0,0572}{\left(\frac{m}{(m+1)(m+2)}\right)^{\frac{4}{5}}} \left(\frac{1}{\operatorname{Re}_{x}}\right)^{\frac{1}{5}} x \,. \tag{17}$$

Отметим, что турбулентный пограничный слой образуется только на каком-то критическом расстоянии x_c от переднего края, т. е. при $x \neq 0$. В этой критической точке пограничный слой уже имеет определенную толщину, так как он реализуется при переходе от ламинарного пограничного слоя. Тогда из (16)

$$\delta = \frac{0,0572}{\left(\frac{m}{(m+1)(m+2)}\right)^{\frac{4}{5}}} \left(\frac{1}{\text{Re}_{\chi}}\right)^{\frac{1}{5}} x + k\delta_{\pi}, \qquad (18)$$

где *k* – коэффициент на который уменьшает пограничный слой при переходе от ламинарного к турбулентному из условия (10).

На рис. 2 приведена графическая зависимость, определенная по выражению (17) для различных значений степеней распределения профиля динамического турбулентного пограничного слоя.



Рис. 2. Зависимость толщины турбулентного динамического слоя от степени профиля и координаты поверхности

Fig. 2. Dependence of thickness of turbulent dynamic layer from profile degree and surface coordinate

Отметим, что зависимость, полученная по зависимости (17), совпадает с выражением, полученным Г. Шлихтингом. Но, как было отмечено, в проточных частях агрегатов подачи ЖРД параметры потока могут существенно различаться и, соответственно, меняться профиль эпюры динамического пограничного слоя, что влечет изменение параметров пограничного слоя.

Полученные выражения для определения толщин ламинарного (9) и динамического (17), (18) пограничных слоев необходимо использовать при определении относительных характерных толщин динамического пространственного пограничного слоя.

2. Определение скорости ядра потока на начальных участках динамически нестабилизированных течений в канале цилиндрической формы переменного сечения

Рассмотрим характерные параметры динамического пограничного слоя при течении в канале цилиндрической формы переменного сечения.

Отметим, что течение в цилиндрическом канале переменного сечения существенно отличается от течения на плоской пластине, это отличие заключается в наличии радиуса кривизны стенки, что влечет за собой существенное влияние на параметры динамического и, как следствие, температурного пограничных слоев. Отметим, что чем меньше радиус трубы, тем большее влияние будет оказано. Начальный участок развивающегося динамического слоя можно отнести к внутренней задаче, так как по длине канала происходит изменения скорости ядра потока $U_{(x)} \neq$ const. Изменение скорости ядра потока обуславливается как геометрическими особенно-

стями канала переменного сечения, так и наличием развивающегося динамического пограничного слоя (при внешней задаче скорость ядра потока $U_{(x)} = \text{const}$).

Отметим, что для канала основной характеристикой будет не толщина вытеснения, а площадь вытеснения, тогда скорость рабочего тела в ядре потока в зависимости от координаты xбудет определяться, как

$$U_{(x)} = U_0 \frac{R_1^2}{\left(R_2 - \delta^*\right)^2},$$
(19)

где U_0 – скорость потока при входе в канал.

Схематически течение на начальном участке в канале цилиндрической формы переменного сечения приведено на рис. 3. Рассматривается расширяющийся и сужающийся канал. Определим условие, что угол раскрытия образующей α не приводит к отрыву потока. Отметим, что канал цилиндрической формы постоянного сечения является частным случаем рассматриваемой задачи.



Рис. 3. Схема цилиндрического канала переменной формы

Fig. 3. Diagram of cylindrical channel of variable shape

Учитывая угол раскрытия образующей, уравнение (19) можно записать:

$$U_{(x)}\left(R-\delta^*\pm x\cdot\mathrm{tg}\alpha\right)^2=U_0R^2\,,\tag{20}$$

где *R* – начальный радиус канала, знак «+» при увеличивающейся площади проходного сечения канала (расширение), знак «-» при уменьшающейся площади проходного сечения канала (сужение).

Турбулентный режим

Для турбулентного режима течения, также как и для случая канала постоянного сечения, затруднительно получить аналитическое решение уравнения (20) и требуется численное решение относительно параметра скорости ядра потока $U_{(x)}$. С учетом выражения для толщины вытес-

нения [8; 9] запишем эти уравнения для расширяющегося канала:

$$U_{(x)}R^{2} - 2R \cdot A \cdot U_{(x)}^{\frac{4}{5}} + 2R \cdot x \cdot \text{tga} \cdot U_{(x)} + U_{(x)}^{\frac{3}{5}}A^{2} - 2 \cdot U_{(x)}^{\frac{4}{5}}A \cdot x \cdot \text{tga} + U_{(x)}x^{2}(\text{tga})^{2} = U_{0}R^{2}$$
(21)

и сужающегося канала

$$U_{(x)}R^{2} - 2R \cdot A \cdot U_{(x)}^{\frac{4}{5}} - 2R \cdot x \cdot \mathrm{tga} \cdot U_{(x)} + U_{(x)}^{\frac{3}{5}}A^{2} + 2 \cdot U_{(x)}^{\frac{4}{5}}A \cdot x \cdot \mathrm{tga} + U_{(x)}x^{2} (\mathrm{tga})^{2} = U_{0}R^{2}, \quad (22)$$

rge $A = \frac{0,0572(\nu)^{\frac{1}{5}}x^{\frac{4}{5}}}{\left(\frac{m}{(m+1)(m+2)}\right)^{\frac{4}{5}}(m+1)}.$

Ламинарный режим

Рассмотрим ламинарный режим течения в канале цилиндрической формы переменного сечения. Учитывая уравнение (20), (9) и толщины вытеснения запишем

– для расширяющегося канала:

$$U_{(x)}R^{2} - 2R(A)U_{(x)}^{\frac{1}{2}} + 2R \cdot x \cdot \text{tg}\alpha U_{(x)} + (A)^{2} - 2U_{(x)}^{\frac{1}{2}}(A) \cdot x \cdot \text{tg}\alpha + U_{(x)}(x \cdot \text{tg}\alpha)^{2} = U_{0}R^{2}; \quad (23)$$

- для сужающегося канала:

$$U_{(x)}R^{2} - 2R(A)U_{(x)}^{\frac{1}{2}} - 2R \cdot x \cdot \mathrm{tga}U_{(x)} + (A)^{2} + 2U_{(x)}^{\frac{1}{2}}(A) \cdot x \cdot \mathrm{tga} + U_{(x)}(x \cdot \mathrm{tga})^{2} = U_{0}R^{2}, \quad (24)$$

rge $A = \left(\frac{0,664(2m+1)}{m}(v)^{\frac{1}{2}}x^{\frac{1}{2}}\right).$

Определим корни уравнения (23) для расширяющегося цилиндрического канала:

$$U_{(x)l} = \frac{R^{2}U_{0} - A^{2} + \frac{2AR(A + RU_{0}^{\frac{1}{2}}) + 2A \cdot tg\alpha \cdot x(A + RU_{0}^{\frac{1}{2}})}{R + x \cdot tg\alpha}}{R^{2} + 2R \cdot tg\alpha \cdot x + x^{2}(tg\alpha)^{2}};$$
(25)

$$U_{(x)2} = \frac{R^2 U_0 - A^2 + \frac{2AR(A - RU_0^{\frac{1}{2}}) + 2A \cdot \text{tg}\alpha \cdot x(A - RU_0^{\frac{1}{2}})}{R + x \cdot \text{tg}\alpha}}{R^2 + 2R \cdot \text{tg}\alpha \cdot x + x^2 (\text{tg}\alpha)^2}.$$
 (26)

Проводя анализ полученных корней уравнения (23) и учитывая анализ, проведенный для цилиндрического канала постоянного сечения, оставляем только корень (25). Корень (26) не имеет физического смысла.

Определим корни уравнения (24) для сужающегося цилиндрического канала:

$$U_{(x)l} = \frac{R^{2}U_{0} - A^{2} + \frac{2AR(A + RU_{0}^{\frac{1}{2}}) - 2A \cdot tg\alpha \cdot x(A + RU_{0}^{\frac{1}{2}})}{R - x \cdot tg\alpha}}{R^{2} - 2R \cdot tg\alpha \cdot x + x^{2}(tg\alpha)^{2}};$$
(27)

$$U_{(x)2} = \frac{R^{2}U_{0} - A^{2} + \frac{2AR(A - RU_{0}^{\frac{1}{2}}) - 2A \cdot tg\alpha \cdot x(A - RU_{0}^{\frac{1}{2}})}{R - x \cdot tg\alpha}}{R^{2} - 2R \cdot tg\alpha \cdot x + x^{2}(tg\alpha)^{2}}.$$
 (28)

Проводя анализ полученных корней уравнения (24) для случая сужающегося канала оставляем только корень (27). Корень (28) не имеет физического смысла.

Полученные выражения для скорости ядра потока $U_{(x)}$ на некотором расстоянии x от входа в канал позволяют определять параметры пограничного слоя, в том числе и потери по длине канала.

3. Определение скорости ядра потока на начальных участках динамически нестабилизированных течений в канале прямоугольного переменного сечения

На рис. 4 приведена расчетная схема канала прямоугольного переменного сечения (расширяющийся и сужающийся канал). Геометрия канала, характерная для элементов подводящих и отводящих устройств турбин и центробежных насосов, элементов межлопаточного канала, каналов тракта охлаждения камеры ЖРД и др.



Рис. 4. Расчетная схема прямоугольного канала переменной геометрии

Fig. 4. The calculation diagram of rectangular channel with variable geometry

Запишем уравнения для определения скорости ядра потока на некотором расстоянии *x* от входа в канал:

$$U_{(x)} = U_0 a \cdot b / (a - \delta^* \pm x \cdot \mathrm{tg}\alpha \pm x \cdot \mathrm{tg}\beta) (b - \delta^* \pm x \cdot \mathrm{tg}\varphi \pm x \cdot \mathrm{tg}\gamma),$$
(29)

где знак «+» для расширяющегося канала, знак «-» для сужающегося канала. Или, проведя подстановку толщины вытеснения в (29), получим выражения для определения скорости ядра потока на расстоянии *x* от входа для турбулентного и ламинарного режима

$$U_{(x)} = U_0 \cdot a \cdot b \left/ \left(a - \frac{A}{U_{(x)}^{\frac{1}{5}}} \pm x \cdot \mathrm{tg}\alpha \pm x \cdot \mathrm{tg}\beta \right) \left(b - \frac{A}{U_{(x)}^{\frac{1}{5}}} \pm x \cdot \mathrm{tg}\varphi \pm x \cdot \mathrm{tg}\gamma \right),$$
(30)

где параметр *А* – для турбулентного и ламинарного режима определяется точно также, как и для канала цилиндрического переменного сечения. Уравнение (30) решается численно относительно скорости в ядре на некотором расстоянии *х* от входа в канал.

Приведем частный случай решения уравнения (30) для ламинарного режима течения для канала постоянного сечения прямоугольной формы

$$U_{(x)l} = U_0 + \frac{A^2}{2a^2} + \frac{A^2}{2b^2} + \frac{A\sqrt{A^2a^2 - 2A^2ab + A^2b^2 + 4U_0a^2b^2}}{2ab^2} + \frac{A\sqrt{A^2a^2 - 2A^2ab + A^2b^2 + 4U_0a^2b^2}}{2a^2b},$$
(31)

$$U_{(x)2} = U_0 + \frac{A^2}{2a^2} + \frac{A^2}{2b^2} - \frac{A\sqrt{A^2a^2 - 2A^2ab + A^2b^2 + 4U_0a^2b^2}}{2ab^2} - \frac{A\sqrt{A^2a^2 - 2A^2ab + A^2b^2 + 4U_0a^2b^2}}{2a^2b}.$$

При проведении анализа полученных корней уравнения оставляем только корень $U_{(x)1}$ для ламинарного течения в канале прямоугольной формы, корень уравнения $U_{(x)2}$ исключаем.

4. Определение скорости ядра потока на начальных участках динамически нестабилизированных течений в каналах полостей вращения переменного сечения

Рассмотрим канал полости вращения переменного сечения (рис. 5) с различными углами раскрытия образующих α и β. Данный тип каналов характерен прежде всего для полостей между рабочим диском газовых турбин и центробежных насосов и корпусом ТНА ЖРД, для полостей подводящих и отводящих каналов.



Рис. 5. Схема канала полостей вращения переменного сечения

Fig.5. Diagram of the rotation cavity channel of variable cross-section

Течения в полостях вращения представляет более сложный случай и требуется отдельно рассматривать вращательные течения с двумя неподвижными стенками (характерно вращательному течения по закону «свободного вихря» UR = const) и с неподвижной и вращающейся стенками (характерно вращательному течению по закону «твердого тела» $\frac{U}{R} = \text{const}$). Необхо-

димо учитывать течение от периферии к центру канала и от центра к периферии.

Примем следующие обозначения: U – окружная составляющая скорости ядра; V_R – расходная составляющая скорости ядра; C – абсолютная скорость ядра потока.

Тогда

$$C = \sqrt{U^2 + V_R^2} \; .$$

Рассмотрим следующие возможные случаи:

- 1. Вращательное течение с двумя неподвижными дисками.
- 1.1. Течение от центра к периферии:
- расширяющийся канал;
- сужающийся канал.
- 1.2. Течение от периферии к центру:
- расширяющийся канал;
- сужающийся канал.

- 2. Вращательное течение с неподвижной и вращающейся стенками.
- 2.1. Течение от центра к периферии:
- расширяющийся канал;
- сужающийся канал.
- 2.2. Течение от периферии к центру:
- расширяющийся канал;
- сужающийся канал.

4.1. Неподвижные стенки

Для расходной составляющей скорости при течении от центра к периферии при расширении знак (+) и сужении канала знак (-),

$$V_{R0} 2\pi R_1 z_1 = V_{Rx} 2\pi R_x \Big[z_1 \pm \text{tga} (R_x - R_1) \pm \text{tg} \beta (R_x - R_1) - \delta_{cm1}^* - \delta_{cm2}^* \Big],$$
(32)

где z_1 – нормальный зазор, соответствующий радиусу R_1 ; R_x – текущий радиус; δ_{cm1}^* , δ_{cm2}^* – толщина вытеснения на первой и второй стенках соответственно. Для упрощения примем $\delta_{cm1}^* = \delta_{cm2}^*$.

Учитывая толщину вытеснения, толщину динамического пограничного слоя (9) и уравнение (32), определим расходную составляющую для ламинарного режима:

$$V_{Rx} = \frac{V_{R0}R_{1}z_{1}}{R_{x}\left[z_{1} \pm \mathrm{tg}\alpha(R_{x} - R_{1}) \pm \mathrm{tg}\beta(R_{x} - R_{1}) - 2\left(\frac{0,664(2m+1)}{m \cdot V_{Rx}^{\frac{1}{2}}}(\nu)^{\frac{1}{2}}\left(R_{x}^{\frac{1}{2}} - R_{1}^{\frac{1}{2}}\right)\right)\right]}.$$
 (33)

Учитывая толщину вытеснения, толщину пограничного слоя (17) и уравнение (32), определим расходную составляющую для турбулентного режима:

$$V_{Rx} = \frac{V_{R0}R_{1}z_{1}}{R_{x}\left[z_{1} \pm \text{tg}\alpha(R_{x} - R_{1}) \pm \text{tg}\beta(R_{x} - R_{1}) - \frac{2 \cdot 0,0572(\nu)^{\frac{1}{5}}\left(R_{x}^{\frac{4}{5}} - R_{1}^{\frac{4}{5}}\right)}{\left(\frac{m}{(m+1)(m+2)}\right)^{\frac{4}{5}}(m+1) \cdot V_{Rx}^{\frac{1}{5}}}\right]}.$$
(34)

Для расходной составляющей скорости при течении от периферии к центру при расширении знак (+) и сужении канала знак (-)

$$V_{R0}2\pi R_2 z_2 = V_{Rx}2\pi R_x \Big[z_2 \pm \text{tga}(R_1 - R_x) \pm \text{tg}\beta(R_2 - R_x) - \delta_{cm1}^* - \delta_{cm2}^* \Big],$$
(35)

где z_2 – нормальный зазор соответствующий радиусу R_2 .

Учитывая (9) для ламинарного режима уравнение (35) и $\delta_{cm1}^* = \delta_{cm2}^*$, тогда

$$V_{Rx} = \frac{V_{R0}R_2z_2}{R_x \left[z_2 \pm \text{tg}\alpha (R_2 - R_x) \pm \text{tg}\beta (R_2 - R_x) - 2\left(\frac{0,664(2m+1)}{m \cdot V_{Rx}^{\frac{1}{2}}} (\nu)^{\frac{1}{2}} \left(R_x^{\frac{1}{2}} - R_2^{\frac{1}{2}}\right)\right) \right]}.$$
 (36)

Учитывая (17) для турбулентного режима уравнение (35),

$$V_{Rx} = \frac{V_{R0}R_{2}z_{2}}{R_{1}\left[z_{1} \pm tg\alpha(R_{2} - R_{x}) \pm tg\beta(R_{2} - R_{x}) - \frac{2 \cdot 0.0572(v)^{\frac{1}{5}}\left(R_{x}^{\frac{4}{5}} - R_{2}^{\frac{4}{5}}\right)}{\left(\frac{m}{(m+1)(m+2)}\right)^{\frac{4}{5}}(m+1) \cdot V_{Rx}^{\frac{1}{5}}}\right]}.$$
(37)

Рассмотрим окружную составляющую скорости *U* для вращательного течения с двумя неподвижными стенками. В данном случае необходимо определить зависимость

$$U = f(R)$$
.

Для потенциального течения воспользуемся распределением окружной составляющей скорости по закону «свободного вихря», тогда $UR = \text{const} = C_U$. Можно учесть изменение значения константы C_U по зависимости для одной стороны диска

$$\frac{dC_U}{dR} = -\frac{2\pi\tau_{0\alpha}R^2}{\rho\dot{V}} = -\frac{\tau_{0\alpha}R}{\rho ZV_R}.$$

Однако необходимо учитывать влияние окружной составляющей напряжения трения на стенке, которое при любом направлении движения потока снижает значение C_U . Тогда при наличии первоначальной закрутки потока $\omega = UR$:

- для окружной составляющей скорости при течении от центра к периферии

$$U_0 R_1 = U_x \left(R_x - R_1 \right) - 2\Delta C_U$$

или без учета потерь на трение, которое можно добавить при численном интегрировании,

$$U_{x} = \frac{U_{0}R_{1}}{(R_{x} - R_{1})};$$
(38)

- для окружной составляющей скорости при течении от периферии к центру

$$U_0 R_2 = U_x \left(R_2 - R_x \right) - 2\Delta C_U$$

или без учета потерь на трение

$$U_{x} = \frac{U_{0}R_{2}}{(R_{2} - R_{x})}.$$
(39)

Запишем уравнения для определения абсолютной скорости на некотором расстоянии от входа в полость для начального участка течения в полости с двумя неподвижными стенками:

1. Течение от центра к периферии для расширяющегося и сужающегося канала:

- ламинарное течение:

$$C_{x} = \sqrt{\left\{ \frac{U_{0}R_{1} - 2\Delta C_{U}}{(R_{x} - R_{1})}\right\}^{2} + \left\{ \frac{V_{R0}R_{1}z_{1}}{R_{x}\left[z_{1} \pm tg\alpha(R_{x} - R_{1}) \pm tg\beta(R_{x} - R_{1}) - \frac{1,328(2m+1)}{m \cdot V_{Rx}^{\frac{1}{2}}}(v)^{\frac{1}{2}}\left(R_{x}^{\frac{1}{2}} - R_{1}^{\frac{1}{2}}\right)\right]} \right\}^{2}; \quad (40)$$

- турбулентное течение:

_

_

$$C_{x} = \left(\frac{U_{0}R_{1} - 2\Delta C_{U}}{(R_{x} - R_{1})} \right)^{2} + \left(\frac{V_{0}R_{1} - 2\Delta C_{U}}{R_{x} - R_{1}} \right)^{2} + \left(\frac{V_{0}R_{1}z_{1}}{R_{x}} \right)^{2} R_{x} \left[z_{1} \pm tg\alpha(R_{x} - R_{1}) \pm tg\beta(R_{x} - R_{1}) - \frac{0,1144(\nu)^{\frac{1}{5}}\left(R_{x}^{\frac{4}{5}} - R_{1}^{\frac{4}{5}}\right)}{\left(\frac{m}{(m+1)(m+2)}\right)^{\frac{4}{5}}(m+1) \cdot V_{Rx}^{\frac{1}{5}}} \right)^{2} \right)^{2}.$$
(41)

2. Течение от периферии к центру для расширяющегося и сужающегося канала: – ламинарное течение:

$$C_{x} = \sqrt{\frac{\left(\frac{U_{0}R_{2} - 2\Delta C_{U}}{(R_{2} - R_{x})}\right)^{2} + \left(\frac{V_{R_{0}}R_{2}z_{2}}{R_{x}} \left[z_{2} \pm \text{tg}\alpha(R_{2} - R_{x}) \pm \text{tg}\beta(R_{2} - R_{x}) - \frac{1,328(2m+1)}{m \cdot V_{R_{x}}^{\frac{1}{2}}}(\nu)^{\frac{1}{2}} \left(R_{x}^{\frac{1}{2}} - R_{2}^{\frac{1}{2}}\right)\right]}\right)^{2}; (42)$$

- турбулентное течение:

$$C_{x} = \sqrt{\left| + \left(\frac{V_{0}R_{2} - 2\Delta C_{U}}{(R_{2} - R_{x})} \right)^{2} + \left(\frac{V_{0}R_{2} - R_{x}}{R_{1}} \right)^{2} + \left(\frac{V_{R0}R_{2}z_{2}}{R_{1}} \right)^{2} R_{1}^{4} \left[z_{1} \pm tg\alpha(R_{2} - R_{x}) \pm tg\beta(R_{2} - R_{x}) - \frac{0,1144(\nu)^{\frac{1}{5}} \left(\frac{R_{x}^{\frac{4}{5}} - R_{2}^{\frac{4}{5}}}{\left(\frac{m}{(m+1)(m+2)} \right)^{\frac{4}{5}}(m+1) \cdot V_{Rx}^{\frac{1}{5}}} \right] \right)^{2}} . (43)$$

4.2. Неподвижная стенка и вращающийся диск

Рассмотрим окружную составляющую скорости U для вращательного течения с неподвижной и вращающейся стенками. Определим зависимость

$$U = f(R)$$
.

В данном типе канала реализуется вращательное течение по закону «твердого тела», тогда $\frac{U}{R} = \text{const} = C_R$.

Можно учесть изменение значения по зависимости для стенки и диска

$$\frac{dC_R}{dR} = -\frac{2\pi\tau_{0\alpha}^{cm}R^2}{\rho\dot{V}} - \frac{2\pi\tau_{0\alpha}^{\mathcal{A}}R^2}{\rho\dot{V}} = -\frac{R}{\rho z V_R} \left(\tau_{0\alpha}^{cm} + \tau_{0\alpha}^{\mathcal{A}}\right):$$

- для окружной составляющей скорости при течении от центра к периферии

$$\frac{U_0}{R_1} = \frac{U_x}{\left(R_x - R_1\right)} - \Delta C_R$$

или без учета потерь на трение, которое можно добавить при численном интегрировании;

$$U_x = \frac{U_0 \left(R_x - R_1 \right)}{R_1}; \tag{44}$$

– для окружной составляющей скорости при течении от периферии к центру

$$\frac{U_0}{R_2} = \frac{U_x}{\left(R_2 - R_x\right)} - \Delta C_R$$

или без учета потерь на трение

$$U_{x} = \frac{U_{0}(R_{2} - R_{x})}{R_{2}}.$$
(45)

Запишем уравнения для определения абсолютной скорости на некотором расстоянии от входа в полость для начального участка течения в полости с двумя неподвижными стенками:

1. Течение от центра к периферии для расширяющегося и сужающегося канала:

– ламинарное течение:

$$C_{x} = \left\{ \begin{pmatrix} \left(\frac{U_{0}}{R_{1}} - \Delta C_{R}\right)(R_{x} - R_{1})\right)^{2} + \\ + \left(\frac{V_{R0}R_{1}z_{1}}{R_{x}\left[z_{1} \pm \operatorname{tga}(R_{x} - R_{1}) \pm \operatorname{tg\beta}(R_{x} - R_{1}) - \frac{1,328(2m+1)}{m \cdot V_{Rx}^{\frac{1}{2}}}(\nu)^{\frac{1}{2}}\left(R_{x}^{\frac{1}{2}} - R_{1}^{\frac{1}{2}}\right)\right] \right\}^{2}; \quad (46)$$

- турбулентное течение:

$$C_{x} = \left(\frac{\left(\frac{U_{0}}{R_{1}} - \Delta C_{R}\right)(R_{x} - R_{1})}{\left(\frac{V_{0}}{R_{1}} - \frac{V_{0}}{R_{1}}\right)^{2}} + \frac{\left(\frac{U_{0}}{R_{1}} - \frac{V_{0}}{R_{1}}\right)^{2}}{\left(\frac{V_{0}}{R_{1}} - \frac{R_{1}}{R_{1}}\right)^{2}} - \frac{1}{\left(\frac{W_{0}}{R_{1}} - \frac{V_{0}}{R_{1}}\right)^{2}} -$$

2. Течение от периферии к центру для расширяющегося и сужающегося канала: – ламинарное течение:

$$C_{x} = \sqrt{\left(\left(\frac{U_{0}}{R_{2}} - \Delta C_{R}\right)(R_{2} - R_{x})\right)^{2} + \left(\frac{V_{R0}R_{2}z_{2}}{R_{x}} \left[z_{2} \pm tg\alpha(R_{2} - R_{x}) \pm tg\beta(R_{2} - R_{x}) - \frac{1,328(2m+1)}{m \cdot V_{Rx}^{\frac{1}{2}}}(\nu)^{\frac{1}{2}} \left(R_{x}^{\frac{1}{2}} - R_{2}^{\frac{1}{2}}\right)\right] \right)^{2}; (48)$$

турбулентное течение:

$$C_{x} = \left(\frac{\left(\frac{U_{0}}{R_{2}} - \Delta C_{R}\right)(R_{2} - R_{x}}\right)^{2} + \left(\frac{U_{0}}{R_{2}} - A_{R}\right)\left(\frac{R_{2}}{R_{2}} - R_{x}\right) + \left(\frac{V_{R_{0}}R_{2}z_{2}}{R_{1}} - \frac{R_{1}}{R_{1}}\right)^{2} + \left(\frac{R_{2}}{R_{2}} - R_{x}\right) + \frac{1}{2} \left(\frac{R_{2}}{R_{2}} - R_{x}\right) - \frac{1}{2} \left(\frac{R_{2}}{R_{2}} - R_{x}\right) - \frac{1}{2} \left(\frac{R_{2}}{R_{2}} - R_{2}}\right)^{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{R_{2}}{R_{2}} - \frac{1}{2} \left(\frac{R$$

При одномерном течении в канале произвольного сечения, с учетом инерционной составляющей скорости ядра потока *dU/dx*, получено выражение для определения потерь давления: для каналов цилиндрического и прямоугольного сечений

 $\frac{dp}{dx} = -\rho U \frac{dU}{dx} - \frac{\tau_0}{F} \frac{dS}{dx} - \frac{p}{F} \frac{dF}{dx}$

и в принятых обозначениях для полостей вращения

$$\frac{dp}{dr} = -\rho U \frac{dU}{dr} - \frac{\tau_0}{F} \frac{dS}{dr} - \frac{p}{F} \frac{dF}{dr}$$

Величину гидравлического коэффициента трения можно оценить по зависимости Дарси в зависимости от режимов течения:

$$\xi = \frac{\Delta p}{\frac{L}{d}\rho \frac{\bar{u}^2}{2}},$$

где L – длина участка; Δp – потери давления на участке; d – гидравлический диаметр; \overline{u} – осредненная скорость потока по длине канала.

На рис. 6–11 приведены графические зависимости распределения динамических параметров для канала цилиндрической формы постоянного сечения, полученные по выражениям (9), (17), (21), (22), (25), (27) для ламинарного и турбулентного режимов течения рабочего тела.



Рис. 6. Зависимость относительной скорости потока от развития профиля для ламинарного течения в трубе на начальном участке







Fig. 7. Dependence of the relative flow velocity on the development of the profile for a turbulent flow in the pipe at the initial section



Рис. 8. Зависимость развития профиля от относительной длины начального участка для ламинарного течения в трубе





Рис. 10. Зависимость относительной скорости потока от относительной длины начального участка для ламинарного течения в трубе





Рис. 9. Зависимость развития профиля от относительной длины начального участка для турбулентного течения в трубе





Рис. 11. Зависимость относительной скорости потока от относительной длины начального участка для турбулентного течения в трубе



Графические зависимости, полученные для канала цилинрической формы постоянного сечения, хорошо согласуются с выражениями других авторов [18] при степени профиля для ламинарного течения m = 2 и турбулентного течения m = 7. Отметим, что в проточных частях ТНА степень профиля распределения скорости m не всегда принимает данные значения, а может существенно отличаться от данных параметров и изменяться для ламинарного течения в пределах m = 1-5 и для турбулентного режима m = 5-12 в зависимости от режимных параметров.

Заключение

Используя уравнение количества движения пограничного слоя, полученное Т. Карманом, и учитывая особенности профилей распределения скорости динамического пограничного слоя, а также касательные напряжения трения при ламинарном и турбулентном течениях для пластины, получены выражения для определения толщин динамического пограничного слоя для начальных участков динамически нестабилизированных течений в зависимости от координаты x. С учетом развивающегося динамического пограничного слоя для характерных начальных участков, элементов проточных частей ТНА определены выражения для оценки скорости потока в зависимости от длины канала и предложено выражение для оценки потерь. Полученные выражения также необходимы для определения длины участка динамически нестабилизированного течения при ламинарном и турбулентном течениях. Полученные зависимости верифицированы для канала цилиндрической формы постоянного сечения.

Библиографические ссылки

1. Киселев Ф. Д. Диагностика разрушений и оценка эксплуатационной работоспособности рабочих турбинных лопаток авиационных двигателей // Вестник Московского авиационного ин-та. 2019. Т. 26. № 4. С. 108–122.

2. Григорьев В. А., Загребельный А. О., Калабухов Д. С. Совершенствование параметрической модели массы газотурбинного двигателя со свободной турбиной для вертолетов // Вестник Московского авиационного ин-та. 2019. Т. 26. № 3. С. 137–143.

3. Милешин В. И., Семёнкин В. Г. Расчетное исследование влияния числа рейнольдса на характеристики первой типовой ступени компрессора высокого давления // Вестник Московского авиационного ин-та. 2018. Т. 25. № 2. С. 86–98.

4. Влияние центробежных массовых сил на теплоотдачу при обтекании потоком воздуха вогнутой поверхности с поперечными выступами/ А. В. Ильинков, Р. Р. Габдрахманов, В. В. Такмовцев, А. В. Щукин // Вестник Московского авиационного ин-та. 2018. Т. 25. № 1. С. 39–48.

5. Горелов Ю. Г., Строкач Е. А. Анализ закономерностей расчета коэффициента теплоотдачи от газа на входных кромках сопловых лопаток турбин высокого давления // Вестник Московского авиационного ин-та. 2016. Т. 23. № 1. С. 80–85.

6. Определение коэффициента теплоотдачи на пере лопатки турбины на нерасчётных режимах работы / М. А. Щербаков, Д. А. Воробьев, С. А. Маслаков, Ю. А. Равикович // Вестник Московского авиационного ин-та. 2013. Т. 20. № 3. С. 95–103.

7. Краева Е. М. Энергетические параметры высокооборотных насосов малого расхода // Вестник Московского авиационного ин-та. 2011. Т. 18. № 3. С. 104–109.

8. Дисковое трение при определении баланса мощностей турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей / А. А. Зуев, В. П. Назаров, А. А. Арнгольд, И. М. Петров // Вестник Пермского нац. исследоват. политехн. ун-та. Аэрокосмическая техника. 2019. № 57. С. 17–31.

9. Методика определения дискового трения малорасходных центробежных насосов / А. А. Зуев, В. П. Назаров, А. А. Арнгольд, И. М. Петров // СибЖНТ. 2019. Т. 20, № 2. С. 219–227. Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-2-219-227.

10. Numerical Research on the Energy Loss of a Single-Stage Centrifugal Pump with Different Vaned Diffuser Outlet Diameters./ F. Lai, X. Zhu, G. Li, L. Zhu, F. Wang // EnergyProcedia. 2019. Vol. 158. P. 5523–5528. Doi:10.1016/j.egypro.2019.01.592.

11. Numerical investigation of influence of the clocking effect on the unsteady pressure fluctuations and radial forces in the centrifugal pump with vaned diffuser / W. Jiang, G. Li, P. Liu, L. Fu // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 71. P. 164–171. Doi: 10.1016/ j.icheatmasstransfer.2015.12.025.

12. Efficient CFD evaluation of the NPSH for centrifugal pumps / M. Lorusso, T. Capurso, M. Torresi et al. // Energy Procedia. 2017. Vol. 126. P. 778–785. Doi:10.1016/j.egypro.2017.08.262.

13. Optimal design of multistage centrifugal pump based on the combined energy loss model and computational fluid dynamics / C. Wang, W. Shi, X. Wang et al. // AppliedEnergy. 2017. Vol. 187. P. 10–26. Doi:10.1016/j.apenergy.2016.11.046.

14. Bakhshan Y., Omidvar A. Calculation of friction coefficient and analysis of fluid flow in a stepped micro-channel for wide range of Knudsen number using Lattice Boltzmann (MRT) method. // Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications. 2015. Vol. 440. P. 161–175. Doi:10.1016/j.physa.2015.08.012.

15. Numerical study of laminar flow and friction characteristics in narrow channels under rolling conditions using MPS method / M. A. Basit, W. Tian, R. Chen et al. // Nuclear Engineering and Technology. 2019. Doi:10.1016/j.net.2019.06.001.

16. Галактионов А. Ю., Хлупнов А. И. Численный расчет нестационарных аэродинамических характеристик цилиндрических моделей в условиях сверхзвукового ламинарного обтекания // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 5. С. 4–13. Doi: 10.18698/0236-3941-2015-5-4-13.

17. Афанасьев В. Н., Егоров К. С., Кон Дехай. Верификация моделей турбулентности при анализе структуры турбулентного пограничного слоя около прямоугольного выступа на пластине // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2018. № 6. С. 72–89. Doi: 10.18698/0236-3941-2018-6-72-89.

18. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя М. : Наука, 1974. 712 с.

References

1. Kiselev F. D. [Fracture diagnostics and operational workability evaluation of working turbine blades of aircraft engine]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo institute*. 2019, Vol. 26, No. 4, P. 108–122.

2. Grigor'ev V. A., Zagrebel'nyi A. O., Kalabuhov D. S. [Updating parametric gas turbine engine model with free turbine for helicopters]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo institute*. 2019, Vol. 26, No. 3, P. 137–143.

3. Mileshin V. I., Semenkin V. G. [Computational study of reynolds number effect on the typical first stage of a high-pressure compressor]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo institute*. 2018, Vol. 25, No 2, P. 86–98.

4. Ilinkov A. V., Gabdrakhmanov R. R., Takmovtsev V. V., Shchukin A. V. [Influence of centrifugal mass forces on heat transfer during air flow around a concave surface with transverse protrusions]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo institute*. 2018, Vol. 25, No. 1, P. 39–48.

5. Gorelov Yu. G., Strokach E. A. [Analysis of regularities of calculation of the heat transfer coefficient from gas at the inlet edges of the nozzle blades of high-pressure turbines]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo institute*. 2016, Vol. 23, No. 1, P. 80–85.

6. Shcherbakov M. A., Vorobyev D. A., Maslakov S. A., Ravikovich Yu. A. [Determination of the heat transfer coefficient on the turbine blade at off-design operating conditions]. *Vestnik Mosk-ovskogo aviatsionnogo institute*. 2013, Vol. 20, No. 3, P. 95–103.

7. Kraeva E. M. [Energy parameters of high-speed pumps of low flow]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo institute*. 2011, Vol. 18, No. 3, P. 104–109.

8. Zuev A. A., Nazarov V. P., Arngold A. A., Petrov I. M. [Disk friction in determining the balance of power turbopump rocket engine]. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*. 2019, No. 57, P. 17–31.

9. Zuev A. A., Nazarov V. P., Arngold A. A., Petrov I. M. [The method of the disk friction determining of low mass flow centrifugal pumps]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2019, Vol. 20, No. 2, P. 219–227. Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-2-219-227.

10. Lai F., Zhu X., Li G., Zhu L., Wang F. Numerical Research on the Energy Loss of a Single-Stage Centrifugal Pump with Different Vaned Diffuser Outlet Diameters. *Energy Procedia*. 2019, Vol. 158, P. 5523–5528. Doi:10.1016/j.egypro.2019.01.592.

11. Jiang W., Li G., Liu P., Fu L. Numerical investigation of influence of the clocking effect on the unsteady pressure fluctuations and radial forces in the centrifugal pump with vaned diffuser. *Interna*-

tional Communications in Heat and Mass Transfer. 2016, Vol. 71, P. 164–171. Doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2015.12.025.

12. Lorusso M., Capurso T., Torresi M., Fortunato B., Fornarelli F., Camporeale S. M., Monteriso R. Efficient CFD evaluation of the NPSH for centrifugal pumps. *Energy Procedia*. 2017, Vol. 126. P. 778–785. Doi:10.1016/j.egypro.2017.08.262.

13. Wang C., Shi W., Wang X., Jiang X., Yang Y., Li W., Zhou L Optimal design of multistage centrifugal pump based on the combined energy loss model and computational fluid dynamics. *Applied Energy*. 2017. Vol. 187. P. 10–26. Doi:10.1016/j.apenergy.2016.11.046.

14. Bakhshan Y., Omidvar A. Calculation of friction coefficient and analysis of fluid flow in a stepped micro-channel for wide range of Knudsen number using Lattice Boltzmann (MRT) method. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*. 2015, Vol. 440, P. 161–175. Doi: 10.1016/j.physa.2015.08.012.

15. Basit M. A., Tian W., Chen R., Qiu S., Su G. Numerical study of laminar flow and friction characteristics in narrow channels under rolling conditions using MPS method. *Nuclear Engineering and Technology*. 2019. Doi:10.1016/j.net.2019.06.001.

16. Galaktionov A. Yu., Khlupnov A. I. [Numerical calculation of unsteady aerodynamic characteristics of cylinder models for supersonic laminar flow]. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N. E. Baumana.* 2015, No. 5, P. 4–13. Doi: 10.18698/0236-3941-2015-5-4-13.

17. Afanas'ev V. N., Egorov K. S., Kong Dehai [Turbulence Model Validation During Analysis of the Turbulent Boundary Layer Structure near a Rectangular Ridge on a Plate]. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N. E. Baumana, Mashinostr.* 2018, No. 6, P. 72–89. Doi: 10.18698/0236-3941-2018-6-72-89.

18. Shlikhting G. *Teoriya pogranichnogo sloya* [The theory of the boundary layer]. Moscow, Science Publ., 1974, 712 p.

Ф Арнгольд А. А., Зуев А. А., Толстопятов М. И., Дубынин П. А., 2022

Дубынин Павел Алексеевич – аспирант кафедры двигателей летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: pavel.dubynin@mail.ru.

Arngol'd Anna Anatol'evna – Head of the bureau of special connectors, devices and equipment consoles; JSC "Krasnoyarsk Machine Building Plant". E-mail: arngoldanna@mail.ru.

Zuev Aleksandr Aleksandrovich – Dr Sc, associate professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: dla2011@inbox.ru.

Tolstopyatov Mikhail Igorevich – Cand. Sc., associate professor of the department Aircraft Engines; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: 89130399999@mail.ru.

Dubynin Pavel Alekseevich – post-graduate student of the Department Aircraft Engines; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: pavel.dubynin@mail.ru.

Арнгольд Анна Анатольевна – начальник бюро спецсоединителей, приборов и пультов аппаратуры; AO «Красноярский машиностроительный завод». E-mail: arngoldanna@mail.ru.

Зуев Александр Александрович – доктор технических наук, доцент; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: dla2011@inbox.ru.

Толстопятов Михаил Игоревич – кандидат технических наук, доцент кафедры двигателей летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: 89130399999@mail.ru.

УДК 551.46.09 Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-262-272

Для цитирования: Карцан И. Н., Жуков А. О. Малые космические аппараты для зондирования морской поверхности // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 2. С. 262–272. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-262-272.

For citation: Kartsan I. N., Zhukov A. O. [Small satellites for sea surface sounding]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 2, P. 262–272. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-262-272.

Малые космические аппараты для зондирования морской поверхности^{*}

И. Н. Карцан^{1, 2, 3, 4*}, А. О. Жуков^{4, 5}

¹Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31
 ²Морской гидрофизический институт РАН
 Российская Федерация, 299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
 ³Севастопольский государственный университет
 Российская Федерация, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
 ⁴Экспертно-аналитический центр
 Российская Федерация, 109316, г. Москва, ул. Талалихина, 33/4
 ⁵Институт астрономии Российской академии наук
 Российская Федерация, 119017, г. Москва, ул. Пятницкая, 48
 *E-mail: kartsan2003@mail.ru

В статье представлен метод обработки сигналов радиолокационного зондирования подстилающей поверхности с применением подсвета от имеющихся космических аппаратов (навигационных, связных) и группировки малых приёмных космических аппаратов (МКА), использующих антенны с синтезированной апертурой.

Методы и результаты. Малые космические аппараты обладают многими преимуществами перед большими спутниками. Так, они относительно недорогие в создании, занимают минимально время от проектирования до вывода на орбиту, легко модифицируются для решения определенной задачи, создают меньше радиопомех. Рассматриваемый подход заключается в перераспределении решаемых задач между группировкой спутников, находящихся на орбите. В качестве носителей передатчиков для подсветки подстилающейся поверхности, представлены, как штатные высокоорбитальные спутники связи, так и низкоорбитальные спутниковые системы связи, а также навигационные спутники. Данные космические системы используют необходимый широкополосный сигнал. Приемники отраженных сигналов размещаются на борту малых космических аппаратов. Одной из задач системы является выполнение научно-исследовательских экспериментов, заключающихся, в том числе, в оперативном мониторинге быстро перемещающихся атмосферных циклонов. В работе применяется метод формирования радиолокационного изображения морской поверхности, основываясь на моделях отраженных сигналов. Основные результаты исследований заключаются в следующем: 1) возможность в качестве зондирующего сигнала использовать как импульсный, так и широкополосный сигнал с априорно неизвестным законом модуляции; 2) приемлемая

^{*} Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России по теме «Разработка новых методов автономной навигации космических аппаратов в космическом пространстве» 121102600068-5.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0005.

The work was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation on the topic "Development of new methods for autonomous navigation of spacecraft in outer space" 121102600068-5. The work was carried out within the framework of the state assignment on topic No. 0555-2021-0005.

разрешающая способность; 3) возможность существенного уменьшения стоимости системы по сравнению с действующими космическими радиолокаторами обзора морской поверхности.

Выводы. В результате использования многопозиционной радиолокационной системы, использующей малые приёмные антенны с синтезированной апертурой и подсвет морской поверхности от действующих космических аппаратов, представляется возможным перейти на качественно новый уровень решения задач дистанционного зондирования морской поверхности с пространственным разрешением до 1 м, независимо от освещенности и наличия облачного покрова.

Ключевые слова: малые космические аппараты, приёмные антенны с синтезированной апертурой, прожекторный режим обзора, радиолокационное изображение морской поверхности.

Small satellites for sea surface sounding

I. N. Kartsan^{1, 2, 3, 4*}, A. O. Zhukov^{4, 5}

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
 31, Krasnoiarskii Rabochi Prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
 ²Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences
 2, Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation
 ³Sevastopol State University
 33, University St., Sevastopol, 299053, Russian Federation
 ⁴Expert and Analytical Center
 33/4, Talalikhina St., Moscow, 109316, Russian Federation
 ⁵Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences
 48, Pyatnitskaya St., Moscow, 119017, Russian Federation
 *E-mail: kartsan2003@mail.ru

The paper presents a method of processing signals of radar sensing of the underlying surface using illumination from existing spacecraft (navigation, communication) and a constellation of small receiving spacecraft using synthetic aperture antennas.

Methods and Results. Small spacecraft have many advantages over large satellites. Thus, they are relatively inexpensive to build, take minimal time from design to launch, can be easily modified to solve a particular problem, and create less radio interference. The approach under consideration consists in redistribution of tasks to be solved between the constellation of satellites in orbit. Both regular high-orbit communication satellites and low-orbit satellite communication systems, as well as navigation satellites are represented as transmitter carriers (underlying surface illumination). These space systems use the necessary broadband signal. Receivers of reflected signals are placed onboard small spacecrafts, and one of the tasks of the system is to perform research experiments, including on-line monitoring of fast-moving atmospheric cyclones. The work applies the method of sea surface radar imaging based on reflected signal models. The main results of the research are as follows: (1) possibility to use as a probing signal both a pulse and a broadband signal with a priori unknown modulation law, (2) acceptable resolution, (3) possibility to significantly reduce the system cost as compared to the existing space radars of sea surface survey.

Conclusions. As a result of using a multi-position radar system, which uses small receiving antennas with synthetic aperture and sea surface illumination from operating spacecraft, it is possible to move to a qualitatively new level of solving problems of sea surface remote sensing with spatial resolution up to 1 meter, regardless of illumination and cloud cover presence.

Keywords: small spacecraft, receiving antennas with synthetic aperture, floodlight view mode, radar imaging of the sea surface.

Введение

С начала освоения космического пространства было запущено большое количество спутников дистанционного зондирования и проведено огромное число экспериментов, касающихся оценки возможностей использования новых методов для глобального мониторинга объектов суши и океана. Изучение Мирового океана более эффективными методами полностью ложится в план реализации «Десятилетия наук об океане в интересах устойчивого развития» (2021–2030 гг.) и поставлено в ряд важнейших проблем науки и техники, что связано с его возросшим значением в жизни человечества. Однако, несмотря на все возрастающую интенсивность изучения океана, уровень сегодняшних знаний о протекающих в нем процессах далеко не соответствует практическим потребностям. Для более детального и оперативного мониторинга нестационарных процессов в Мировом океане с диагностикой их параметров возрастает потребность в получении информации о протекающих процессах с минимальным временем повторяемости формируемых изображений.

В настоящее время термин «малый космический аппарат» (МКА) определяет не только массогабаритные характеристики, но и принципиально новую постоянно прогрессирующую архитектуру построения. Архитектура построения МКА определяет собственно массогабаритные размеры, стоимостные характеристики, персональную (полезную нагрузку), аппаратуру пользователя, систему запуска (как при создании группировки, так и при оперативном восполнении) и систему оперативного управления в реальном масштабе времени [1–3]. В разряд МКА также по весовым габаритам относятся наноспутники (вес от 1 до 10 кг), пикоспутники (вес от 100 г до 1 кг), фемтоспутники (вес до 100 г). Данные вид МКА из-за минимальной мощности электропитания в представленной работе не рассматривается.

Применение МКА позволит перейти на боле высокий продуктивный уровень решения поставленных задач дистанционного зондирования за счет возможности оперативного развертывания или замены группировки МКА. Применение радиолокатора бокового обзора с синтезированной апертурой подтверждается одним из первых экспериментов в истории на космическом аппарате Seasat. Основной целью эксперимента являлась оценка степени всепогодности микроволновых методов исследования Мирового океана, обработка методов и алгоритмов комплексных измерений гидрометрологических параметров и обработки данных [4]. Радиолокатор бокового обзора с синтезированной апертурой в представленном эксперименте работал в *L*-диапазоне на рабочей частоте 1,275 ГГц с полосой захвата на местности шириной 100 км по правому борту с центром 20° от надира. Синтезирование апертуры позволяло получать пространственное разрешение на местности 25 м.

Отличительной особенностью исследования океанов из космоса является то, что они часто закрыты облаками, метод синтезированной апертуры в этом смысле дает возможность преодолеть недостатки оптических систем зондирования. Представленный метод в перспективе позволил одновременно получать независимые многоракурсные радиолокационные изображения наблюдаемого участка для измерений: статистических характеристик высоты, длины и энергетических спектров океанических волн; топографии поверхности моря, которая является информацией о геоиде, штормовых волнах, приливах, океанических течениях, а также в определении размеров и природе морского льда [5; 6].

На сегодняшний день действующие радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны (PCA) космического базирования имеют относительно большие размеры антенн (4–15 м), суммарный вес аппаратуры достигает 500 кг.

Режимы обзора малыми космическими аппаратами с синтезированной апертурой антенны

Поверхность моря имеет особенности, которые включают многочисленные (если не все) характеристики других поверхностей. Поскольку речь идет о радиолокаторе, процесс рассеяния имеет место только на поверхности или очень близко от нее, так как глубина проникновения электромагнитного излучения на рабочих частотах радиолокатора с синтезированной апертурой очень мала. Способы моделирования морской поверхности можно разделить на три категории: почти ровные поверхности, очень грубые поверхности и комбинирования первых двух. Различие между почти ровной и очень грубой поверхностям производится в зависимости от того, велика или мала длина волны падающего излучения по сравнению с отклонением поверхности от некоторой средней плоскости. Почти ровные поверхности успешно анализировались решением уравнения Максвелла на границе раздела при приблизительном удовлетворении граничных условий. Единственно успешным подходом в случае очень грубых поверхностей является аналогия с физической оптикой. Однако этот метод имеет серьезный недостаток: он не учитывает эффектов затемнения или многократного рассеивания. Более того, нарушается необходимое условие – радиусы кривизны поверхности должны быть больше по сравнению с длинной волны падающего излучения и при этом трудно учесть эффект деполяризации.

В связи со сложным влиянием факторов, определяющих работу космических систем с РСА, выбор оптимальных параметров является сложной инженерной задачей. Техническое задание для РСА обычно определяет орбитальную высоту, требуемую дальность и разрешение по азимуту, зону захвата и полосу (полосу настройки зоны захвата), а также конструктивные характеристики и энергопотребление. Расчет выполняется путем последовательного приближения. Максимальный горизонтальный размер антенны $Dr < 2\delta X$, который может быть задан конструктивными соображениями или по результатам расчетов режимов наблюдения и параметров оборудования, определяется указанным разрешением [7].

Радиолокационное изображение содержит много легко различимых и идентифицируемых признаков и имеет явное сходство с изображениями, полученными оптическими приборами, но это сходство обманчиво. Оно включает в себя множество результатов отражений от поверхности, которая подвергается воздействию излучения с длинами волн на много порядков больше, чем у видимого света. Разрешение оптических систем, используемых в дистанционном зондировании, редко ограничивается дифракцией на заданной апертуре. С радиолокатором это явление почти неизбежно. Радиолокатор также является источником излучения, отражение которого улавливается для получения изображения, т. е. он является активным инструментом дистанционного зондирования, а не пассивным. Активной оптической системой в настоящее время, является лидар – дальномер оптического диапазона. Радиолокатор облучает вращающуюся искривленную поверхность Земли радиоволнами со сферическим фронтом. Ранние системы самолетного базирования обычно не учитывали эти геометрические особенности из-за малой высоты полета РСА, но в системах космического базирования они должны учитываться. В результате расстояние от радиолокатора до отдельной точки облучения изменяется по мере перемещения точки наблюдения – эффект «блуждания по дальности». Существует два компонента, ответственных за этот эффект: квадратичный член из-за кривизны Земли и линейный член из-за вращения Земли. Каждая точка должна быть прослежена по всей синтезированной апертуре, чтобы устранить этот эффект, хотя фактическое поведение для отдельной точки будет зависеть от широты и дальности. Во время обработки необходимо добавить зависящий от диапазона квадратичный сдвиг фазы в направлении движения аппарата, чтобы компенсировать кривизну фронта отраженной волны.

Стремление обеспечить достаточно высокую периодичность наблюдения заданной акватории по приемлемой стоимости вполне может быть достижимо при создании орбитальные группировки (ОГ), МКА нового поколения с РСА. При этом МКА с РСА со средним уровнем разрешения, но с большой полосой съемки наиболее полно отвечают требованиям по наблюдению за морской обстановкой [8; 9].

Один МКА с высотой орбиты 1500 км за суточный период, над одной точкой поверхности моря, может провести радиолокационное зондирование не менее 6 раз. Для оперативного получения информации о состоянии морской поверхности с МКА при высоте орбиты 1500 км необходимо создание группировки с 4 орбитами по 3 МКА на каждой по аналогии с орбитальной группировкой многофункциональной системой персональной спутниковой связи «Гонец-Д1М».

Выбор режима обзора зависит от поставленной задачи и технических характеристик малого космического аппарата и подразделяется:

- на широкополосный режим по ходу маршрута;

- прямолинейный узколучевой режим по ходу маршрута;
- прожекторный режим с учетом зоны видимости.

Сложность использования широкополосного режима по ходу маршрута (обзорный режим) (рис. 1, *a*) вызывается азимутальной неоднозначностью и геометрическими искажениями, вызванными радиальной скоростью в лучах при ошибках ориентации МКА и, особенно, при работе в орбитальной системе координат, а также потреблением во время съемки повышенной мощности от буферных батарей. Оптимальные варианты исключения ошибки ориентации – это использование фазированной антенной решётки с электронным сканированием и цифровой обработкой полученных сигналов [10; 11]. Задача цифровой обработки потребует перехода на программируемые логические интегральные схемы.

При непрерывной съемке возможна реализация обработки всей азимутальной диаграммы направленности антенны (разрешение до $\delta X \ge D_r/2$), и широкополосный режим может быть уменьшен по положению полосы захвата, как представлено на рис. 1, *б*. Полоса захвата находится в пределах полосы обзора РСА.



Рис. 1. Проекция площади при различных режимах обзора: *а* – широкополосный режим; *б* – узкополосный режим; *в* – прожекторный режим

Fig. 1. Projection of the area in different viewing modes: a – wideband mode; b – narrowband mode; c – spotlight mode

В случае, когда необходима широкая зона захвата и условия однозначности не удовлетворяются, то зону обзора сканируют несколькими парциальными лучами в обзорном режиме «скансар» [12] ценой уменьшения времени обработки информации. Обзор ведется кадрами поочередно с переключением лучей.

Прожекторный режим реализуется в том случае, когда требуется высокое разрешение, а длительность сигнала ограничена зоной облучения антенной по азимуту (рис. 1, *в*). Данный режим осуществляется удержанием диаграммы направленности антенны в снимаемом кадре при пролете МКА [13; 14].

Оптимизация обработки сигналов в многопозиционном прожекторном режиме

Космическая многопозиционная система должна состоять только из приемопередатчиков, расположенных на космических аппаратах различных космических систем (передатчики – космические аппараты системы связи, навигационные космические аппараты, телекоммуникационные космические аппараты и др., приемники – научно-исследовательские МКА), способных осуществлять совместную обработку от объектов, способных отражать радиосигнал. На рис. 2 представлена космическая многопозиционная система, работающая в прожекторном режиме, где функцию подсвета выполняют передатчик космического аппарата низкоорбитальной системы связи (ПРД КА-1), передатчик космического аппарата системы связи на эллиптической орбите (ПРД КА-2) и передатчик космического аппарата геостационарной системы связи (ПРД КА-3), а прием отраженного сигнала выполняет группировка или «рой» МКА (ПРМ МКА-1, ПРМ МКА-2, ПРМ МКА-3). Реализацией многопозиционной системы PCA является относительное движение радиолокаторов и рассеивающих точек в пределах необходимой облучаемой области.

Согласно рис. 2, излучатели будут вводить доплеровский сдвиг в отраженный сигнал, который будет иметь максимальное положительное значение, когда он вначале входит в пучок приема, и максимальное отрицательное значение при выходе из прожекторной зоны. Характер изменения доплеровского сдвига для любой точки будет одинаковым по времени. Доплеровский процесс линейно модулирует частоту отраженного сигнала так, что его форма совпадает с тем отраженным сигналом, который принимается вслед за передачей исходного импульса.



Рис. 2. Многопозиционная система с прожекторным режимом

Fig. 2. Multi-position spotlight system

Максимальная длина синтезированной апертуры является расстоянием, проходимым МКА, для которого отдельная точка остается в пределах обзора реального пучка. Тем самым выполняется одно из требований для космических систем к режимам покрытия, обеспечивающим «безпропускной» режим обзора.

Одной из основных задач при создании такой системы является разработка методов совместной обработки наблюдаемых полей [15–18], что позволит достичь максимального качества получаемых данных.

В настоящее время проведено большое количество «теоретических» работ, задачей которых является глобальный мониторинг состояния морской поверхности, включая передвижение атмосферных циклонов (штормовые волны). Для радиолокационной подсветки земной поверхности используются спутниковые радионавигационные системы (GNSS) [19–28] или геостационарные телекоммуникационные космические аппараты [29; 30].

Обобщенная структурная схема предлагаемой многопозиционной РСА с одним космическим аппаратом – передатчиком (высокоорбитальные или низкоорбитальные спутники связи, а также навигационные спутники), одним МКА – приемником и наземным комплексом представлена на рис. 3.

Космический радиолокационный комплекс любой космической системы включает в себя антенну, передающую на космическом аппарате подсвета (ПРД КА), и приемную антенну

на МКА с РСА (ПРМ МКА), блок формирования сигналов (БФС), синхронизатор, приёмник с выходами на фазовый детектор (ФД) синусного и косинусного квадратурных каналов, аналогоцифровой преобразователь (АЦП) квадратурных каналов, блок сопряжения с радиолинией передачи данных, процессор управления и контроля, навигационное оборудование, команднотелеметрическую радиолинию (КРЛ) и радиолинию передачи данных (РПД).

Наземный комплекс включает в себя командно-телеметрическую радиолинию, приемник РПД, архив информационной составляющей, устройство синтеза цифровой ридиоголограммы (ЦРГ), устройство нормализации, радиометрической и геометрической коррекции изображений, привязки к географическим координатам, рабочее место по обработке информации для поставленной задачи.

Технологическая повторяемость обуславливает относительно невысокую стоимость создания и развертывания такой многопозиционной системы, а создание универсального программного обеспечения обработки информации позволит оперативно вносить корректировки в алгоритмы работы системы.



Рис. 3. Структурная схема многопозиционного РСА

Fig. 3. Structural diagram of a multi-position SAR

В представленной многопозиционной PCA с использованием научно-исследовательских МКА могут быть применены методы радиолокационного зондирования, разделяющиеся на три основных класса:

1) методы исследования флюктуаций амплитуды обратно рассеянного (или отраженного) сигнала, в основе которых лежит связь пространственных характеристик морского волнения со

структурой, огибающей внутрипериодные флюктуации и угломестные зависимости удельной эффективной площади рассеяния морской поверхности от интенсивности ветрового волнения;

2) методы, основанные на анализе доплеровских смещений частоты сигнала, вызванных наличием радиальных проекций скоростей единичных отражателей относительно радиолокатора;

3) методы, основанные на измерениях временных задержек и сдвигов элементов отраженного сигнала.

Данные методы основываются на представлении распределенного коэффициента отражения объектов, входящего в уравнение отраженного/рассеянного сигнала, в виде функциональнодетерминированного или стохастического пространственного процесса. Дальнейшая оптимизация метода формирования радиолокационного изображения в системах дистанционных исследований морской поверхности могут основываться на двух основных моделях отраженных от поверхности сигналов – стохастической и функционально-детерминированной.

Заключение

Многопозиционная система с РСА на базе МКА будет являться в перспективе одной из мощных систем получения изображения морской поверхности, однако присутствуют сложности и трудности преобразования необработанных данных от РСА в понятную форму. Одним из вариантов решения данной проблемы является цифровая корреляция и гибкий подход, что позволит точно воспринимать вид изображения. Представленная схема получения и обработки информации может стать базой для создания различных вариантов квазиоптимальных алгоритмов, применимых при отсутствии необходимой априорной информации или при необходимости обеспечения измерений в масштабе реального времени. Использование МКА для радиолокационного зондирования морской поверхности в составе многопозиционной системы РСА позволит оперативно провести корректировку алгоритмов обработки радиолокационных изображений и возможность в перспективе проводить комплексную обработку радиолокационных данных, получаемых от метеоспутников и систем наблюдения в оптических диапазонах.

Библиографические ссылки

1. Kartsan I. N., Efremova S. V., Khrapunova V. V., Tolstopiatov M. I. Choice of optimal multiversion software for a small satellite ground-based control and command complex // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. No. 450 (2), P. 022015.

2. Карцан И. Н., Ефремова С. В. Распределенное управление университетскими малыми космическими аппаратами // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Сб. материалов V Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Дню космонавтики (13–17 апреля 2021). Красноярск : СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2019. Т. 2. С. 47–48.

3. Карцан И. Н. Наземный комплекс управления для малых космических аппаратов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. 2009. № 3 (24). С. 89–92.

4. Спутниковая гидрофизика : под ред. М. И. Штерн. М. : Наука, 1983. 253 с.

5. Ruffini G., Soulat F., Caparrini M., Germain O., Martin-Neira M. The eddy experiment: accurate GNSS-R ocean altimetry from low altitude aircraft // Geophys. Res. Lett. 2004. Vol. 31(2). P. 2306.

6. Martin-Neira M., D'Addio S., Buck C., Floury N., Prieto-Cerdeira R. The PARIS ocean altimeter in-orbit demonstrator // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2011. Vol. 49(6). P. 2209–2237.

7. Неронский Л. Б., Михайлов В. Ф., Брагин И. В. Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования поверхности Земли и атмосферы. Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны. Спб. : СПбГУАП, 1999. Ч. 2. 220 с.

8. Клименко Н. Н., Занин К. А. Новое поколение космических аппаратов для наблюдения за морской обстановкой // Воздушно-космическая сфера. 2019. № 2. С. 72–82.

9. Клименко Н. Н. Современные низкоорбитальные космические аппараты для геолокации и идентификации источников радиоизлучения // Воздушно-космическая сфера. 2018. № 2. С. 48–57.

10. Algorithms for adaptive process-ing of signals in a flat phased antenna array // International Siberian Conference on Controland Communications (29-30 June 2017) / V. N. Tyapkin, I. N. Kartsan, D. D. Dmitriev, S. V. Efremova. Astana, Kazakhstan, 2017. P. 7998452.

11. Applying filtering for determining the angular orientation of spinning objects during interference / I. N. Kartsan, A. E. Goncharov, P. V. Zelenkov at al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. No. 155 (1). P. 012020.

12. Турук В. Э., Верба В. С., Голованова М. В. РСА «Стриж» для малых космических аппаратов «Командор-Э» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 5. С. 69–83.

13. Russian Spaceborne Synthetic Aper-ture Radar "Strizh" for Light Satellites of "Condor-E" type / V. Turuk, V. Verba, M. Golovanova et al. // Proc. EUSAR'2016. Hamburg, Germany. 2016. P. 947–952.

14. Афанасьев И. Зоркий «Кондор» // Новости космонавтики. 2013. № 8. С. 46–50.

15. Ксендзук А. В., Фатеев В. Ф., Попов С. А. Метод обработки сигналов в космических многопозиционных радиолокационных системах с синтезом апертуры антенны // Изв. выс. учеб. заведений. Приборостроение. 2009. № 4(52). С. 28–34.

16. Фалькович С. Е., Волосюк В. К., Горбуненко О. А. Радиотехнические системы дистанционного зондирования. Харьков : ХАИ, 2002. 157 с.

17. Ksendzuk A. V., Volosyuk V. K., Sologub N. S. Modeling SAR primary and secondary processing algorithms. Estimating quality of the processing techniques // 5-th European Conference on Synthetic Aperture Radar EUSAR 2004. Ulm, Germany. 2004. Vol. 2. P. 1013–1016.

18. Ksendzuk A. V., Gerasimov P. A. Inverse passive synthetic aperture radar. Radio industry (Russia). 2016. Vol. 26(1). P. 33–37.

19. Seasonal polarimetric measurements of soil moisture using tower-based GPS bistatic radar // IGARSS 2003 / V. Zavorotny, D. Masters, A Gasiewski et al. // 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (21–25 July 2003). Toulouse, France, 2003. Vol. 2. P. 781–783.

20. A delay Doppler-mapping receiver system for GPS-reflection remote sensing / Lowe S. T., Kroger P. M., Franklin G. W. et al. // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2003. Vol. 40(55). P. 1150–1163.

21. A physical model for GPS multipath caused by land reflections: Toward bare soil moisture retrievals / Zavorotny V., Larson K.M., Braun J. et al. // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2010. Vol. 3(1). P. 100–110.

22. Gutmann E., Larson K. M., Williams M., Nievinski F. G., Zavorotny V. Snow measurement by GPS interferometric reflectometry: An evaluation at niwot ridge, Colorado // Hydrol. Process. 2011. Vol. 26(19). P. 2951–2961.

23. Voronovich A. G. Non-local small-slope approximation for wave scattering from rough surfaces // Waves in Random Media. 1996. Vol. 6(2). P. 151–167.

24. Voronovich A. G. Small-slope approximation for electro-magnetic wave scattering at a rough interface of two dielectric half-spaces // Waves Random Media. 1994. Vol. 4(3). P. 337–367.

25. Soiguine A. Scattering of geometric algebra wave functions and collapse in measurements // Journal of Applied Mathematics and Physics. 2020. Vol. 8. P. 1838–1844.

26. Johnson J. T. A study of ocean-like surface thermal emission and reflection using Voronovich's small slope approximation // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2005. Vol. 43(2). P. 306–314.

27. Voronovich A. G., Zavorotny V. U. Ocean-scattered polarized bistatic radar signals modeled with small-slope approximation // IEEE Int. Geoscience Remote Sensing Symp. 2012. P. 3415–3418.

28. Zavorotny V. U., Voronovich A. G. Bistatic GPS signal reflections at various polarizations from rough land surface with moisture content // IEEE Int. Geoscience Remote Sensing Symp. 2000. Vol. 7. P. 2852–2854.

29. Переслегин С. В., Левченко Д. Г., Карпов И. О. Вибрационная волна на поверхности воды: параметрическое возбуждение и радиолокационное наблюдение // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. Т. 14, № 2. С. 39–53. 30. Формирование скоростных радиолокационных изображений морской поверхности со стационарных, авиационных и космических носителей / С. В. Переслегин, И. О. Карпов, З. А. Халиков и др. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика, 2019. Т. 12, № 1. С. 21–29.

References

1. Kartsan I. N., Efremova S. V., Khrapunova V. V., Tolstopiatov M. I. Choice of optimal multiversion software for a small satellite ground-based control and command complex. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, Vol. 450(2), P. 022015.

2. Kartsan I. N., Efremova S. V. [Distributed control of university small spacecraft] *Materialy V Mezhdunar. nauch. konf.* "Aktual'nyye problemy aviatsii i kosmonavtiki" [Materials V Intern. Scientific. Conf "Topical Issues in Aeronautics and Astronautics"]. Krasnoyarsk, 2019. P. 47–48. (In Russ.).

3. Kartsan I. N. [Ground control complex for small spacecraft]. *Vestnik SibGAU*. 2009, No. 3 (24), P. 89–92 (In Russ.).

4. Satellite Hydrophysics. Ed. by M. I. Stern. Moscow, Nauka Publ., 1983, 253 p.

5. Ruffini G., Soulat F., Caparrini M., Germain O., Martin-Neira M. The eddy experiment: accurate GNSS-R ocean altimetry from low altitude aircraft. *Geophys. Res. Lett.* 2004, No. 31(2), P. 2306.

6. Martin-Neira M., D'Addio S., Buck C., Floury N., Prieto-Cerdeira R. The PARIS ocean altimeter in-orbit demonstrator. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2011, No. 49(6), P. 2209–2237.

7. Neronsky L. B., Mikhailov V. F., Bragin I. V. Microwave equipment for remote sensing of the Earth surface and atmosphere. Radar with synthesized aperture antenna. Spb., SPbGUAP Publ., 1999, Part 2, 220 p.

8. Klimenko N. N., Zanin K. A. New generation of spacecraft for maritime surveillance. *Air and Space Sphere*. 2019, No. 2, P. 72–82.

9. Klimenko N. N. Modern low-orbit spacecraft for geolocation and identification of radio emission sources. *Air and Space Sphere*. 2018, No. 2, P. 48–57.

10. Tyapkin V. N., Kartsan I. N., Dmitriev D. D., Efremova S. V. Algorithms for adaptive processing of signals in a flat phased antenna array. *International Siberian Conference on Controland Communications* (29–30 June 2017). Astana, Kazakhstan, 2017. P. 7998452.

11. Kartsan I. N., Goncharov A. E., Zelenkov P. V., Kovalev I. V., Fateev Y. L., Tyapkin V. N., Dmitriev D. D. Applying filtering for determining the angular orientation of spinning objects during interference. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, No. 155 (1), P. 012020.

12. Turuk V. E., Verba V. S. Golovanova, M. V. SAR Strizh for small spacecraft Komandor-E. *Modern problems of Earth remote sensing from space*. 2017, Vol. 14, No. 5, P. 69–83.

13. Turuk V., Verba V., Golovanova M., Neronskiy L., Zaitsev S., Tolstov E. Russian Spaceborne Synthetic Aper-ture Radar "Strizh" for Light Satellites of "Condor-E" type. *Proc. EUSAR'2016*. Hamburg, Germany. 2016. P. 947–952.

14. Afanasyev I. Zorky "Condor". Novosti kosmonavtiki. 2013. № 8. pp. 46-50.

15. Ksendzuk A. V., Fateyev V. F., Popov S. A. Method of signal processing in space multiposition radar systems with synthesis of antenna aperture. *Izvestiya vysokikh izuchenii "Instrument-making*" 2009, No. 4(52), P. 28–34.

16. Falkofich S. E., Volosyuk V. K., Gorbunenko O. A. Radiotechnical systems of remote sensing. Kharkov, KAI Publ., 2002, 157 p.

17. Ksendzuk A. V., Volosyuk V. K., Sologub N. S. Modeling SAR primary and secondary processing algorithms. Estimating quality of the processing techniques. *5-th European Conference on Synthetic Aperture Radar EUSAR 2004. Ulm, Germany.* 2004. Vol. 2, P. 1013–1016.

18. Ksendzuk A. V., Gerasimov P. A. Inverse passive synthetic aperture radar. *Radio industry* (*Russia*), 2016, Vol. 26(1), P. 33–37. (In Russ.).

19. Zavorotny V., Masters D., Gasiewski A., Bartram B., Katzberg S., Axelrad P., Zamora R. Seasonal polarimetric measurements of soil moisture using tower-based GPS bistatic radar. *IGARSS 2003.*

2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (21-25 July 2003). Toulouse, France, 2003. vol.2, pp. 781–783.

20. Lowe S. T., Kroger P. M., Franklin G. W., LaBrecque J. L., Lerma J., Lough M. F., Marcin M.R., Spitzmesser D.J., Young L. E. A delay Doppler-mapping receiver system for GPS-reflection remote sensing. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2003, Vol. 40(55), P. 1150–1163.

21. Zavorotny V., Larson K.M., Braun J., Small E. E., Gutmann E., Bilich A. A physical model for GPS multipath caused by land reflections: Toward bare soil moisture retrievals. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2010, Vol. 3(1), P. 100–110.

22. Gutmann E., Larson K. M., Williams M., Nievinski F. G., Zavorotny V. Snow measurement by GPS interferometric reflectometry: An evaluation at niwot ridge, Colorado. *Hydrol. Process.* 2011, Vol. 26(19), P. 2951–2961.

23. Voronovich A.G. Non-local small-slope approximation for wave scattering from rough surfaces. *Waves in Random Media*. 1996, Vol. 6(2), P. 151–167.

24. Voronovich A.G. Small-slope approximation for electro-magnetic wave scattering at a rough interface of two dielectric half-spaces. *Waves Random Media*, 1994. Vol. 4(3), pp. 337–367.

25. Soiguine A. Scattering of geometric algebra wave functions and collapse in measurements. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 2020. Vol. 8, pp. 1838-1844.

26. Johnson J.T. A study of ocean-like surface thermal emission and reflection using Voronovich's small slope approximation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2005. Vol. 43(2), pp. 306–314.

27. Voronovich A.G., Zavorotny V.U. Ocean-scattered polarized bistatic radar signals modeled with small-slope approximation. *IEEE Int. Geoscience Remote Sensing Symp.*, 2012. pp. 3415–3418.

28. Zavorotny V. U., Voronovich A. G. Bistatic GPS signal reflections at various polarizations from rough land surface with moisture content. *IEEE Int. Geoscience Remote Sensing Symp.* 2000, Vol. 7, P. 2852–2854.

29. Pereslegin S. V., Levchenko D. G., Karpov I. O. The vibration wave on the water surface: parametric excitation and radar observation. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2021, Vol. 14(2), P. 39–53. Doi:10.7868/S2073667321020040.

30. Pereslegin S. V., Karpov I. O., Khalikov Z. A., Ermakov R. V., Mussiniants T. G. The forming of sea surface velocity images from stationary, airborne and spaceborne platforms. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2019, Vol. 12(1), P. 21–29. Doi:10.7868/S2073667319010039.

С Карцан И. Н., Жуков А. О., 2023

Карцан Игорь Николаевич – доктор технических наук, доцент, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева; старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН; профессор, Севастопольский государственный университет; главный научный сотрудник, ФГБНУ «Экспертно-аналитический центр». E-mail: kartsan@sibsau.ru.

Жуков Александр Олегович – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе, ФГБНУ «Экспертно-аналитический центр»; ведущий научный сотрудник, ФГБУН «Институт астрономии Российской академии наук». E-mail: aozhukov@mail.ru.

Kartsan Igor' Nikolaevich – Dr. Sc., Docent, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Senior Researcher, Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, professor, Sevastopol State University, head researcher, FGBNU "Expert and Analytical Center". E-mail: kartsan@sibsau.ru.

Zhukov Alexander Olegovich – Senior Researcher, professor, deputy scientific director, FGBNU "Expert and Analytical Center", leading researcher, Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences. E-mail: aozhukov@mail.ru.

УДК 533.6.07 Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-273-283

Для цитирования: Кузнецов В. И., Макаров В. В., Щука И. О. Метод расчета оптимальной геометрии вихревого эжектора // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 2. С. 273–283. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-273-283.

For citation: Kuznetsov V. I., Makarov V. V., Shchuka I. O. [Method for calculating the optimal geometry of a vortex ejector]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 2, P. 273–283. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-273-283.

Метод расчета оптимальной геометрии вихревого эжектора

В. И. Кузнецов¹, В. В. Макаров^{1*}, И. О. Щука²

¹Омский государственный технический университет Российская Федерация, 644050, г. Омск, просп. Мира, 11 ²Сибирский институт бизнеса и информационных технологий Российская Федерация, 644116, Омск, ул. 24-я Северная, 196 E-mail: vvmakarov@omgtu.tech

Составлена математическая модель рабочего процесса вихревого эжектора, на базе которой разработана методика расчёта оптимальной геометрии. Методика расчета учитывает обмен работой и теплотой между высоконапорным (эжектирующим) газом и низконапорным (эжектирующим) газом.

Показано влияние вязкости и возникающих при этом касательных напряжений на обмен работой и теплотой в вихревом эжекторе. Совпадение расчетных и экспериментальных данных удовлетворительное.

Ключевые слова: вихревой эжектор, вязкость, касательные напряжения, математическая модель, методика расчета оптимальной геометрии.

Method for calculating the optimal geometry of a vortex ejector

V. I. Kuznetsov¹, V. V. Makarov^{1*}, I. O. Shchuka²

¹Omsk State Technical University 11, Mira Av., Omsk, 644050, Russian Federation ²Siberian Institute of Business and Information Technologies 196, 24-ya Severnaya St., Omsk, 644116, Russian Federation E-mail: vvmakarov@omgtu.tech

A mathematical model of the working process of the vortex ejector has been compiled, on the basis of which a method for calculating the optimal geometry has been developed. The calculation method takes into account the exchange of work and heat between a high-pressure (ejecting) gas and a low-pressure (ejected) gas.

The effect of viscosity and the resulting tangential stresses on the exchange of work and heat in the vortex ejector is shown. The coincidence of calculated and experimental data is satisfactory.

Keywords: vortex ejector, viscosity, tangential stresses, mathematical model, method of calculating optimal geometry.

Введение

Вихревой эжектор (вихревой компрессор) – простейшее и распространенное газодинамическое устройство, применяемое в разнообразных отраслях промышленности, в частности в авиаи ракетостроении, вакуумной технике и различных аэродинамических установках [1; 2].

Основное достоинство эжектора как компрессора – отсутствие движущихся деталей, что существенно при работе с горячими либо агрессивными средами.

Отсутствие признанной физической и замкнутой математической модели сдерживает более широкое применение вихревых эжекторов в авиа- и ракетостроении [3; 4].

Вихревой эжектор – это вихревая труба, работающая в режиме вакуум-насоса. В общем случае эжектором называют любое устройство, в котором полное давление одного потока жидкости (сжимаемой и несжимаемой) увеличивается за счет обмена энергией с другим потоком, имеющим более высокую энергию. В результате взаимодействия потоков образуется их смесь, имеющая полную энергию выше низконапорной жидкости, но ниже полной энергии высоконапорной жидкости.

Постановка задачи

Основная задача данной работы – на базе уточненной физической и замкнутой математической моделей составить методику расчета оптимальных геометрических параметров вихревого эжектора, произвести расчет и сравнить результаты с исследованиями других авторов [1; 5].

Материал и методы исследования

Существуют несколько физико-математических моделей, объясняющих работу вихревой трубы в режиме вакуум-насоса (вихревой эжектор) [2; 6; 7]. Основной недостаток существующих физических моделей состоит в том, что по ним нельзя составить замкнутую математическую модель. Для получения единственного решения вводятся эмпирические зависимости. Как правило, эти формулы справедливы в узкой области исследований.

В ряде работ эжекторы называют компрессорами без движущихся частей, но ни в одной работе нет уравнений, в которых приводится механизм передачи энергии от высоконапорной жидкости (сжимаемой и несжимаемой) к низконапорной [8–10].

В качестве физической модели рабочего процесса вихревого эжектора принята модель, кратко изложенная в работе [1].

Физическая модель рабочего процесса вихревого эжектора

Вихревой эжектор (ВЭ) – устройство, в котором происходит повышение полного давления низконапорной жидкости (сжимаемой или несжимаемой) (рис. 1).

Высоконапорная жидкость истекает из сопла 1 в камеру смещения (энергообмена) 3. В начальный момент времени высоконапорная жидкость начинает движение из сопла 1, а низконапорная жидкость находится в состоянии покоя. Под давлением центробежных сил высоконапорный газ движется по периферии камеры энергообмена 3, создавая разряжение на оси камеры. Под действием разности атмосферного давления и давления разряжения на оси камеры 3воздух из атмосферы поступает через сопло 2 в камеру 3. В камере 3 силами вязкости с помощью касательных напряжений происходит энергообмен между высоконапорным и низконапорным потоками жидкости. После завершения энергообмена смесь поступает в вихревое сопло 4для дальнейшего использования по назначению.

На основании вышеизложенной физической модели доработана математическая модель рабочего процесса вихревого эжектора, которая была изложена ранее [1].

Математическая модель рабочего процесса вихревого эжектора

Сумма энергий высоконапорной и низконапорной жидкости равна энергии жидкости, выходящей из сопла 4 вихревого эжектора (рис. 1)

$$N_1 + N_2 = N_3, BT,$$
 (1)

где

$$N_1 = G_1 \cdot L_1, \text{ BT}; \tag{2}$$

где N_1 – энергия высоконапорного газа, Вт; G_1 – расход высоконапорного газа, кг/с; L_1 – удельная энергия высоконапорного газа, Дж/кг:

$$L_{1} = c_{P} \cdot T_{01} \left(1 - \frac{1}{\pi_{P1}^{*} \frac{k-1}{k}} \right) \cdot \eta_{P}^{*},$$
(3)

где η_P^* – суммарный КПД расширения (отношение реальной работы расширения к изоэктропной), берется по данным последних достижений в области турбостроения; π_{P1}^* – степень понижения высоконапорного газа ($\pi_{P01}^* = P_{01}/P_{03}$); T_{01} – полная температура газа на входе в вихревой эжектор, К; c_P – теплоемкость газа при постоянном давлении (Дж/(кг*К)); k – показатель адиабаты; P_{01} – полное давление высоконапорного газа на входе в вихревой эжектор, Па; P_{03} – полное давление газа на выходе из вихревого эжектора, Па.



Рис. 1. Схема вихревого эжектора:

1 – воздухозаборник для входа эжектирующего (высоконапорного) газа;

2 – воздухозаборник для входа эжектируемого (низконапорного) газа;

3 – камера энергообмена; 4 – сопло для выхода смеси газов

Fig. 1. Diagram of the vortex ejector:

1 – air intake for the input of ejecting (high-pressure) gas;

2 – air intake for the input of ejected (low-pressure) gas;

3 – energy exchange chamber; 4 – nozzle for the release of a mixture of gases

Энергия низконапорного газа после подведения к нему энергии от высоконапорного газа касательными напряжениями, возникающими при движении вязкой жидкости, за счет разности угловых скоростей

$$N_2 = G_2 \cdot L_2,\tag{4}$$

где G_2 – расход низконапорного газа, кг/с; L_2 – удельная энергия низконапорного газа после подведения к нему кинетической энергии от высоконапорного газа, Дж/кг;

$$L_2 = c_P T_{02} \left(\pi_c^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_c^*},$$
(5)

где η_c^* – суммарный КПД процесса сжатия (отношение изоэктропической работы сжатия к реальной), берется по данным последних достижений в области компрессоростроения; π_c^* – степень повышения полного давления низконапорного газа за счет подвода кинетической энергии касательными напряжениями в вязкой жидкости от высоконапорного газа

$$\pi_c^* = P_{03} / P_H \,, \tag{6}$$

где T_{02} – полная температура низконапорного газа на входе в вихревой эжектор, К; P_{03} – полное давление газа на выходе из эжектора, Па; P_H – статическое давление среды, в которую выходит газ из вихревого эжектора, Па.

Полная энергия газа на выходе из вихревого эжектора

$$N_3 = G_3 L_3,\tag{7}$$

где G_3 – расход газа на выходе из вихревого эжектора, кг/с; L_3 – удельная энергия газа на выходе из вихревого эжектора, ДЖ/кг

$$L_{3} = c_{P} T_{03} \left(1 - 1 / \pi_{P3}^{*} \frac{k-1}{k} \right) \eta_{P}^{*};$$
(8)

 $\pi_{P3}^* = P_{03}/P_H$ – степень понижения полного давления газа на выходе из вихревого эжектора; T_{03} – полная температура газа на выходе из эжектора, К;

$$\Pi = \frac{G_2}{G_1} - \text{степень эжекции.}$$
(9)

Уравнения (2)–(9) подставляются в уравнение (1):

$$G_{1}c_{P}T_{01}\left[1-\left(P_{03}/P_{01}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]\eta_{P}^{*}+G_{2}c_{P}T_{02}\left[\left(P_{03}/P_{H}\right)^{\frac{k-1}{k}}-1\right]\frac{1}{\eta_{C}^{*}}=G_{3}c_{P}T_{03}\left[1-\left(P_{H}/P_{03}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]\eta_{P}^{*}.$$
 (10)

Уравнение (10) является уравнением энергии газа в механической форме. В тепловой форме это уравнение имеет вид [13; 14]:

$$G_1 i_{01} + G_2 i_{02} = G_3 i_{03}, \tag{11}$$

где $i_{0j} = c_{Pj}T_{0j}$ – полная энтальпия газа, ДЖ/кг; c_{Pj} – теплоемкость при постоянном давлении *j*-го газа, Дж/(кг*К); T_{0j} – полная температура *j*-го газа, К; $j = 1 \div 3$ – параметры высоконапорного газа, низконапорного газа и смеси газов на выходе из вихревого эжектора соответственно.

При $c_{P_i} = c_P = \text{const}$ и $G_2/G_1 = \Pi$ уравнение (11) преобразуется к виду:

$$\left(\Pi + 1\right) \frac{T_{03}}{T_{01}} = 1 + \Pi \frac{T_{02}}{T_{01}}.$$
(12)

Полные температуры высоконапорного и низконапорного газов на входе в вихревой эжектор могут в частном случае иметь одну и ту же температуру, т. е. $T_{01} = T_{02}$. Тогда из уравнения энергии в тепловой форме (12) следует, что

$$T_{01} = T_{02} = T_{03}. \tag{13}$$

С учетом уравнения (13) уравнение энергии в механической форме (10) можно преобразовать следующим образом:

$$\left[1 - \left(\frac{P_{03}}{P_{01}}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right] \eta_P^* + \Pi \left[\left(\frac{P_{03}}{P_H}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right] \frac{1}{\eta_C^*} = (\Pi + 1) \left[1 - \left(\frac{P_H}{P_{03}}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right] \eta_P^*.$$
(14)

В уравнении (14) одна неизвестная величина, а именно полное давление газа на выходе из вихревого эжектора *P*₀₃.

После несложных преобразований уравнение (14) приводится к виду:

$$ax^{2} + bx + c = 0,$$

$$\frac{\eta_{P}^{*}}{P_{01}^{\frac{k-1}{k}}} - \frac{\Pi}{\eta_{C}^{*}} \cdot \frac{1}{P_{H}^{\frac{k-1}{k}}}; \quad b = \Pi \left(\frac{1}{\eta_{C}^{*}} + \eta_{P}^{*}\right); \quad c = (\Pi + 1)\eta_{C}^{*}P_{H}^{\frac{k-1}{k}}.$$
(15)

Решение квадратного уравнения (15) позволяет определить величину полного давления газа на выходе из вихревого эжектора

$$P_{03} = x^{\frac{k}{k-1}} = \left(\frac{-b + \sqrt{b^2 + 4ac}}{2a}\right)^{\frac{k}{k-1}}.$$
(16)

В уравнении (16) знак плюс перед корнем квадратным взят потому, что полное давление газа на выходе из вихревого эжектора не может иметь отрицательное значение.

Высокотемпературный газ передает кинетическую энергию низконапорному с помощью касательных напряжений, возникающих в вязкой среде, за счет разности скоростей. Обмен работой приводит также и к изменению температуры торможения. Температура торможения или полная температура высоконапорного газа падает, низконапорного растет [1; 14; 15].

Температура торможения высоконапорного и низконапорного газов определяется известными уравнениями термогазодинамики

$$T_{01P} = T_{01} \left[1 - \left(1 - 1 / \pi_{T1}^* \frac{k-1}{k} \right) \eta_P^* \right];$$
(17)

$$T_{02C} = T_{02} \left[\left(\pi_C^* \frac{k-1}{k} - 1 \right) \frac{1}{\eta_C^*} + 1 \right].$$
(18)

Температуру заторможенного потока на выходе из вихревого эжектора можно определить по законам теории теплопередач или по формуле (12).

Обсуждение результатов

где $x = P_{03}^{\frac{k-1}{k}}; a =$

На базе вышеприведенной замкнутой математической модели составлена методика расчета оптимальной геометрии вихревого эжектора по необходимым термодинамическим параметрам.

Обмен кинетической энергией возникает в вязкой жидкости с помощью касательных напряжений при разности скоростей движения высоконапорного и низконапорного газов. Обмен работой и теплотой приводит к снижению полного давления высоконапорного газа и к повышению полного давления низконапорного газа. На выходе из эжектора газ имеет однородное давление P_{03} и полную температуру T_{03} .

Оптимизация геометрии вихревого эжектора ведется по заданной степени эжекции П.

Методика расчета оптимальной геометрии вихревого эжектора (один из возможных вариантов расчета). Основные данные для расчета берутся в соответствии со схемой (рис. 1).

Исходные данные для расчета:

 $P_{01} = 1,5 \cdot 10^5$ Па – полное давление высоконапорного газа (воздуха) на входе в вихревой эжектор;

 $T_{01} = 288 \, \text{K}$ – полная температура воздуха на входе в вихревой эжектор;

 $P_{02} = P_H = 1,013 \cdot 10^5$ Па – полное давление низконапорного газа на входе в вихревой эжектор;

*T*₀₂ = 288 К – полная температура низконапорного воздуха на входе в эжектор;

 $G_1 = 0,2$ кг/с – расход высоконапорного воздуха;

 $\Pi = \frac{G_2}{G_1} = 0, 1 -$ степень эжекции;

 $\eta_P^* = 0,92$ – суммарный КПД при совершении работы расширения высоконапорного потока;

 $\eta_C^* = 0,85$ – суммарный КПД процесса сжатия низконапорного потока;

k = 1, 4 – показатель адиабаты воздуха;

 $c_P = 1003,5 \ \text{Дж/(кг \cdot K)}$ – теплоемкость при постоянном давлении воздушного потока;

 $R = 287 \ \text{Дж} / (\kappa \Gamma \cdot \text{K}) -$ газовая постоянная воздуха;

$$m = \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \left[\kappa \Gamma \cdot K/Дж\right]^{0.5} = 0,0404 - \kappa oэффициент для воздуха;$$

m = 0,0397 – для продуктов сгорания керосина.

Определить:

*P*₀₃ – полное давление воздуха на выходе из вихревого эжектора, Па;

*T*₀₃ – полная температура воздуха на выходе из эжектора, К;

 F_1 – площадь среза сопла высоконапорного воздуха, м²;

 F_2 – площадь воздухозаборника для входа в вихревой эжектор низконапорного воздуха, м²;

 $l\,$ – длина камеры смещения вдоль оси вихревого эжектора, м;

Расчет:

1. Коэффициент а:

$$a = \frac{\eta_P^*}{P_{01}} - \frac{\Pi}{\eta_C^*} \cdot \frac{1}{P_H} = \frac{0,92}{\left(1,5 \cdot 10^5\right)^{0,286}} - \frac{0,1}{0,85} \cdot \frac{1}{\left(1,013 \cdot 10^5\right)^{0,286}} = 0,03044 - 0,00435 = 0,0261.$$

2. Коэффициент b:

$$b = \Pi\left(\frac{1}{\eta_C^*} + \eta_P^*\right) = 0, 1\left(\frac{1}{0,85} + 0,92\right) = 0, 1(1,1765 + 0,92) = 0,20965.$$

3. Коэффициент с:

$$c = (\Pi + 1) \eta_C^* P_H^{\frac{k-1}{k}} = 1, 1 \cdot 0, 92 (1, 013 \cdot 10^5)^{0, 286} = 27, 339.$$

4. Полное давление воздуха на выходе из вихревого эжектора:

$$P_{03} = \left(\frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}\right)^{\frac{k}{k-1}} = \left(\frac{-0,20965 + \sqrt{0,20965^2 + 4 \cdot 0,0261 \cdot 27,339}}{2 \cdot 0,0261}\right)^{3,5} = 28,5969^{3,5} = 1,2506 \cdot 10^5 \ \Pi a.$$

5. Полная температура воздуха на выходе из вихревого эжектора:

$$T_{03} = \frac{1}{\Pi + 1} T_{01} + \frac{\Pi}{\Pi + 1} T_{02} = \frac{1}{0, 1 + 1} 288 + \frac{0, 1}{0, 1 + 1} 288 = 288 \text{ K}.$$

6. Газодинамическая функция давления высоконапорного воздуха на входе в вихревой эжектор:

$$\pi(\lambda_1) = \frac{P_H}{P_{01}} = \frac{1,013 \cdot 10^5}{1,5 \cdot 10^5} = 0,6753$$

7. Коэффициент скорости высоконапорного воздуха на входе в вихревой эжектор:

$$\lambda_1 = \sqrt{\left[1 - \pi(\lambda_1)^{\frac{k-1}{k}}\right] \frac{k+1}{k-1}} = \sqrt{\left[1 - 0,6753^{0,286}\right] \frac{1,4+1}{1,4-1}} = 0,79824$$

8. Приведенный расход высоконапорного воздуха на входе в вихревой эжектор:

$$q(\lambda_1) = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda_1 \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_1^2\right)^{\frac{1}{k-1}} = \left(\frac{1,4+1}{2}\right)^{2,5} 0,79824 \left(1 - \frac{1,4-1}{1,4+1} 0,79824^2\right)^{2,5} = 0,9510.$$

9. Площадь входа в воздухозаборник для высоконапорного воздуха:

$$F_1 = \frac{G_1 \sqrt{T_{01}}}{m P_{01} q (\lambda_1)} = \frac{0.2 \sqrt{288}}{0.0404 \cdot 1.5 \cdot 10^5 \cdot 0.9510} = 5.8894 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2.$$

10. Диаметр воздухозаборника для входа высоконапорного воздуха:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4F_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 5,8894 \cdot 10^{-4}}{3,14}} = 27,39 \cdot 10^{-3} \text{ M}.$$

11. Расход низконапорного воздуха на входе в вихревой эжектор:

$$G_2 = \Pi G_1 = 0, 1 \cdot 0, 2 = 0, 02 \text{ Kg/c}.$$

12. Площадь среза воздухозаборника на входе в вихревой эжектор низконапорного воздуха:

$$F_2 = \frac{G_2 \sqrt{T_{02}}}{m P_{02} q(\lambda_2)} = \frac{0.02 \sqrt{288}}{0.0404 \cdot 1.013 \cdot 10^5 \cdot 1} = 0.8293 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2,$$

где $q(\lambda_2)=1$, так как на оси вихревого эжектора вакуум и перепад давлений на входе в воздухозаборник сверхкритический.

13. Диаметр воздухозаборника на входе в вихревой эжектор низконапорного воздуха:

$$d_2 = \sqrt{\frac{4F_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,8293 \cdot 10^{-4}}{3,14}} = 10,28 \cdot 10^{-3}$$
 m.

14. Полная температура высоконапорного воздуха после завершения энергообмена с низконапорным воздухом:

$$T_{01r} = T_{01} \left[1 - \left(1 - 1 / \pi_{T_3}^* \frac{k - 1}{k} \right) \eta_P^* \right] = 288 \left[1 - \left(1 - \left(\frac{1,2506 \cdot 10^5}{1,5 \cdot 10^5} \right)^{0,286} \right) 0,92 \right] = 274,57 \text{ K.}$$

15. Полная температура низконапорного воздуха после завершения энергообмена с высоконапорным воздухом:

$$T_{02C} = T_{02} \left[\left(\pi_C^* \frac{k-1}{k} - 1 \right) \frac{1}{\eta_C^*} + 1 \right] = 288 \left[\left(\left(\frac{1,2506 \cdot 10^5}{1,013 \cdot 10^5} \right)^{0,286} - 1 \right) \frac{1}{0,85} + 1 \right] = 309,05 \text{ K}.$$

16. Газодинамическая функция давления воздуха на срезе выходного сопла вихревого эжектора:

$$\pi(\lambda_3) = \frac{P_3}{P_{03}} = \frac{1.013 \cdot 10^5}{1.2506 \cdot 10^5} = 0.810$$
.

17. Коэффициент скорости:

$$\lambda_3 = \sqrt{\left[1 - \pi(\lambda_3)^{\frac{k-1}{k}}\right]^{\frac{k+1}{k}}} = \sqrt{\left[1 - 0.810^{0.286}\right]^{\frac{1}{4} + 1}} = \sqrt{0.35092} = 0.5924.$$

18. Расходная газодинамическая функция смеси воздуха на выходе из вихревого эжектора:

$$q(\lambda_3) = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda_3 \left(1 - \frac{k-1}{k+1}\lambda_3^2\right)^{\frac{1}{k-1}} = 1, 2^{2,5} \cdot 0, 5924 \left(1 - \frac{1,4-1}{1,4+1}0,5924^2\right)^{2,5} = 0,80374.$$

19. Площадь среза сопла для выхода смеси воздуха их вихревого эжектора:

$$F_3 = \frac{G_3\sqrt{T_{03}}}{mP_{03}q(\lambda_3)} = \frac{0,22\sqrt{288}}{0,0404 \cdot 1,2506 \cdot 10^5 \cdot 0,80374} = 9,194 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

20. Диаметр среза сопла для выхода смеси воздуха из вихревого эжектора:

$$d_3 = \sqrt{\frac{4F}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 9,194 \cdot 10^{-4}}{3,14}} = \sqrt{11,7120 \cdot 10^{-4}} = 3,422 \cdot 10^{-2} \text{ m}.$$

21. Величина касательных напряжений между высоконапорным и низконапорным воздухом:

$$\tau = P_{01} - P_{03} = 1,5 \cdot 10^5 - 1,2506 \cdot 10^5$$
 Па.

22. Температурная газодинамическая функция смеси газов на выходе из вихревого эжектора:

$$\tau(\lambda_3) = \left(1 - \frac{k-1}{k+1}\lambda_3^2\right) = 1 - \frac{1, 4-1}{1, 4+1}0, 5924^2 = 0,94151.$$

23. Статическая температура смеси газов на выходе из вихревого эжектора:

$$T_3 = T_{03}\tau(\lambda_3) = 288 \cdot 0,94151 = 271,15$$
 K.

24. Критическая скорость смеси воздуха на выходе из вихревого эжектора:

$$a_{\rm kp3} = \sqrt{\frac{2k}{k+1}RT_{03}} = \sqrt{\frac{2\cdot 1,4}{1,4+1}}287\cdot 288 = 310,5$$
 m/c.

25. Скорость смеси воздуха на выходе из эжектора:

$$V_3 = \lambda_3 \cdot a_3 = 0,5924 \cdot 310,5 = 183,94$$
 m/c.

26. Средняя скорость движения высоконапорного воздуха от входа до выхода из вихревого эжектора:

$$V_{\rm cp} = \frac{V_1 + V_3}{2} = \frac{310, 5 + 183, 94}{2} = 247, 22 \text{ M/c.}$$

27. Число Рейнольдса:

$$\operatorname{Re}_{3} = \frac{V_{\rm cp}d_{1}}{V_{1}} = \frac{247, 22 \cdot 27, 39 \cdot 10^{-3}}{1,506 \cdot 10^{-5}} = 449625.$$

28. Коэффициент сопротивления трения (формула Блазиуса):

$$\xi_1 = \frac{0.3125}{\text{Re}_3^{0.25}} = \frac{0.3125}{449625^{0.25}} = 0.01207$$
.

29. Плотность газа на входе в эжектор:

$$\rho_1 = \frac{P_1}{RT_1} = \frac{1,013 \cdot 10^5}{287 \cdot 288 \cdot \left(1 - \frac{1,4 - 1}{1,4 + 1}0,79824^2\right)} = \frac{1,013 \cdot 10^5}{73878,1} = 1,371 \text{ kr/m}^3.$$

Обсуждение результатов

На основе решения замкнутой математической модели, описывающей рабочий процесс вихревого эжектора, составлена методика расчета оптимальной геометрии вихревого эжектора. Дан пример расчета одного из возможных вариантов вихревого эжектора.

Расчеты по данной методике удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными наших исследований и исследований других авторов [12; 16].

Теоретически и экспериментально установлено, что энергообмен между высоконапорным и низконапорным газами происходит путем передачи кинетической энергии касательными напряжениями в вязкой среде при наличии градиента угловых скоростей, возникающих в вихревом эжекторе. Результатом энергообмена является повышение энергии низконапорного газа и понижение энергии высоконапорного газа до значений полного давления и полной температуры на выходе из вихревого эжектора.

Заключение

Результаты исследований авторов показали, что в вихревом эжекторе в результате взаимодействия низконапорный (эжектируемый) газ повышает полную температуру и полное давление за совершение над ним работы со стороны высоконапорного (эжектирующего) газа. Кинетическая энергия передается касательными напряжениями в вязкой среде за счет градиента угловых скоростей.

Составлена замкнутая математическая модель рабочего процесса вихревого эжектора, результатом решения является разработанная методика расчета оптимальной геометрии вихревого эжектора. Результат расчета по данной методике дает удовлетворительное совпадение с теоретическими исследованиями авторов и экспериментами других исследователей.

Библиографические ссылки

1. Кузнецов В. И., Макаров В. В. Вихревой и струйный эжекторы, трубы Гартмана-Шпренгера, эффект Ранка: механизм энергообмена // Решетневские чтения. 2021. С. 201–202.

2. Аркадов Ю. К. Новые газовые эжекторы и эжекционные процессы. М. : Физматлит, 2001. 336 с.

3. Uss A. Yu., Chernyshev A. V. The Development of the Vortex Gas Pressure Regulator // AJP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1876.

4. Разработка стенда для визуализации и экспериментального исследования рабочего процесса в вихревом струйном устройстве / А. Ю. Усс, А. С. Пугачук, А. В. Чернышев и др. // Машиностроение. 2020. № 7 (724).

5. Кузнецов В. И., Макаров В. В. Метод расчета оптимальной геометрии вихревого эжектора // Решетневские чтения. 2021. С. 205–206. 6. Усс А. Ю., Чернышев А. В., Атамасов Н. В. Разработка метода расчета и создание вихревого струйного устройства для управления потоком газа // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2019. Т. 3, № 2. С. 78–86. Doi: 29206/2588-0373-2019-3-78-86.

7. Мартынов В. С., Бродянский В. М. Что такое вихревая труба? М. : Энергия, 1976. 152 с.

8. Уколов А. И., Родионов В. П. Верификация результатов численного моделирования и экспериментальных данных влияние кавитации на гидродинамические характеристики струйного потока // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2018. № 4. С. 102–114.

9. Курников А. С., Мизгирев Д. С. Черепкова Е. А Расчет гидродинамического кавитатора с тороидальной камерой смещения. // Вестник гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. 2015. № 4 (32). С. 60–66.

10. Uss A. Yu., Chernyshev A. V. The Development of the Vortex Gas Pressure Regulator // Procedia Engineering. 2016. Vol. 152. P. 380–388. Doi:10.1016/J.PROENG.2016.07.718.

11. Кузнецов В. И., Макаров В. В., Шандер А. Ю.Физико-математическая модель рабочего процесса вихревой трубы // Омский науч. вестник. Сер. Авиац. и ракет.-космич. техн. 2021. Т. 5, № 2. С. 78–87. Doi:10.25206/2588-0373-2021-5-2-78-87.

12. Uss A. Yu., Chernyshev A. V. The Development of the Vortex Gas Pressure Regulator // AJP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1876. 020025. Doi: 10.1063/1.4998845.

13. Усс А. Ю., Чернышев А. В., Атамасов Н. В. Разработка метода расчета и создание вихревого струйного устройства для управления потоком газам // Омский науч. вестник. Сер. Авиац.-ракет. и энергетич. машиностроение. 2019. Т. 3, № 2. С. 78–86. Doi: 10.25206/2588-0373-2019-3-2-78-86.

14. Vortex With flow control by syntheticjets / V. Tesat, Z. Brouckova, J. Kordik et al. // The European Physical journal Web of Conferences. 2012. Vol. 25. P. 01092. Doi: 10.1051 / epjcont / 20122501292.

15. Степин В. А. Вихревые и двухфазные потоки в технологии промывки судовых систем : монография. Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М. В. Ломоносова.

16. Кузнецов В. И., Якимушкин Р. В., Шерберген А. Ю Результаты сравнительных испытаний охладителя наддувочного воздуха комбинированного дизеля // Спец. техника и технологии транспорта : сб. науч. ст. СПб., 2019. С. 131–139.

References

1. Kuznetsov V. I., Makarov V. V. [ortex and jet ejectors, Hartmann-Sprenger tubes, Rank effect: energy exchange mechanism]. *Reshetnevskie chteniya*. 2021, P. 201–202 (In Russ.).

2. Arkadov Yu. K. *Novye gazovye ezhektory i ezhektsionnye protsessy* [New gas ejectors and ejection processes]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001, 336 p (In Russ.).

3. Uss A. Yu., Chernyshev A. V. The Development of the Vortex Gas Pressure Regulator. *AJP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 1876.

4. Uss A. Yu., Pugachuk A. S., Chernyshev A. V. et al. [Development of a stand for visualization and experimental study of the working process in a vortex jet device]. *Mashinostroenie*. 2020, No. 7, P. 724 (In Russ.).

5. Kuznetsov V. I., Makarov V. v. [Method of calculating the optimal geometry of a vortex ejector]. Reshetnevskie chteniya. 2021. P. 205–206 (In Russ.).

6. Uss A. Yu., Chernyshev A. V., Atamasov N. V. [Development of a calculation method and creation of a vortex jet device for gas flow control]. *Omskii nauchnyi vestnik. Ser. Aviatsionno-raketnoe i energeticheskoe mashinostroenie.* 2019, Vol. 3, No. 2, P. 78–86 (In Russ.). Doi: 29206/2588-0373-2019-3-78-86.

7. Martynov V. S., Brodyanskii V. M. *Chto takoe vikhrevaya truba?* [What is a vortex tube?]. Moscow, Energiya Publ., 1976, 152 p.

8. Ukolov A. I., Rodionov V. P. [Verification of the results of numerical modeling and experimental data on the effect of cavitation on the hydrodynamic characteristics of the jet flow]. *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Ser. Estestvennye nauki.* 2018. № 4. P. 102–114 (In Russ.).

9. Kurnikov A. S., Mizgirev D. S. Cherepkova E. A. [Calculation of a hydrodynamic cavitator with a toroidal displacement chamber.]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova.* 2015, No. 4 (32), P. 60–66 (In Russ.).

10. Uss A. Yu., Chernyshev A. V. The Development of the Vortex Gas Pressure Regulator. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 152. P. 380–388. Doi: 10.1016/J.PROENG.2016.07.718.

11. Kuznetsov V. I., Makarov V. V., Shander A. Yu. [Physical and mathematical model of the working process of a vortex tube]. *Omskii nauchnyi vestnik. Ser. Aviatsionnaya i raketno-kosmicheskaya tekhnika.* 2021, Vol. 5, No. 2, P. 78–87 (In Russ.). Doi: 10.25206/2588-0373-2021-5-2-78-87.

12. Uss A. Yu., Chernyshev A. V. The Development of the Vortex Gas Pressure Regulator. *AJP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 1876, P. 020025. Doi: 10.1063/1.4998845.

13. Uss A. Yu., Chernyshev A. V., Atamasov N. V. [Development of a calculation method and creation of a vortex jet device for gas flow control]. *Omskii nauchnyi vestnik. Ser. Aviatsionno-raketnoe i energeticheskoe mashinostroenie.* 2019, Vol. 3, No. 2, P. 78–86 (In Russ.). Doi: 10.25206/2588-0373-2019-3-2-78-86.

14. Tesat V., Brouckova Z., Kordik J., Travnicek Z., Paszynsku V. Vortex With flow control by syntheticjets. *The European Physical journal Web of Conferences*. 2012, Vol. 25. P. 01092. Doi: 10.1051 / epjcont / 20122501292.

15. Stepin V. A. Vikhrevye i dvukhfaznye potoki v tekhnologii promyvki sudovykh system [Vortex and two-phase flows in the technology of flushing ship systems]. Sev. (Arctic) feder. un-t im. M. V. Lomonosov.

16. Kuznetsov V. I., Yakimushkin R. V., Sherbergen A. Yu. [Results of Comparative Tests of the Combined Diesel Charge Air Cooler, Spec. technique and technology of transport]. *Spetsial'naya tekhnika i tekhnologii transporta*. Sankt-Peterburg, 2019, P. 131–139.

© Кузнецов В. И., Макаров В. В., Щука И. О., 2022

Кузнецов Виктор Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры авиа- и ракетостроения; Омский государственный технический университет. E-mail: vi.kuznetzov@yandex.ru.

Макаров Владимир Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры авиа- и ракетостроения; Омский государственный технический университет. E-mail: vvmakarov@omgtu.tech.

Щука Ирина Олеговна – кандидат технических наук, доцент; Сибирский институт бизнеса и информационных технологий.

Kuznetsov Viktor Ivanovich – Dr. Sc., Professor of the Department of Aircraft and Rocket Engineering; Omsk State Technical University. E-mail: vi.kuznetzov@yandex.ru.

Makarov Vladimir Vyacheslavovich – Cand. Sc., Associate Professor of the Department of Aircraft and Rocket Engineering; Omsk State Technical University. E-mail: vvmakarov@omgtu.tech.

Shchuka Irina Olegovna - Cand. Sc., Cent; Siberian Institute of Business and Information Technologies.
УДК 629.783 Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-284-294

Для цитирования: Измерение давления внутри негерметичного приборного отсека геостационарного космического аппарата / С. А. Мордовский, И. А. Максимов, В. В. Иванов и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 2. С. 284–294. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-284-294.

For citation: Mordovskiy S. A., Maksimov I. A., Ivanov V. V., Sitnikova N. N., Trofimchuk D. A. [Pressure measurement inside non-sealed equipment bay of the geostationary spacecraft]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 2, P. 284–294. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-284-294.

Измерение давления внутри негерметичного приборного отсека геостационарного космического аппарата

С. А. Мордовский *, И. А. Максимов, В. В. Иванов, Н. Н. Ситникова, Д. А. Трофимчук

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

В процессе летной эксплуатации космических аппаратов в негерметичном исполнении, бортовая аппаратура находится в окружении собственной атмосферы.

В АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» (АО «ИСС») совместно с Московским авиационным институтом (национальным исследовательским университетом) (МАИ) разработана и программно реализована математическая модель для оценок динамики давления собственной атмосферы негерметичного отсека и выбора проектных параметров и конструктивного исполнения вентиляционных отверстий негерметичного приборного отсека. Также проведена расчетная оценка динамики спада давления собственной атмосферы негерметичного приборного отсека по данной математической модели.

Для натурного измерения давления внутри негерметичного приборного отсека в процессе летной эксплуатации в состав геостационарного космического аппарата был интегрирован блок датчиков давления совместной разработки АО «ИСС» и Новосибирского государственного университета. Блок состоит из двух датчиков: полупроводниковый датчик на основе MEMC-технологии (микро-электромеханическая система) и инверсно-магнетронный датчик с холодным катодом. В целом блок датчиков давления обеспечивает измерение давления от 790 до 1·10⁻⁸ мм рт. ст. Авторами приведены результаты измерений давления внутри негерметичного приборного отсека в первые шесть месяцев эксплуатации космического аппарата на геостационарной орбите.

Также в данной статье проведено сравнение результатов натурного измерения давления и расчетного спада давления, полученного с помощью математической модели, в космических annapaтах с негерметичным исполнением приборного отсека.

Ключевые слова: космический аппарат, негерметичный приборный отсек, давление, аппаратура.

Pressure measurement inside non-sealed equipment bay of the geostationary spacecraft

S. A. Mordovskiy*, I. A. Maksimov, V. V. Ivanov, N. N. Sitnikova, D. A. Trofimchuk

JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems" 52, Lenin St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation E-mail: mordovsky@iss-reshetnev.ru The equipment of the non-sealed spacecraft is functioning during the operation phase in the environment that includes the equipment bay inherent atmosphere.

JSC "ISS" together with MAI have developed and implemented in software a mathematical model for the pressure dynamics estimation of the equipment bay inherent atmosphere and for the design parameters selection and construction of the ventilation openings of the non-hermetic equipment bay. The pressure drop dynamics estimation of the equipment bay inherent atmosphere was also carried out according to the developed model.

A block of the pressure sensors (joint development of ISS and Novosibirsk State University) was integrated into the geostationary spacecraft for the in-situ pressure measurement inside the nonhermetic equipment bay during the operation. This block consists of two sensors: a semiconductor sensor based on MEMS- technology (micro-electromechanical system) and an inverse magnetron sensor with the cold cathode. The pressure sensor unit provides the pressure measurement from 790 up to $1 \cdot 10^8$ mm Hg. The authors present the results of pressure measurements inside the non-hermetic equipment bay during the first six months of the spacecraft operation on the geostationary orbit.

This article also compares the in-situ pressure measurement results and the calculated pressure drop obtained using the mathematical model for the non-hermetic equipment bay spacecraft.

Keywords: spacecraft, non-hermetic equipment bay, pressure, equipment.

Введение

Современный опыт развития космической техники характеризуется ростом функциональной сложности целевой аппаратуры космических аппаратов (КА), организацией обработки цифровой информации на борту КА и передачей её потребителю в реальном масштабе времени, снижением массогабаритных характеристик, увеличением автономности и сроков активного существования КА. Существенным элементом, препятствующим успешной реализации поставленных перед космической техникой задач, является негативное воздействие на бортовые системы КА факторов космического пространства (ФКП) и факторов техногенного характера (ФТХ). В АО «ИСС» более 20 лет ведется изучение влияния на КА ФКП и ФТХ [1–12].

При штатной эксплуатации КА в негерметичном исполнении бортовая аппаратура находится в окружении собственной атмосферы (СА), которая состоит из собственной внешней атмосферы (СВА) и собственной атмосферы негерметичного отсека (САНО). СВА – газовая среда вокруг космического аппарата, образующаяся в результате процессов массоотделения, САНО – газовая среда в негерметичном приборном отсеке, образующаяся в результате замещения остатков земной атмосферы продуктами газовыделения неметаллических конструкционных материалов. СА является техногенным фактором, который влияет на работоспособность бортовых систем КА посредством взаимодействия с токоведущими элементами бортовой аппаратуры, находящимися под напряжением 100 В и выше.

Известно, что электрическая прочность вакуумных промежутков между токоведущими элементами аппаратуры зависит от величины давления окружающей среды, напряжения на электродах, линейных размеров промежутков, материалов и площадей токоведущих элементов, их формы, диэлектрических покрытий и т. д. [13–15].

САНО, изменяющая изоляционные характеристики вакуумных промежутков между токоведущими элементами бортовой аппаратуры, является одним из техногенных факторов, ответственных за возникновение электрического пробоя и, как следствие, негативного воздействия на работоспособность бортовой аппаратуры [16; 17].

Расчетная оценка динамики спада давления

Из-за характерных особенностей к целому ряду бортовой аппаратуры предъявляются особые требования к функционированию в условиях давления САНО. Для данного оборудования при наземных испытаниях определяется критичный диапазон давления, влияющий на его работоспособность с точки зрения возникновения высоковольтного электрического пробоя. С целью обеспечения безопасных условий при начальном этапе включения и функционирования бортовой аппаратуры проводится расчетная оценка параметров давления СА внутри НГПО. Для этого AO «ИСС» совместно с МАИ разработана и программно реализована математическая модель оценки динамики давления САНО, выбора проектных параметров НГПО и конструктивного исполнения вентиляционных отверстий. По оценкам в многосекционном НГПО КА давление в начальный период летной эксплуатации снижается от атмосферного до величины $1,3\cdot10^{-3}$ Па (10^{-5} мм рт. ст.) в течение 36 ч (1,5 суток) при наличии в НГПО вентиляционных отверстий площадью 0,021 м². На рис. 1 и 2 представлены результаты предварительной расчетной оценки внешнего давления и давления в НГПО КА в начальный период летной эксплуатации.

Скачкообразное увеличение давления, видимое на рис. 1 и 2, обусловлено изменением температуры в НГПО, связанное с включением приборов.



Рис. 1. Предварительные зависимости внешнего давления и давления в негерметичном приборном отсеке КА от времени в начальный период летной эксплуатации







Fig. 2. Preliminary dependencies on time for the outside pressure and for the non-hermetic equipment bay pressure during the first 6 days of the flight

Аппаратура мониторинга динамики давления

Для мониторинга динамики давления внутри НГПО в процессе летной эксплуатации в состав геостационарного КА был интегрирован блок датчиков давления (БДД) совместной разработки АО «ИСС» и НГУ.

БДД обеспечивает измерение давления от 790 до 1·10⁻⁸ мм рт. ст.

В блоке БДД для измерения давления используются два датчика: полупроводниковый датчик на основе MEMC-технологии (микро-электромеханическая система) для работы в диапазоне от 790 до $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. и инверсно-магнетронный датчик с холодным катодом для работы в диапазоне от $1 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст.

Полупроводниковый датчик на основе MEMC-технологии (рис. 3) представляет собой высокоточный измеритель значения теплопроводности исследуемого газа. Значение проводимости тепла зависит от давления газа, действующего на датчик, так как уменьшение давления ведет к уменьшению концентрации газа у поверхности датчика, что, в свою очередь, приводит к уменьшению переноса тепла от одной рабочей части датчика к другой.

Инверсно-магнетронный датчик с холодным катодом (рис. 4), использующийся в БДД, измеряет абсолютное давление, ионизируя остаточный газ в рабочем объеме датчика. Цилиндрический корпус датчика используется как катод с нулевым потенциалом. На анод, расположенный в центре датчика, во время работы подается напряжение более 1500 В. Магнитная система, удерживает свободные электроны в области датчика, заставляя их двигаться по эпициклоидам внутри рабочего объема датчика. При столкновении электронов с молекулами остаточного газа происходит ионизация молекул. Ионы, при взаимодействии с катодом вызывают эмиссию вторичных электронов, ток которых пропорционален ионному току.

Переключение датчиков производится в автоматическом режиме при достижении давления $1,4\cdot10^{-4}$ мм рт. ст. Погрешность измерения БДД составляет 20 % при давлении в диапазоне от 790 до $1\cdot10^{-4}$ мм рт. ст. и 50 % в диапазоне $1\cdot10^{-4}$ до $1\cdot10^{-8}$ мм рт. ст.

БДД расположен внутри НГПО на приборной панели. Расположение БДД в составе КА представлено на рис. 5.



Рис. 3. Полупроводниковый датчик на основе МЕМС-технологии

Fig. 3. Semiconductor sensor based on MEMs technology





Рис. 4. Инверсно-магнетронный датчик

Fig. 4. Inverse magnetron sensor

Рис. 5. Размещение БДД в составе КА (сотовая панель не показана)

Fig. 5. Pressure sensors block inside the spacecraft (honeycomb panel is not shown)

Результаты измерений динамики давления в НГПО

В соответствии с программой летных испытаний, было произведено измерение давления на участке выведения КА. На рис. 6 приведен график спада давления внутри НГПО КА № 2 в течение участка выведения. Начальная ровная полка на графике – измерение атмосферного давления от момента инициализации БДД до момента старта РН (ракетоноситель). Более подробное изменение давления под головным обтекателем и внутри НГПО на участке выведения приведено на рис. 7.

Измеренное давление внутри НГПО соответствует расчетным значениям спада давления под головным обтекателем. После отделения от РН давление резко упало. При включении маршевых двигателей (МД) разгонного блока «Бриз-М» фиксируется возрастание давления на время работы двигателей. Кратковременное повышение давления было зафиксировано при сбросе дополнительного топливного бака (ДТБ) и отделением КА. Значение давления на момент отделения КА от РН (контакт отделения – КО), рассчитанное ПО РКDYN, разработки МАИ, и измеренное совпало.



Рис. 6. График спада давления внутри негерметичного приборного отсека в течение участка выведения на КА № 2

Fig. 6. Pressure drop graph inside the non-hermetic equipment bay during the launch for spacecraft № 2



Рис. 7. График спада давления под обтекателем и внутри негерметичного приборного отсека в течение первых 120 с полета РН

Fig. 7. Pressure drop graph inside the fairing and inside the non-hermetic equipment bay for the first 120 sec of the launch vehicle flight

Измерение динамики давления после КО

Величина измеренного давления и температура панели внутри НГПО КА № 1 за период от КО (21.12.2018) по 21.11.2019 представлена на рис. 8. На графике показаны данные: давление – синий цвет (верхняя кривая), температура панели – зеленый (нижняя кривая).

Анализ результатов измерений показывает, что величина давления внутри НГПО зависит от температуры панелей НГПО. В результате повышения температуры внутри НГПО усиливаются процессы газовыделения материалов бортовой аппаратуры и, следовательно, давление возрастает. Более подробно эта зависимость представлена на рис. 9, где приведены значения давления (синяя кривая) и температуры (красная кривая) в период с 3 по 10 февраля 2019 г. В этот период времени на КА № 1 провели частную программу для проверки системы терморегулирования. После отключения обоих жидкостных контуров температура в районе БДД возросла до 30 °C, в результате этого давление кратковременно возросло до 10⁻⁴ мм рт. ст.



Рис. 8. График спада давления (верхняя синяя кривая) и температуры (нижняя зеленая кривая) внутри негерметичного приборного отсека на КА № 1

Fig. 8. Pressure (upper blue line) and temperature (lower green line) drop graph inside the non-hermetic equipment bay for spacecraft № 1



Рис. 9. Давление и температура в период с 3 по 10 февраля 2019 г. Fig. 9. Pressure and temperature between 3th and 10th February 2019

На рис. 10 приведен график спада давления (синяя кривая) и температура панели (зеленая кривая) внутри НГПО на КА № 2. Динамика спада давления на КА № 1 и 2 совпадает. На КА № 2 также видна зависимость давления от температуры панели.

На рис. 11 приведены расчетные значения спада давления и показания двух датчиков давления: полупроводникового датчика на основе MEMC-технологии (датчик давления 1) и инверсно-магнетронного датчика с холодным катодом (датчик давления 2). Расчетные значения приведены в соответствии с математической моделью. На момент КО расчетное значение давления и измеренное совпадает. Далее имеются некоторые расхождения. В соответствии с расчетами, должно быть существенное увеличение давления при включении системы преобразования и управления (СПУ) и бортового ретрансляционного комплекса (БРТК). Однако на КА № 1 отмечено только незначительное увеличение давления с 2·10⁻⁶ до 4·10⁻⁶ мм рт. ст. во время проверочных включений БРТК в течение с 20 января по 2 февраля 2019 г. Возрастание давления во время включения СПУ не зафиксировано.



Рис. 10. График спада давления и температуры внутри негерметичного приборного отсека на КА № 2





Рис. 11. Расчетные значения спада давления (красная кривая) и показания БДД: полупроводниковый датчик на основе MEMC-технологии (зеленая кривая) и инверсно-магнетронный датчик (синяя кривая) на КА № 1

Fig. 11. Pressure drop calculated values (red line) and pressure sensors block data: semiconductor sensor based on MEMs technology (green line) and inverse magnetron sensor (blue line) for spacecraft № 1

Аналогичные результаты измерений динамики спада давления внутри НГПО зафиксированы на КА № 2 (рис. 12). Включение СПУ было 11.08.2019 при давлении ~ 2·10⁻⁵мм рт. ст., включение БРТК было 02.09.2019 при давлении ~ 2·10⁻⁶мм рт. ст., что соответствовало разрешенному диапазону давления, заявленному в конструкторской документации, для включения данного оборудования.



Рис. 12. Спад давления на КА № 2

Fig. 12. Pressure drop for spacecraft № 2

Заключение

В ходе проведенных работ впервые экспериментально в натурных условиях определена динамика спада давления в негерметичном отсеке для КА определенной конструктивной компоновкой схемы от момента старта до начала использования по целевому назначению. В настоящее время массив информации содержит данные за 2 года и 9 месяцев эксплуатации.

Летные испытания подтвердили правильность выбора типов датчиков для выполнения поставленной задачи. Подтверждена возможность проводить непрерывные измерения давления в диапазоне от 790 до 10⁻⁷ мм рт. ст. Чувствительность датчиков давления позволяет фиксировать изменения давления при изменении температуры ~ 5 °C.

Определены временные значения прохождения критической области давления для чувствительной к этому параметру бортовой аппаратуры, расположенной внутри НГПО, что позволит оптимизировать программу включения высоковольтного оборудования и существенно сократить время включения полезной нагрузки на полную мощность.

Проведенная верификация расчетной модели показала, что:

 имеются некоторые расхождения между расчетными значениями давления и измеренными. Таким образом, необходима корректировка модели спада давления и формирования СВА внутри НГПО;

 возрастание давления во время включения СПУ не зафиксировано, что свидетельствует о правильности конструктивного исполнения вентиляционных отверстий в корпусе НГПО; – значительное возрастание давления во время включения БРТК не зафиксировано, что объясняется правильным применением материалов с потерей массы не более 1 %, реализацией процессов обезгаживания при изготовлении узлов бортовой аппаратуры, замедлением процессов дегазации в НГПО.

Длительный мониторинг динамики давления внутри НГПО показал, что данный параметр при данной конструктивно-компоновочной схеме с определенным набором вентиляционных отверстий в течение полугода вышел на равновесный стационарный режим и величина давления в НГПО составляет ~10⁻⁶ мм рт. ст.

Библиографические ссылки

1. Максимов И. А., Кочура С. Г. Исследование влияния факторов космического пространства и техногенных факторов на космические аппараты, разработка методов и средств защиты : монография. Красноярск, 2011, 182 с.

2. Максимов И. А. Проблемы обеспечения надежного функционирования современных космических аппаратов в условиях дестабилизирующего воздействия факторов космического пространства и факторов техногенного характера // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 4(30). С. 100–102.

3. Экспериментальное исследование загрязняющего воздействия собственной внешней атмосферы на этапе орбитальной эксплуатации космического аппарата / А. Б. Надирадзе, И. А. Максимов, В. А. Смирнов и др. // Вестник СибГАУ. 2006. Вып. 1(8). С. 91–95.

4. Оценка времени обезгаживания негерметичного приборного отсека космического аппарата / А. Б. Надирадзе, А. А. Чиров, В. В. Шапошников и др. // Вестник СибГАУ. 2007. Вып. 1(14). С. 95–98.

5. Повышение надежности негерметичного отсека космического аппарата / И. А. Максимов, В. А. Смирнов, В. В. Иванов и др. // Вестник СибГАУ. 2007. Вып. 1(14). С. 88–90.

6. Экспериментальное определение загрязняющего и эрозионного воздействия струй электроракетных двигателей на материалы космических аппаратов / А. Б. Надирадзе, Е. Б. Паршина, В. В. Шапошников и др. // Авиация и космонавтика – 2005 : материалы 4 Междунар. конф., 10–13 ноября, 2005 г., Москва. М. : МАИ, 2005. 1 с.

7. Математическое моделирование загрязнения внешних поверхностей космического аппарата выхлопами электроракетных двигателей и компонентами собственной внешней атмосферы / А. Б. Надирадзе, В. В. Шапошников, В. М. Арбатский и др. // Материалы IV междунар. аэрокосмич. конгресса, 18–23 августа 2003, Москва. 1 с.

8. Мониторинг радиационной обстановки на геостационарной орбите в максимуме 23-го цикла солнечной активности / Т. А. Иванова, Н. Н. Павлов, С. Я. Рейзмани и др. // Физические проблемы экологии : материалы 3-й Всерос. науч. конф., 22–24 мая 2001 г., Москва, МГУ. М., 2001. Т. 6. 8 с.

9. Контроль радиационной обстановки на высокоапогейных КА / Н. А. Власова, И. В. Гецелев, Т. А. Иванова и др. // Электризация космических аппаратов и совершенствование их антистатической защиты как средства увеличения надежности и сроков активного существования : материалы V межотраслевой науч.-технич. конф., 16–17 мая 2002 г. Королев, ЦНИИмаш, 2002. 1 с.

10. Моделирование и мониторинг радиационной обстановки в магнитосфере Земли на высокоапогейных космических аппаратах / Э. Н. Сосновец, М. И. Панасюк, Н. А. Власова и др. // Солнечно-земная физика : материалы конф. по физике солнечно-земных связей, 24–29 сентября 2001 г., Иркутск. 2002. Т. 2 (115).1 с.

11. Создание системы мониторинга внешних воздействующих факторов, возникающих в результате функционирования КА / И. А. Максимов, Ю. М. Прокопьев, В. В. Хартов и др. // Материалы IV междунар. аэрокосмич. конгресса, 18–23 августа 2003, Москва. 1 с.

12. Крылов А. Н., Мишина Л. В., Чудина Н. А. Динамика изменения давления в негерметичных отсеках спутников на геостационарных орбитах // Авиационное приборостроение. 2006. № 3. С. 55–58.

13. Моделирование процессов формирования СВА и загрязнения поверхности КА / Надирадзе А. Б., Шапошников В. В., Хартов В. В. и др. Гл. 1.1. Модель Космоса : 8 изд. Т. 2. М., 2007.

14. Новиков Л. С. Современное состояние и перспективы исследований взаимодействия космических аппаратов с окружающей средой. Введение. Модель Космоса : 8 изд. Т. 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование КА. М., 2007.

15. Исследование загрязняющего воздействия собственной внешней атмосферы и плазмы стационарных плазменных двигателей на КА «Экспресс-АМ» / В. А. Смирнов, А. К. Шатров, И. А. Максимов и др. // Вестник СибГАУ. 2006. Вып. 2(9). С. 46–50.

16. Measurement of plasma parameters in the stationary plasma thruster (SPT-100) plume and its effects on spacecraft components / S.K. Absalamov etc. // 28th Joint Propulsion Conference and Exhibition, 6–8 July, 1992. Nashive, 1992.

17. Rantanen, R.O. Determination of Space Vehicle Contamination / R. O. Rantanen, L. E. Bareiss, E. B. Ress // Proc. Of Centre Natianal D'Etudes Spatiales Symphosium on Evaluation of Space Environment on Materials, held at Toulouse. France. P. 211–232.

References

1. Maksimov I. A., Kochura S. G. *Issledovanie vliyaniya faktorov kosmicheskogo prostranstva i tekhnogennykh faktorov na kosmicheskie apparaty, razrabotka metodov i sredstv zashchity* [Study of the influence of space factors and man-made factors on spacecraft, development of methods and means of protection]. Krasnoyarsk, 2011, 182 p.

2. Maksimov I. A. [Problems of ensuring the reliable functioning of modern spacecraft in conditions of the destabilizing effect of space factors and man-made factors]. *Vestnik SibGAU*. 2010, No. 4(30), P. 100–102 (In Russ.).

3. Nadiradze A. B., Maksimov I. A., Smirnov V. A. [Experimental study of the polluting effect of its own external atmosphere at the stage of orbital operation of the spacecraft]. *Vestnik SibGAU*, 2006, No. 1(8), P. 91–95 (In Russ.).

4. Nadiradze A. B., Chirov A. A., Shaposhnikov V. V. [Estimation of the degassing time of the leaking instrument compartment of the spacecraft]. *Vestnik SibGAU*. 2007, No. 1 (14), P. 95–98 (In Russ.).

5. Maksimov I. A., Smirnov V. A., Ivanov V. V. [Increasing the reliability of the leaky compartment of the spacecraft]. *Vestnik SibGAU*. 2007. No. 1 (14). P. 88–90 (In Russ.).

6. Nadiradze A. B., Parshina E. B., Shaposhnikov V. V. [Experimental determination of the polluting and erosive effects of jets of electric rocket engines on materials of spacecraft]. *Materialy 4-oy mezhdunarodnoy konferentsii "Aviatsiya i kosmonavtika – 2005"* [Materials 4 Intern. Scientific. Conf. "Aviatsiya i kosmonavtika – 2005"]. Moscow, 2005, P. 1 (In Russ.).

7. Nadiradze A. B., Shaposhnikov V. V., Arbatskiy V. M. [Mathematical modeling of contamination of outer surfaces of a spacecraft by exhaust of electric rocket engines and components of its own external atmosphere]. *Materialy chetvertogo mezhdunarodnogo aerokosmicheskogo kongressa* [Materials of the fourth international aerospace congress]. Moscow, 2003, P. 1 (In Russ.).

8. Ivanova T. A., Pavlov N. N., Reyzman S. Ya. [Monitoring of the radiation situation in the geostationary orbit at the maximum of the 23rd solar cycle]. *Materialy 3-y Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii "Fizicheskie problemy ekologii"* [Materials of the 3rd All-Russian Scientific Conference "Physical Problems of Ecology"]. Moscow, 2001, Vol. 6, P. 8 (In Russ.).

9. Vlasova N. A., Getselev I. V., Ivanova T. A. [Monitoring the radiation situation on high-apogee spacecraft]. *Materialy V mezhotraslevoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Elektrizatsiya kos-micheskikh apparatov i sovershenstvovanie ikh antistaticheskoy zashchity kak sredstva uvelicheniya na-dezhnosti i srokov aktivnogo sushchestvovaniya"* [Materials of the V interdisciplinary scientific and technical conference "Electrification of spacecraft and improvement of their antistatic protection as a means of increasing the reliability and terms of active existence"]. Korolev, 2002, p. 1. (In Russ).

10. Sosnovets E. N., Panasyuk M. I., Vlasova N. A. [Modeling and monitoring of the radiation situation in the Earth's magnetosphere on high-apogee spacecraft]. *Materialy konferentsiya po fizike solnechno-zemnykh svyazey "Solnechno-zemnaya fizika"* [Materials conference on the physics of solarterrestrial relations "Solar-terrestrial physics"]. Irkutsk, 2002, Vol. 2 (115), P. 1 (In Russ.). 11. Maksimov I. A., Prokop'ev Yu. M., Khartov V. V. [Creation of a monitoring system for external influencing factors arising from the operation of the spacecraft]. *Materialy Chetvertogo mezhdunarodnogo aerokosmicheskogo kongressa* [Materials of the Fourth International Aerospace Congress]. Moscow, 2003, P. 1 (In Russ.).

12. Krylov A. N., Mishina L. V., Chudina N. A. [Dynamics of pressure changes in leaky compartments of satellites in geostationary orbits]. *Aviatsionnoe priborostroenie*. 2006, No. 3, P. 55–58 (In Russ.).

13. Nadiradze A. B., Shaposhnikov V. V., Khartov V. V. *Modelirovanie protsessov formirovaniya SVA i zagryazneniya poverkhnosti KA* [Modeling the processes of formation of NEA and contamination of the spacecraft surface]. Moscow, 2007.

14. Novikov L. S., Sovremennoe sostoyanie i perspektivy issledovaniy vzaimodeystviya kosmicheskikh apparatov s okruzhayushchey sredoy, Vvedenie, Model' Kosmosa, vos'moe izdanie. Tom 2. Vozdeystvie kosmicheskoy sredy na materialy i oborudovanie KA [Current state and prospects of research into the interaction of spacecraft with the environment, Introduction, Model of the Cosmos, eighth edition. Vol. 2. The impact of the space environment on materials and equipment of the spacecraft]. Moscow, 2007.

15. Smirnov V. A., Shatrov A. K., Maksimov I. A. [Investigation of the polluting effect of its own external atmosphere and plasma of stationary plasma engines on the Express-AM spacecraft]. *Vestnik SibGAU*. 2006, No. 2(9), P. 46–50. (In Russ.).

16. Absalamov S. K. Measurement of plasma parameters in the stationary plasma thruster (SPT-100) plume and its effects on spacecraft components. 28th Joint Propulsion Conference and Exhibition. Nashive. 1992.

17. Rantanen R. O., Bareiss L. E., Ress E. B. Determination of Space Vehicle Contamination. *Proc. Of Centre Natianal D'Etudes Spatiales Symphosium on Evaluation of Space Environment on Materials, held at Toulouse.* France. P. 211–232.

© Мордовский С. А., Максимов И. А., Иванов В. В., Ситникова Н. Н., Трофимчук Д. А., 2022

Мордовский Сергей Александрович – начальник группы; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: mordovsky@iss-reshetnev.ru.

Иванов Владимир Васильевич – кандидат технических наук, заместитель начальника отдела; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: ivanov@iss-reshetnev.ru.

Ситникова Нинель Николаевна – ведущий инженер; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: nns@iss-reshetnev.ru.

Трофимчук Денис Александрович – ведущий конструктор; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: trofimchukda@iss-reshetnev.ru.

Mordovskiy Sergey Aleksandrovich – head of group; JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems". E-mail: mordovsky@mail.ru.

Maximov Igor Aleksandrovich – Dr. Sc., head of department; JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems". E-mail: mia@iss-reshetnev.ru.

Ivanov Vladimir Vasilevich – Cand. Sc., vice head; JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems". E-mail: ivanov@iss-reshetnev.

Sitnikova Ninel Nikolaevna – lead engineer; JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems". E-mail: nns@iss-reshetnev.ru.

Trofimchuk Denis Aleksandrovich – lead designer; JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems". E-mail: trofden@mail.ru.

Максимов Игорь Александрович – доктор технических наук, начальник отдела; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: mia@iss-reshetnev.ru.





УДК 621.791.722 Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-296-304

Для цитирования: Моделирование режима электронно-лучевой сварки тонкостенной конструкции из сплава АД31 / С. О. Курашкин, Ю. Н. Серегин, В. С. Тынченко и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 2. С. 296–304. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-296-304.

For citation: Kurashkin S. O., Seregin Yu. N., Tynchenko V. S., Murygin A. V., Kotelnikova S. V. [Simulation of the mode of electron-beam welding of a thin-wall structure from AD31 alloy]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 2, P. 296–304. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-296-304.

Моделирование режима электронно-лучевой сварки тонкостенной конструкции из сплава АД31^{*}

С. О. Курашкин^{*}, Ю. Н. Серегин, В. С. Тынченко, А. В. Мурыгин, С. В. Котельникова

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

В статье содержатся результаты, полученные авторами при исследовании возможности применения электронно-лучевой сварки (ЭЛС) для тонкостенных конструкций из алюминиевого сплава АДЗ1. Сегодня ЭЛС подобных конструкций не используется вследствие отсутствия технологии. В настоящее время на производстве используются другие технологии соединения подобных конструкций, однако они имеют высокую себестоимость, причина которой объясняется высоким проиентом брака. Предложенный авторами способ применения ЭЛС позволит существенно повысить качество соединения в тонкостенных конструкциях и воспроизводимость технологического режима сварки изделий. Авторы разработали технологическое решение представленной задачи, опираясь на многолетний опыт по использованию моделей тепловых процессов, сопровождаемых при электронно-лучевой сварке. В качестве предмета исследования предложено моделирование параметров электронно-лучевой сварки тонкостенных труб для волноводных трактов, изготавливаемых из алюминиевого сплава АД31. В статье приведены результаты математического моделирования технологических параметров при нагреве алюминиевого сплава источниками энергии, эквивалентными электронному пучку при ЭЛС. Анализ и оценка результатов моделирования проводилась с применением критерия оптимальности, разработанного авторами. В основе расчетов, выполненных авторами, применен функционал, использующий математические модели нагрева металла комплексным источником тепла, состоящим из подвижных мгновенных точечных и линейного источников энергии. В статье приведены результаты расчетов для пластины толщиной 0,12 см, которая соответствует опытным образцам, применяемых при изготовлении волноводных трактов. В результате путем изменения таких значений, как: ток пучка и скорость сварки, было получено распределение температуры на поверхности изделия в процессе ЭЛС, что показало, применимость моделирования для отработки нового технологического процесса.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, моделирование, технологические параметры, программа, оптимизация, распределение энергии.

^{*} Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края и Краевого фонда науки в рамках научного проекта № 20-48-242917 «Модели и методы управления процессом электронно-лучевой сварки тонкостенных конструкций».

The reported study was funded by Russian Foundation for Basic Research, Government of Krasnoyarsk Territory, Krasnoyarsk Regional Fund of Science, to the research project: "Models and methods for controlling the process of electron beam welding of thin-walled structures", project No 20-48-242917.

Simulation of the mode of electron-beam welding of a thin-wall structure from AD31 alloy

S. O. Kurashkin^{*}, Yu. N. Seregin, V. S. Tynchenko, A. V. Murygin, S. V. Kotelnikova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology 31, Krasnoiarskii Rabochi prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation *E-mail: scorpion ser@mail.ru

The article contains the results obtained by the authors in the study of the possibility of using electron beam welding (EBW) for thin-walled structures made of AD31 aluminum alloy. Today, EBW of similar designs are not used due to the lack of technology. Currently, other technologies for connecting similar structures are used in production, but they have a high cost, the reason for which is due to the high percentage of defects. The method of using EBW proposed by the authors will significantly improve the quality of the joint in thin-walled structures and the reproducibility of the technological mode of welding products. The authors have developed a technological solution to the presented problem, based on many years of experience in the use of models of thermal processes, accompanied by electron beam welding. As a subject of research, modeling of the parameters of electron-beam welding of thin-walled pipes for waveguide paths made of aluminum alloy AD31 is proposed. The article presents the results of mathematical modeling of technological parameters during heating of an aluminum alloy by energy sources equivalent to an electron beam during EBW. The analysis and evaluation of the simulation results was carried out using the optimality criterion developed by the authors. The calculations performed by the authors are based on functional using mathematical models of metal heating by a complex heat source consisting of moving instantaneous point and linear energy sources. The article presents the results of calculations for a plate with a thickness of 0.12 cm, which corresponds to prototypes used in the manufacture of waveguide paths. As a result, by changing such values as: beam current and welding speed, the temperature distribution on the surface of the product during the EBW process was obtained, which showed the applicability of modeling for developing a new technological process.

Keywords: electron-beam welding, modelling, technological parameters, software, optimisation, normal distribution law.

Введение

В настоящее время при производстве конструкций волноводных трактов применяются разнообразные технологии, несущие большие затраты вследствие низкой воспроизводимости качества соединений конструкций [1–3]. Малая толщина и низкая температура плавления соединяемых изделий ставит под сомнение целесообразность применения электронно-лучевой сварки в этом направлении [4–6]. В работах [7–9] авторы моделируют процесс электронно-лучевой сварки (ЭЛС) для титанового сплава с целью нахождения оптимального режима. Полученный опыт моделирования привел авторов к идее исследования возможности применения электронно-лучевой сварки тонкостенных алюминиевых конструкций. Таким образом была поставлена цель смоделировать процесс сварки исследуемого материала с заданной толщиной и сравнить результаты моделирования с возможностями электронно-лучевого оборудования.

За основу в исследованиях была принята классическая теория тепловых процессов [10; 11]. Распределение температур в тонкослойном материале при действии на его поверхности подвижного точечного источника может быть рассчитано с использованием метода суперпозиции (сложения источника) [12–15]. Действительный точечный источник, изображенный на рис. 1, принимают перемещающимся по поверхности полубесконечного тела.

Отражение потока теплоты, отдаваемая источником Q_1 , от границы II учитываем введением источника Q_4 , симметричного источнику Q_1 относительно границы II, т.е. на расстоянии 26 от источника Q_1 , действующего на границе I. В свою очередь, граница I для источника Q_4 будет

учтена, если ввести фиктивный источник Q₃, удаленный от границы I на расстояние 2δ. Для учета толщины материала δ при моделировании теплового процесса был введен линейный движущийся источник Q₂.



Рис. 1. Схема введения фиктивных источников для расчета температур в плоском слое

Fig. 1. Scheme of introducing fictitious sources for calculating temperatures in a flat layer

Математический аппарат

Приняв выбранный комплекс источников нагрева и применив метод наложения [10], получаем итоговую модель температуры нагрева (1):

$$T_{\Sigma} = T_1 + T_2 + T_3 + T_4, \tag{1}$$

где $T_1 = T_{\rm H} + \frac{Q_1}{c\rho\sqrt{(4\pi a)^3}} e^{-\frac{vx}{2a}} \int_0^t \exp\left(-\frac{v^2\tau}{4a} - \frac{x^2 + y^2 + z^2}{4a\tau}\right) \frac{d\tau}{\tau^{3/2}}$ – температура нагрева от движуще-

гося по поверхности мгновенного точечного источника;

$$T_2 = T_{\rm H} + \frac{Q_2}{4\pi\lambda\delta} e^{-\frac{vx}{2a}} \int_0^t \exp\left(-\frac{v^2\tau}{4a} - \frac{2\lambda\tau}{c\rho\delta} - \frac{\left(x^2 + y^2\right)}{4a\tau}\right) \frac{d\tau}{\tau} - \text{температура от нагрева движущегося}$$

линейного источника;

$$T_{3} = T_{\rm H} + \frac{Q_{3}}{c\rho\sqrt{(4\pi a)^{3}}} e^{-\frac{vx}{2a}} \int_{0}^{t} \exp\left(-\frac{v^{2}\tau}{4a} - \frac{x^{2} + y^{2} + (z - 2\delta)^{2}}{4a\tau}\right) \frac{d\tau}{\tau^{3/2}}$$
 – температура нагрева от дви-

жущегося над поверхностью фиктивного мгновенного точечного источника;

$$T_{4} = T_{\rm H} + \frac{Q_{4}}{c\rho\sqrt{(4\pi a)^{3}}} e^{-\frac{vx}{2a}} \int_{0}^{t} \exp\left(-\frac{v^{2}\tau}{4a} - \frac{x^{2} + y^{2} + (z+2\delta)^{2}}{4a\tau}\right) \frac{d\tau}{\tau^{3/2}} - \text{температура нагрева от дви-$$

жущегося над поверхностью фиктивного мгновенного точечного источника.

При моделировании теплового процесса авторами используется разработанный ими функционал:

$$J = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} \left(T_{\text{H}i} - \overline{T_{\text{H}}} \right)^2} , \qquad (2)$$

где $T_{\mathrm{H}i} = \frac{T_{\Sigma}}{T_{\mathrm{max}}}$; $T_{\mathrm{max}} = \max T_{\Sigma}$.

Выбор параметров при моделировании осуществлялся по минимуму функционала. Так, например скорость перемещения источника нагрева определялась по координате положения экстремальной точки функционала, как показано на рис. 2.

Расчеты температуры нагрева (2) проводились при значениях времени интегрирования, соответствующих моменту достижения границы зоны термического влияния нижней поверхности нагреваемого материала, пример показан на рис. 3.

В качестве границы зоны термического влияния принято максимальное значение температуры, которой соответствуют справочные [11] свойства исследуемого материала (*c*, ρ, *a*, λ).



Рис. 2. График изменения функционала от скорости перемещения источника нагрева

Fig. 2. Graph of the change in the functional from the speed of movement of the heating source







Критерием оптимальности выбран минимум функционала при вариации того параметра, для которого осуществляется поиск решения Предлагаемый критерий привлекателен тем, что его характер имеет физическую смысловую направленность, вместе с этим критерий имеет экстремумы при характерных значениях варьируемых параметров. Вычисление функционала проводилось для объема, ограниченного зоной термического влияния, показанной на рис. 3. Для моделирования процесса использованы нормированные численные значения функционала.

С физической точки зрения сделано предположение, что минимум предлагаемого функционала пропорционален минимальному рассеянию температуры нагрева металла. Если учесть принятые авторами объемные ограничения на эту функцию, то можно предположить следующее: в случае равномерного нагрева материала, то есть минимальном рассеянии температуры в рассматриваемом объеме, вероятность равномерного расплавления металла будет наивысшей. Что повлечет за собой формирование шва наилучшими качественными показателями и минимальными остаточными напряжениями. Введение нормированных показателей повышает чувствительность критерия, что особенно важно для температур, не превышающих температур фазовых переходов свариваемых материалов.

Результаты

По результатам исследований поведения функционала для различных энергий источника нагрева, авторами был сформирован алгоритм вычислений параметров технологического процесса, рекомендуемых в дальнейшем для отработки технологии электронно-лучевой сварки.

Для наглядности получаемой при моделировании информации результаты вычислений сведены в таблицу.

Результаты вычисления модели (2)

1	2	3	4
Q, [калл]	J	<i>v</i> , [см/с]	<i>t</i> , [c]
3	0,0979	0,21	1,107
4	0,0958	0,27	0,869
5	0,0939	0,32	0,721
6	0,0922	0,36	0,619
7	0,0907	0,40	0,545
8	0,0892	0,44	0,489
9	0,0874	0,49	0,446
10	0,0865	0,52	0,409
11	0,0857	0,56	0,379
12	0,0837	0,60	0,355
13	0,0835	0,64	0,333
14	0,0815	0,67	0,314
15	0,0806	0,70	0,298
16	0,0809	0,74	0,284
17	0,0798	0,77	0,271
18	0,0795	0,80	0,259
19	0,0787	0,84	0,249
20	0,0782	0,86	0,239
21	0,0774	0,90	0,231
22	0,0770	0,93	0,223
23	0,0764	0,96	0,216
24	0,0762	0,99	0,209
25	0,0755	1,02	0,203
26	0,0742	1,05	0,198
27	0,0744	1,07	0,192
28	0,0743	1,11	0,187
29	0,0727	1,13	0,183
30	0,0733	1,16	0,178
31	0,0725	1,18	0,174
32	0,0727	1,22	0,170
33	0,0713	1,24	0,167
34	0,0718	1,27	0,163
35	0,0709	1,29	0,160
36	0,0705	1,32	0,157
37	0,0704	1,35	0,154
38	0,0702	1,37	0,151
39	0,0695	1,41	0,149
40	0,0693	1,42	0,146
41	0,0686	1,45	0,144
42	0,0690	1,47	0,141
43	0,0685	1,50	0,139
44	0,0680	1,52	0,137
45	0,0679	1,55	0,135
46	0,0676	1,57	0,133
47	0,0677	1,60	0,131
48	0,0676	1,62	0,129
49	0,0678	1,64	0,127
50	0,0667	1,67	0,126

В таблицу помещены численные значения заданного комплексного источника нагрева Q, согласно уравнению (1). Численные значения скорости движущегося источника нагрева v и времени интегрирования t выбраны по аналогии с рис. 2 и 3 соответственно. Расчеты проводились с применением упрощенной модели (2), то есть варьировались координаты *у* и *z*, а координата х выбрана по максимальной площади зоны термического влияния. При таком выборе параметров моделирования согласно результатам, полученным авторами ранее [8–10], форма зоны термического влияния максимально приближена к форме поперечного сечения сварного шва. Численные значения функционала *J* в таблице определены по уравнению (2) для всего объема материала, ограниченного зоной термического влияния. Авторы допустили наличие корреляции между значениями всех столбцов таблицы.

По результатам, представленным в таблице, авторами получен график зависимости функционала *J* от значения вводимой энергии комплексного источника нагрева, показанный на рис. 4. Если принять за основу гипотезу о пропорциональности между качеством сварного шва и численного значения функционала (2), то согласно полученной зависимости, изображенной на рис. 4, авторами сделано следующее предположение о том, что при сварке тонкостенных конструкций не требуется оборудование, обеспечивающее высокостабильный очень малый ток сварки.

Таким образом, используя современный инструмент разработки, авторы разработают новый подход к поиску режимов сварки с целью получения стабильного качества сварного шва и повторяемости.

По табличным результатам авторами получен график зависимости энергии источника нагрева и скорости его перемещения, изображенный на рис. 5. Этот график является важным дополнением к рис. 4. Он поясняет, как на практике можно реализовать предлагаемую авторами гипотезу о повышении качества сварного шва за счет правильного сочетания энергии источника нагрева и скорости его движения.

Следует принять во внимание тот факт, моделирование процесса выполнено для идеального источника нагрева. Для реального сварочного оборудования результаты моделирования не соответствуют. Поэтому авторы предлагают определить масштабный коэффициент конкретного оборудования. Для этого необходимо провести пробную сварку на образце с последующим замером глубины проплавления. На графике, показанном на рис. 5, необходимо найти точку, соответствующую скорости, при которой проводили сварку, определяем соответствующую этой точке энергию Q.



Рис. 4. График зависимости функционала от энергии источника нагрева



Рис. 5. График зависимости энергии источника нагрева от скорости его движения





Сопоставив энергию с графика с введенной при сварке, получаем масштабный коэффициент. Таким образом адаптируем графики моделирования с реальным источником нагрева. На полученных авторами графиках представлено значение функционала, соответствующего реальному сварному шву. Также на основе полученных графиков зависимости, предоставляется возможным оценить возможность уменьшения значения функционала с помощью изменения энергии источника и соответствующей корректировкой скорости сварки.

Заключение

В статье разработан новый подход к поиску технологических режимов в электроннолучевой сварке. В ходе исследования авторы провели моделирование тонкостенной пластины из алюминиевого сплава АД31 толщиной 0,12 см. В результате путем изменения таких значений, как: ток пучка и скорость сварки, было получено распределение температуры на поверхности изделия в процессе электронно-лучевой сварки, что показало, что можно отработать новый технологический процесс с помощью моделирования.

Предложенный подход может быть применен при электронно-лучевой сварке элементов конструкций волноводных трактов для повышения надежности их работы за счет повышения коррозионной стойкости на стыках.

Библиографические ссылки

1. Hosseinib S. A., Abdollah-Zadeh A., Naffakh-Moosavy H., Mehri A. Elimination of hot cracking in the electron beam welding of AA2024-T351 by controlling the welding speed and heat input //Journal of Manufacturing Processes. 2019. Vol. 46. P. 147–158.

2. Starkov I. N., Rozhkov K. A., Olshanskaya T. V., Zubko I. A. Expansion of technological capabilities of the electron beam welding installation // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2021. Vol. 2077, No. 1. P. 012021.

3. Kornilov S. Y., Rempe N. G. Formation and focusing of electron beams in an electron-optical system with a plasma emitter in a magnetic field // Technical Physics Journal. 2012. Vol. 82, No. 3. P. 7984.

4. Tyunkov A. V., Burdovitsin V. A., Oks E. M., Yushkov Yu. G. An experimental test-stand for investigation of electron-beam synthesis of dielectric coatings in medium vacuum pressure range // Vacuum. 2019. Vol. 163. P. 31–36.

5. Oltean S. E. Strategies for monitoring and control with seam tracking in electron beam welding // Procedia Manufacturing. 2018. Vol. 22. P. 605–612.

6. Dávid L., György K., Galaczi L. A. Survey of optimal Control and model prediCtive Control with State eStimation and a real time appliCation // Műszaki Tudományos Közlemények. 2020. Vol. 13, No. 1. P. 19–30.

7. Zhang Q., Liu J., Bai L., Feng L., Guo Z. Numerical simulation on electron beam welding of titanium alloy based on ANSYS // Electric Welding Machine. 2015. Vol. 11. P. 1–10.

8. Kurashkin S., Rogova D., Tynchenko V., Petrenko V., Milov A. Modeling of Product Heating at the Stage of Beam Input in the Process of Electron Beam Welding Using the COMSOL Multiphysics System // Proceedings of the Computational Methods in Systems and Software. Springer, Cham. 2020. P. 905–912.

9. Tynchenko V. S., Kurashkin S. O., Murygin A. V., Tynchenko Y. A. Energy distribution modelling in the weld zone for various electron beam current values in COMSOL Multiphysics // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021. Vol. 1889, No. 4. P. 042058.

10. Kurashkin S. O., Seregin Y. N., Tynchenko V. S., Petrenko V. E., Murygin A. V. Mathematical functional for thermal distribution calculating during the electron-beam welding process // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020. Vol. 1515, No. 5. P. 052049.

11. Коновалов А. В. Теория сварочных процессов. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2007. 752 с.

12. Гильмутдинов Р. З. Аналитическое описание поверхностей методом суперпозиции // Наука сегодня: теоретические и практические аспекты. 2015. С. 132–138.

13. Отаров А., Утепбергенова Г., Артыкбаев М. Решение линейных краевых задач для обыкновенных дифференциальных уравнений методом суперпозиции // Вестник каракалпакского государственного университета имени бердаха. 2017. Т. 35. №. 4. С. 3–6.

14. Дельнов В. Н., Левченко Ю. Д., Шепелев С. Ф. Метод суперпозиции при моделировании температурного поля в теплообменных устройствах полем концентраций трассера // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2009. №. 3. С. 152–160.

15. Kaniyazov S. K., Muratov A. S. Research of complex differential conductivity of multi-layer heterostructures // Radioelectronics and Communications Systems. 2011. Vol. 54, No. 11. P. 619–624.

References

1. Hosseinib S. A., Abdollah-Zadeh A., Naffakh-Moosavy H., Mehri A. Elimination of hot cracking in the electron beam welding of AA2024-T351 by controlling the welding speed and heat input. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019, Vol. 46, P. 147–158.

2. Starkov I. N., Rozhkov K. A., Olshanskaya T. V., Zubko I. A. Expansion of technological capabilities of the electron beam welding installation. *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing.* 2021. Vol. 2077, No. 1, P. 012021.

3. Kornilov S. Y., Rempe N. G. Formation and focusing of electron beams in an electron-optical system with a plasma emitter in a magnetic field. *Technical Physics Journal*. 2012, Vol. 82, No. 3, P. 7984.

4. Tyunkov A. V., Burdovitsin V. A., Oks E. M., Yushkov Yu. G. An experimental test-stand for investigation of electron-beam synthesis of dielectric coatings in medium vacuum pressure range. *Vacuum.* 2019, Vol. 163, P. 31–36.

5. Oltean S. E. Strategies for monitoring and control with seam tracking in electron beam welding. *Procedia Manufacturing*. 2018, Vol. 22, P. 605–612.

6. Dávid L., György K., Galaczi L. A. Survey of optimal Control and model prediCtive Control with State eStimation and a real time application. *Műszaki Tudományos Közlemények*. 2020, Vol. 13, No. 1, P. 19–30.

7. Zhang Q., Liu J., Bai L., Feng L., Guo Z. Numerical simulation on electron beam welding of titanium alloy based on ANSYS. *Electric Welding Machine*. 2015, Vol. 11, P. 1–10.

8. Kurashkin S., Rogova D., Tynchenko V., Petrenko V., Milov A. Modeling of Product Heating at the Stage of Beam Input in the Process of Electron Beam Welding Using the COMSOL Multiphysics System. *Proceedings of the Computational Methods in Systems and Software*. Springer, Cham. 2020. P. 905–912.

9. Tynchenko V. S., Kurashkin S. O., Murygin A. V., Tynchenko Y. A. Energy distribution modelling in the weld zone for various electron beam current values in COMSOL Multiphysics. *Journal of Physics: Conference Series.* IOP Publishing. 2021, Vol. 1889, No. 4, P. 042058.

10. Kurashkin S. O., Seregin Y. N., Tynchenko V. S., Petrenko V. E., Murygin A. V. Mathematical functional for thermal distribution calculating during the electron-beam welding process. *Journal of Physics: Conference Series.* IOP Publishing. 2020, Vol. 1515, No. 5, P. 052049.

11. Konovalov A. V. *Teoriya svarochnykh protsessov* [Theory of welding processes]. Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2007, 752 p. (In Russ.).

12. Gilmutdinov R. Z. [Analytical description of surfaces by the superposition method]. *Science today: theoretical and practical aspects*. 2015, P. 132–138. (In Russ.).

13. Otarov A., Utepbergenova G., Artykbaev M. [Solving linear boundary value problems for ordinary differential equations by the superposition method]. *Bulletin of Berdakh Karakalpak State University*. 2017, Vol. 35, No. 4, P. 3–6. (In Russ.).

14. Delnov V. N., Levchenko Yu. D., Shepelev S. F. [Superposition method for modeling the temperature field in heat exchange devices by the tracer concentration field]. *News of higher educational institutions. Nuclear energy*. 2009, No. 3, P. 152–160 (In Russ.).

15. Kaniyazov S. K., Muratov A. S. Research of complex differential conductivity of multilayer heterostructures. *Radioelectronics and Communications Systems*. 2011, Vol. 54, No. 11, P. 619–624.

> Курашкин С. О, Серегин Ю. Н., Тынченко В. С., Мурыгин А. В., Котельникова С. В., 2022

Курашкин Сергей Олегович – аспирант; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: scorpion ser@mail.ru.

Серегин Юрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры информационноуправляющих систем; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ius_ceregin@mail.ru.

Тынченко Вадим Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры информационноуправляющих систем; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: vadimond@mail.ru.

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

Котельникова Светлана Владимировна – доцент кафедры информационно-управляющих систем; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: sv_kot@mail.ru.

Kurashkin Sergei Olegovich – post-graduate student, Department of Information-Control Systems; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: scorpion ser@mail.ru.

Seregin Yuri Nikolaevich – Ph. D., Associate Professor, Department of Information-Control Systems; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: ius ceregin@mail.ru.

Tynchenko Vadim Sergeevich – Ph. D., Associate Professor, Department of Information-Control Systems; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: vadimond@mail.ru.

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

Kotelnikova Svetlana Vladimirovna – Associate Professor of the department of Information-Control Systems; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: sv_kot@mail.ru.

УДК 620.197 Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-305-314

Для цитирования: Нанесение оптически черного светопоглощающего покрытия на сплавы алюминия и титана / А. Е. Михеев, Д. О. Савельев^{*}, Д. В. Раводина, А. В. Гирн // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 2. С. 305–314. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-305-314.

For citation: Mikheev A. E., Savelyev D. O., Ravodina D. V., Girn A. V. [Application of optically black lightabsorbing coating on aluminum and titanium alloys]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 2, P. 305–314. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-305-314.

Нанесение оптически черного светопоглощающего покрытия на сплавы алюминия и титана

А. Е. Михеев, Д. О. Савельев^{*}, Д. В. Раводина, А. В. Гирн

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

В работе приведен анализ способов получения оптически черного светопоглощающего покрытия методом микродугового оксидирования на сплавах вентильных металлов. Выявлена рецептура универсального электролита и режимы обработки для формирования оптически черного покрытия на сплавах алюминия и титана. Установлены зависимости параметров режимов обработки на свойства покрытий. Полученный оксидный слой обладает высокой степенью черноты и имеет однородную структуру. Результаты исследования могут быть применены для нанесения оптически черного МДО-покрытия на изделия ракетно-космической техники.

Ключевые слова: электролит, микродуговое оксидирование (МДО), оптически черное покрытие, светопоглощающее покрытие, режим обработки.

Application of optically black light-absorbing coating on aluminum and titanium alloys

A. E. Mikheev, D. O. Savelyev*, D. V. Ravodina, A. V. Girn

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology 31, Krasnoiarskii Rabochi prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation *E-mail: savelev.dobrynya@mail.ru

The paper presents an analysis of methods for obtaining an optically black light-absorbing coating by microarc oxidation on valve metal alloys. The formulation of a universal electrolyte and processing modes for the formation of an optically black coating on aluminum and titanium alloys are revealed. The dependences of the parameters of the processing modes on the properties of coatings are established. The resulting oxide layer has a high degree of blackness and has a homogeneous structure. The results of the study can be applied to the application of optically black MDO coating on products of rocket and space technology.

Keywords: electrolyte, micro-arc oxidation (MAO), optically black coating, light-absorbing coating, treatment mode.

Введение

В аэрокосмической промышленности основную долю конструкционных материалов составляют алюминиевые и титановые сплавы. Это обусловлено их высокими удельными характеристиками, а также технологичностью. Летательный аппарат в космическом пространстве подвержен воздействию ряда факторов: потоков ионов высокой энергии, плазмы, солнечной энергии, тепловых потоков, метеорных частиц и т. д. В результате их воздействия в материалах космического аппарата (КА) могут возникать процессы, вызывающие изменение начальных свойств материала или аппаратуры КА. На этапе выведения КА испытывает значительные вибрационные и термические нагрузки. Исходя из этого, большой интерес представляет улучшение характеристик применяемых конструкционных материалов.

Одним из таких способов является микродуговое оксидирование (МДО). МДО – это электрохимический процесс модификации поверхности вентильных металлов, который сопровождается воздействием плазменных разрядов на обрабатываемое изделие. Отличительной особенностью микродугового оксидирования является участие в процессе формирования покрытия поверхностных микроразрядов, оказывающих весьма существенное и специфическое воздействие на формирующееся покрытие, в результате которого состав и структура получаемых оксидных слоев существенно отличаются, а свойства значительно повышается по сравнению с обычными анодными пленками [1–3].

Свойства МДО-покрытий определяются структурой и составом покрытия, которые, в свою очередь, зависят от материала основы, состава электролита и режима обработки. При описании характеристик покрытия руководствуются следующими параметрами: толщиной, микротвердостью, пробойным напряжением, теплостойкостью, коррозионной стойкостью, износостойкостью, пористостью и др.

Покрытия, получаемые при микродуговом оксидировании, обладают уникальными физикомеханическими свойствами, но на практике исследователи сталкиваются с проблемой получения такого покрытия с определенной цветовой гаммой для ракетно-космической отрасли. Так, например, изделия с МДО-покрытием черного цвета могут применяться для кейсов бортовых систем КА или в системе терморегулирования для поддержания необходимой рабочей температуры элементов КА за счет свойства черного цвета поглощать весь видимый спектр света.

Однако получение покрытия определенного цвета связано с рядом факторов, влияющих на конечный результат. Во-первых, состав электролита оказывает значительное влияние на цвет формируемого покрытия. Авторами различных трудов неоднократно отмечалось, что ключевую роль на формирование определенного цвета МДО-покрытия оказывает содержание в электролите солей переходных металлов [1–6]. В данной работе рассмотрены электролиты для формирования покрытия черного цвета.

Во-вторых, легирующие и основные компоненты сплавов металлов вступают в реакцию с компонентами электролита, образуя покрытие на поверхности образца, поэтому цвет МДОпокрытия меняется на различных сплавах одного вентильного металла. Так, например, если в слабощелочном электролите обработать два разных сплава алюминия, один из которых содержит 5 % марганца, то он будет иметь белый оттенок, другой сплав алюминия с содержанием меди равной 5 % после обработки будет иметь зеленоватый оттенок. Аналогичный результат наблюдается при обработке различных вентильных металлов и их сплавов.

В-третьих, параметры обработки, такие как продолжительность, плотность тока, соотношение анодной и катодной составляющих тока и другие, имеют важность при получении покрытия с определенным оттенком цвета и физико-механическими характеристиками.

Целью работы является определение состава, концентрации компонентов электролита и режимов обработки МДО алюминиевых и титановых сплавов для получения оптически черного светопоглощающего покрытия с высокими физико-механическими характеристиками.

Анализ литературы

Был рассмотрен и проанализирован способ формирования оптически черных защитных покрытий на вентильных металлах [6]. Способ реализуется с использованием электролита, содержащего дигидрофосфат натрия, ферроцианид калия, вольфрамат или молибдат натрия. Покрытие получают в гальваностатическом режиме при плотности постоянного тока 5 А/дм² и напряжении 90–150 В для сплавов алюминия и 60–100 В для сплавов титана. Недостаток способа заключается в ограничение по толщине наносимого покрытия (не более 12 мкм), обусловленное применением гальваностатического режима с постоянным током. Кроме того, этот режим нанесения покрытий требует больших энергозатрат. Получаемые покрытия могут применяться только в декоративных целях.

Другим способом является микродуговое оксидирование вентильных металлов и их сплавов в электролите, содержащем тринатрийфосфат, тетраборат натрия и вольфрамат натрия. Покрытие получают при постоянной плотности тока до 10 А/дм² и напряжении до 350 В в течение до 10 мин. Покрытие получается тонким (до 5 мкм) и серым [6].

Также описывается способ получения цветных оксидных покрытий в электролите, состоящем из: фторида натрия, гидрофосфата натрия, бромида натрия, фторида аммония, ферроцианида калия. Обработка изделия постоянным током при плотности тока до 30 А/дм² в течение 10 мин и конечном напряжении до 720 В. Недостатком процесса является выделение вредных паров, а также высокий расход красящей добавки в виде ферроцианида калия.

Способ МДО при плотности тока до 10 А/дм² и времени до 20 мин включает в себя электролит, содержащий дигдрофосфат натрия, ферроцианид калия, вольфрамат или молибдат натрия. Недостатком является обработка при постоянном токе, что ограничивает толщину покрытий (до 12 мкм), а также сопровождается отсутствие у покрытия защитных свойств [6].

Электролит для получения черных слоев содержащий тирнатрийфосфат 12-водный, тетраборат натрия 10-водный, вольфрамат натрия 2-водный характеризуется высокой стоимостью компонентов, вредностью образуемых в процессе газов, а также неустойчивостью во время эксплуатации [7].

Способ получения декоративной пленки в электролите с ферроцианидом калия, гидрофосфатом натрия, фторидом натрия, бромидом натрия отличается токсичностью компонентов в высоких концентрациях [8].

В работе [8] описан способ МДО в импульсном анодном или анодно-катодном режиме с частотой импульсов тока 50–2500 Гц и длительностью 70–1000 мкс при плотности анодного тока 70–300 А/дм², катодного тока 50–120 А/дм² в водном растворе цитрата железа 3 и дигидрофосфата натрия. Получаемое покрытие имеет толщину до 10 мкм и обладает низкой адгезией к материалу подложки.

Проанализирован способ получения оптически черного МДО-покрытия в трех водных растворах электролитов при последовательном оксидировании в каждом растворе. Все электролиты содержат тетраборат натрия, бихромат калия, вольфрамат натрия, аммония парамолибдат, оксид вольфрама, гидроксид натрия, метасиликат натрия. Каждый раствор имеет индивидуальное соотношение компонентов. Покрытие формируется в импульсном анодно-катодном режиме с длительностью анодных импульсов 50 мс, катодных 40 мс, паузами 10 мс. Недостатками способа является сложность и стадийность процесса, токсичность компонентов электролита [9].

Авторы патента [10] описывают электролит для нанесения покрытий на вентильные металлы и сплавы, состоящий из гексаметафосфата натрия и метаванадата натрия или аммония. МДО проводится в гальваностатическом режиме при плотности тока до 15 А/дм² в течение 15 мин при конечном напряжение до 250 В. Недостатком способа является неоднородное распределение структурных элементов по толщине, которая составляет 15 мкм.

В работе [11] описан способ МДО в электролите с жидким стеклом, хроматом натрия и гидроксидом натрия при плотности тока до 25 А/дм², продолжительностью до 90 мин. Электролит является неустойчивым в процессе работы и имеет ограниченный температурный режим работы. Формирование черных покрытий методом МДО также проводят в электролите содержащем дигидрофосфат натрия, силикат натрия, молибдат натрия, ферроцианид калия при плотности тока 14 А/дм² и напряжении до 700 В [12].

Анализ литературы и предварительные эксперименты показали, что электролит, указанный в работе [12] имеет экономическую и экологическую обоснованность для получения оптически черных светопоглощающих покрытий. А именно: добавление фосфатосодержащих веществ обусловлено стабилизирующим эффектом на электролит. Авторами работы [13] было обнаружено влияние фосфатов на улучшение эксплуатационных свойств электролита, а также повышение микротвердости получаемых в нем покрытий. Силикат натрия вводится в электролит для улучшения сцепления покрытия с материалом подложки. В то время как молибдат натрия служит для повышения скорости формирования покрытия и повышения работоспособности электролита. Добавка ферроцианида калия обеспечивает окрашивание покрытия и повышение износостойкости [1; 12].

Методика исследований

Для выявления концентрации реактивов электролита была проведена серия экспериментов, которая заключалась в проведении МДО образцов площадью 0,3 дм² из сплава B-1461 и BT1-0 в электролитах с шагом изменения концентраций реактивов в 5 г/л. Для оценки влияния концентрации реактивов процесс проводили при постоянных параметрах режима МДО, а именно: время оксидирования 210 секунд, плотность тока I = 25 A/дм², соотношение катодной и анодной составляющей I_k/I_a = 1 при температуре электролита 25–30 °C. В первую очередь при оценке покрытия руководствовались отсутствием видимых дефектов покрытия, а также сравнением степени черноты образцов. В случае идентичности результатов проводилось сравнение косвенных параметров, таких как шероховатость, толщина и устойчивость к механическим повреждениям.

Для описания свойств покрытия были проведены следующие исследования: измерения толщины покрытия, шероховатости, адгезии покрытия к подложке, структуры и химического состава.

Химический состав покрытия регистрировали с помощью рентгенофлоуресцентного анализа на спектрометре ARL QUANTX EDXRF.

Толщину покрытия определяли с помощью вихретокового толщиномера. Среднее значение принимали исходя из измеренной толщины в пяти различных областях образца.

Профилометром TR110 исследовали шероховатость поверхности. Также принимали среднее значение на основе измерений пяти различных областей образца.

Адгезию покрытий с основным металлом образцов контролировали методом рисок. Для этого режущим инструментом наносят сетку рисок, состоящую из квадратов со стороной 2 мм. Риски прорезают до основного металла и осматривают отслоения внутри квадратов.

Контроль внешнего вида покрытия проводился в соответствии с ГОСТ 9.302 (раздел 2), путем сплошного осмотра поверхности образцов с учетом их предварительной обработки.

Структуру МДО-покрытия исследовали с помощью электронного микроскопа Neophot-32.

Установка МДО ИАТ-М позволяет варьировать различные электрические составляющие процесса. В качестве основополагающих параметров процесса является плотность тока, соотношение катодной и анодной составляющей тока, напряжение, время оксидирования, а также форма выходного импульса тока.

Образцы предварительно обезжиривались. Закреплялись в электролитической ванне на титановом или алюминиевом подвесе в медных зажимах. Оксидирование проводилось в аноднокатодном режиме.

Электролитическая ванна имеет активную площадь анодной поверхности равной $16,2 \times 10^4$ мм². Имеет водяной контур охлаждения объемом 225×10^4 мм³. Рабочий объем ванны не более 250×10^4 мм³.

Образец закрепляли параллельно активным поверхностям ванны на расстояние 40 мм и 110 мм соответственно двум сторонам образца. Схема расположения образца в электролитической ванне представлена на рис. 1.



Рис. 1. Расположение образца в электролитической ванне: *a* – трехмерная модель с разрезом; *б* – чертеж-схема электролитической ванны: *l* – крепление для фиксации токоподвода; *2* –токоподвод; *3* – рабочая анодная поверхность электролитической ванны; *4* – рабочий электрод; *5* – диэлектрическая платформа крепления

Fig. 1. Location of the sample in the electrolytic bath:

a – three-dimensional model with a cut; b – drawing-scheme of the electrolytic bath: l – mount for fixing the current lead; 2 – current lead; 3 – working anode surface of the electrolytic bath; 4 – working electrode; 5 – dielectric mounting platform

Для определения зависимости между свойствами покрытия и режимом обработки были выбраны следующие диапазоны параметров:

- плотность тока (j) 20-30 А/дм²;

- соотношение катодной и анодной составляющей (I_k/I_a) от 0,5 до 1;
- время оксидирования (т) 300–900 сек;
- форма следования импульсов трапецеидальная или синусоидальная;
- конечное напряжение (U) 220-410 В.

В качестве образцов были применены сплавы В-1461 и ВТ1-0. Площадь образцов 0,3 дм². Температура электролита 25–30 °C. Обработка сплавов алюминия и титана проводилась в идентичных электролитах раздельно.

Результаты и обсуждение

Исследование влияния концентрации компонентов показало, что электролит со следующим составом: NaH₂PO₄·2H₂O – 20 г/л, Na₂SiO₃ – 5 г/л, K₃[Fe(CN)₆] – 10 г/л, Na₂MoO₄ – 5 г/л способствует формированию оптически черного светопоглощающего покрытия с высокими физикомеханическими характеристиками как на сплавах титана так и алюминия.

В ходе исследования был установлен характер зависимости выбранных показателей покрытия от параметров оксидирования, по которым затем были сформированы рекомендуемые режимы обработки для сплавов алюминия и титана (табл. 1 и 2).

Выбор режима обработки, прежде всего, связан с назначением покрытия. Если покрытие применяется в декоративных целях, то внешний вид имеет первостепенное значение. А значит, минимальная шероховатость, максимальная степень черноты для светопоглощения, равномер-

ность тона цвета и прочно сцепления покрытия со сплавом являются приоритетными показателями качества покрытия.

Для формирования функционального покрытия применяемого для склеивания с композиционными материалами необходимо выбрать правильное соотношение между шероховатостью, толщиной и адгезионной прочностью.

Износостойкое покрытие характеризуется твердостью покрытия, что в условиях данной работы обусловлено химическим составом и однородностью покрытия.

Таблица 1

Режимы обработки сплавов титана в универсальном электролите для формирования
оптически черного покрытия

Назначение	Плотность	Соотношение	Время	Форма	Конечное
покрытия	тока, і,	катодной и анодной	обработки,	следования	напряжение,
	А/дм ²	составляющей, I _k /I _a	τ, сек	импульсов	U, B
Декоративное	20	0,8	180-1200	Синусоидальная	220–290
Функциональное	20–25	0,8	600–1800	Трапецеидальная	230-305
Износостойкое	25-30	0,8	600–1800	Трапецеидальная	230-320

Таблица 2

Режимы обработки сплавов алюминия в универсальном электролите для формирования оптически черного покрытия

Назначение	Плотность	Соотношение	Время	Форма	Конечное
покрытия	тока, і,	катодной и анодной	обработки,	следования	напряжение,
	А /дм ²	составляющей, I _k /I _a	τ, сек	импульсов	U, B
Декоративное	20	1	180-1200	Синусоидальная	280-340
Функциональное	25-30	0,5	600–1800	Синусоидальная	300-370
Износостойкое	30	0,5	600–1800	Трапецеидальная	320-410

В составе МДО-покрытия на алюминиевом сплаве при каждом режиме обработки выявлено содержание химических элементов: Fe более 70 %, Al более 20 %, Mo более 4 % и в меньшей степени Si. На сплаве титана при каждом режиме обработки было обнаружено: Ti более 60 %, Fe более 33 %, Mo более 2 % и Si более 2 %. В работе [1] установлено наличие в аналогичном по компонентам электролите шпинелей $Al_2O_3 \cdot Fe_3O_4 \cdot MoO_3$, Al_2O_3 и AlPO₄ на алюминии и его сплавах и $Al_2O_3 \cdot TiO_2$ – на титане и его сплавах. Также описаны химические процессы, проходящие на алюминиевом аноде, с образованием FeAl₂O₄, что обеспечивает покрытию черный цвет. Аналогичные процессы протекают на титановом аноде.

На рис. 2 представлены образцы из сплава ВТ1-0. Сформированные покрытия имеют равномерный и насыщенный тон черного цвета по всей площади образца. При изменении технологического режима удалось получить МДО-покрытие толщиной от 6 до 51 мкм и шероховатостью от 2,1 до 4,7 мкм без ухудшения адгезии покрытия к материалу подложки.

На алюминиевом сплаве B-1461 (рис. 3) были получены покрытия толщиной от 10 до 70,8 мкм и шероховатостью от 1,2 до 4,03 мкм. В случае изменений параметров режима обработки возможно получение покрытий оттенков черного.

При изучении поперечного шлифа образцов МДО-покрытия на сплавах алюминия отмечено размытие границы функционального слоя МДО-покрытия и подслоя, что говорит об однородности и функциональности по всей толщине (рис. 4).

В ходе исследования было установлено, что при трапецеидальном следовании импульсов тока прочность сцепления покрытия с подложкой значительно выше. Об этом можно судить по фотографиям поперечных рисок на МДО-покрытие (рис. 5). На образцах, которые обрабатывались при трапецеидальной форме следования импульсов, площадь отслоившегося покрытия вблизи пересечения рисок в 2 раза меньше чем на образцах при обработке синусоидальной формой импульсов тока.



Рис. 2. Оксидированные образцы титанового сплава ВТ1-0

Fig. 2. Oxidized samples of titanium alloy VT1-0



Рис. 3. Образцы из сплава B-1461 с МДО-покрытием Fig. 3. Samples from V-1461 alloy with MAO coating



Рис. 4. Фотография поперечного шлифа образца из сплава B-1461 с МДО-покрытием





Рис. 5. Фотографии пересечения рисок на МДО-покрытие образцов из титанового сплава в 6-кратном увеличении: *а* – при синусоидальной форме импульсов; *б* – при трапецеидальной форме импульсов

Fig. 5. Photographs of the intersection of scratches on the MAO coating of titanium alloy samples at a 6-fold increase: a – with a sinusoidal pulse shape; b – with a trapezoidal shape of pulses

Заключение

Средняя скорость роста покрытия составляет 3,3 мкм/мин на обоих сплавах. Шероховатость покрытия увеличивается и в среднем составляет 2,49 мкм. При нанесении покрытий сложных пространственных изделий наблюдалось равномерное покрытие по толщине и цвету, в том числе и внутренних поверхностей. В сравнении с прототипами данная методика отличается универсальностью применения электролита для сплавов алюминия и титана без изменения концентрации компонентов, а также полифункциональность получаемого МДО-покрытия, которая являются актуальной темой для изучения цветных электрохимических покрытий. К недостаткам метода относится ограниченная толщина получаемого покрытия до 70 мкм, а также температурный режим эффективности и годности электролита до 50 °C. Особенностью технологического режима является применение импульсов трапецеидальной формы, что позволяет формировать покрытия с наилучшим сцеплением с материалом подложки.

В данной работе был определен состав, концентрации компонентов электролита, а также исследована и описана технология получения покрытий из неорганических оксидных слоев методом МДО на поверхностях вентильных металлов и их сплавов, которые могут применяться для получения декоративных, теплостойких, оптически черных, износостойких и коррозионностойких покрытий, прежде всего в аэрокосмической промышленности на алюминиевых и титановых сплавах.

Библиографические ссылки

1. Влияние технологических параметров на элементный состав микродугового оксидирования покрытий на алюминиевых и титановых сплавах / А. Е. Михеев, А. В. Гирн, Д. В. Орлова и др. // Вестник СибГАУ. 2012. № 4 (44). С. 168–172.

2. Суминов И. В. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. М. : Техносфера, 2011. 512 с.

3. Федоров В. А., Белозеров В. В., Великосельская Н. Д Формирование упрочненных поверхностных слоев методом микродугового оксидирования в различных электролитах и при изменении токовых режимов // Физика и химия обработки материалов. 1991. № 1. С. 87–93.

4. Исследование процесса формирования оптически черных оксидно-керамических покрытий на поверхности алюминиевого сплава 1160 / Ж. И. Беспалова, И. Н. Паненко, В. В. Дубовсков и др. // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2012. № 5. С. 63–66.

5. Михеев А. А., Вахтеев Е. В., Орлова Д. В. Анализ способов окрашивания покрытий, получаемых при микродуговом оксидировании на алюминиевых сплавах // Решетневские чтения : материалы XIV Междунар. науч. конф. (10–12 ноября 2010, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2010. С. 9–10.

6. Пат. 2096534 Российская Федерация, МПК С 25 D 11/14, С 25 D 11/02. Способ получения оптически черных защитных покрытий на вентильных металлах / Яровая Т. П., Руднев В. С., Гордиенко П. С., Недозоров П. М. № 96114575/02; заявл. 18.07.96; опубл. 20.11.97.

7. Пат. 2263136 Российская Федерация, МПК С 25 D 11/02. Способ плазменноэлектролитического оксидирования вентильных металлов и их сплавов / Руднев В. С., Яровая Т. П., Недозоров П. М. № 2004123494/02; заявл. 30.07.2004; опубл. 27.10.2005. Бюл. № 30.

8. Пат. 2285066 Российская Федерация, МПК С 25 D 11/02. Электролит для получения черного керамического покрытия на вентильных металлах и их сплавах, способ его получения и покрытие, полученное данным способом / Мамаев А. И., Хохряков Е. В., Бутягин П. И. № 2005114806/02; заявл. 14.05.2005; опубл. 10.10.2006, Бюл. № 28.

9. Пат. 2459890 Российская Федерация, МПК С 25 D 11/02, С 25 D 15/00. Способ получения оптически черного оксидно-керамического покрытия на поверхности алюминия и его сплавах / Беспалова Ж. И., Паненко И. Н. № 2011130828/02; заявл. 22.07.2011; опубл. 27.08.2012, Бюл. № 24.

10. Пат. 2061107 Российская Федерация, МПК С 25 D 11/06. Способ микродугового получения защитных пленок на поверхности металлов и их сплавов / Руднев В. С., Гордиенко П. С., Курносова А. Г., Орлова Т. И. № 5004969/02; заявл. 17.07.91; опубл. 27.05.96.

11. Пат. 2238352 Российская Федерация, МПК С 25 D 11/02. Способ получения покрытий / Казанцев И. А., Скачков В. С., Розен А. Е., Кривенков А. О. № 2003126876/02; заявл. 02.09.2003; опубл. 20.10.2004.

12. Пат. 2607875 Российская Федерация, МПК С 25 D 11/14. Способ нанесения керамического черного покрытия на вентильные металлы методом микродугового оксидирования и покрытие, полученное этим способом / Бутягин П. И., Большанин А. В., Сафронова С. С. № 2015111777; заявл. 31.03.2015; опубл. 20.01.2017, Бюл. № 2.

13. Пат. 2070622 Российская Федерация, МПК С 25 D 11/02, С 25 D 11/04, С 25 D 11/06, С 25 D 11/26. Способ нанесения керамического покрытия на металлическую поверхность микродуговым анодированием и электролит для его осуществления / Большаков В. А., Шатров А. С. № 93033138/02; заявл. 24.06.93; опубл. 20.12.96.

References

1. Mikheev A. E., Girn A. V., Orlova D. V., Vakheev E. V., Trushkina T. V. [Influence of technological parameters on the elemental composition of microarc oxidation of coatings on aluminum and titanium alloys]. *Vestnik SibGAU*. 2012, No. 4 (44), P. 168–172 (In Russ.).

2. Suminov I. V. *Plazmenno-elektroliticheskoe modifitsirovanie poverkhnosti metallov i splavov* [Plasma-electrolytic modification of the surface of metals and alloys]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2011, 512 p.

3. Fedorov V. A., Belozerov V. V., Velikosel'skaya N. D. [Formation of hardened surface layers by microarc oxidation in various electrolytes and when changing current modes]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov.* 1991, No. 1, P. 87–93 (In Russ.).

4. Bespalova Zh. I., Panenko I. N., Dubovskov V. V., Kozachenko P. N., Kudrjavcev Ju. D. [Investigation of the process of formation of optically black oxide-ceramic coatings on the surface of aluminum alloy 1160]. *Izvestija vuzov. Severo-Kavkazskij region. Estestvennye nauki.* 2012, No. 5, P. 63–66 (In Russ.).

5. Miheev A. A., Vahteev E. V., Orlova D. V. [Analysis of methods for coloring coatings obtained by micro-arc oxidation on aluminum alloys]. *Materialy XIV Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XIV Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2010, p. 9–10 (In Russ.).

6. Yarovaya T. P., Rudnev V. S., Gordienko P. S., Nedozorov P. M. *Sposob polucheniya opticheski chernykh zashchitnykh pokrytiy na ventil'nykh metallakh* [Method for obtaining optically black protective coatings on valve metals]. Patent RF, No. 2096534, 1996.

7. Rudnev V. S., Yarovaya T. P., Nedozorov P. M. *Sposob plazmenno-elektroliticheskogo oksidirovaniya ventil'nyh metallov i ih splavov* [Method of plasma-electrolytic oxidation of valve metals and their alloys]. Patent RF, No. 2263163, 2004.

8. Mamaev A. I., Khokhryakov E. V., Butyagin P. I. *Elektrolit dlya polucheniya chernogo keramicheskogo pokrytiya na ventil'nykh metallakh i ikh splavakh, sposob ego polucheniya i pokrytie, poluchennoe dannym sposobom* [Electrolyte to obtain a black ceramic coatings on valve metals and their alloys, the method of its production and the coating obtained by this method]. Patent RF, No. 2005114806/02, 2005.

9. Bespalova Zh. I., Panenko I. N. *Sposob polucheniya opticheski chernogo oksidnokeramicheskogo pokrytiya na poverkhnosti alyuminiya i ego splavakh* [A method for obtaining an optically black oxide-ceramic coating on the surface of aluminum and its alloys]. Patent RF, No. 2011130828/02.2011.

10. Rudnev V. S., Gordienko P. S., Kurnosova A. G., Orlova T. I. Sposob mikrodugovogo polucheniya zashchitnykh plenok na poverkhnosti metallov i ikh splavov [Micro-arc method of

producing protective films on the surface of metals and their alloys]. Patent RF, No. 5004969/02, 1991.

11. Kazantsev I. A., Skachkov V. S., Rozen A. E., Krivenkov A. O. *Sposob polucheniya pokrytiy* [Method of obtaining coatings]. Patent RF, No. 2003126876/02, 2003.

12. Butyagin P. I., Bol'shanin A. V., Safronova S. S. *Sposob naneseniya keramicheskogo chernogo pokrytiya na ventil'nye metally metodom mikrodugovogo oksidirovaniya i pokrytie, poluchennoe etim sposobom* [The method of applying ceramic black coating on valve metals by micro-arc oxidation and the coating obtained by this method]. Patent RF, No. 2015111777, 2015.

13. Bol'shakov V. A., Shatrov A. S. *Sposob naneseniya keramicheskogo pokrytiya na metallicheskuyu poverkhnost' mikrodugovym anodirovaniem i elektrolit dlya ego osushchestvleniya* [Method of applying ceramic coating to a metal surface by micro-arc anodizing and electrolyte for its implementation]. Patent RF, No. 93033138/02, 1993.

© Савельев Д. О., Михеев А. Е., Раводина Д. В., Гирн А. В., 2021

Savelyev Dobrynya Olegovich – student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: savelev.dobrynya@mail.ru.

Ravodina Darya Vladimirovna – Engineer; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: Dashaorlova12@yandex.ru.

Girn Alexey Vasilievich – Cand. Sc., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Aircraft; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: girn007@gmail.com.

Mikheev Anatoly Egorovich – Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Aircraft; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: michla@mail.ru.

Савельев Добрыня Олегович – студент; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: savelev.dobrynya@mail.ru.

Раводина Дарья Владимировна – инженер; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: Dashaorlova12@yandex.ru.

Гирн Алексей Васильевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: girn007@gmail.com.

Михеев Анатолий Егорович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: michla@mail.ru

УДК 548.4 Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-315-320

Для цитирования: Паклин Н. Н., Логинов Ю. Ю., Мозжерин А. В. Равновесное распределение дефектов в теллуриде кадмия до воздействия внешних факторов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 2. С. 315–320. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-315-320.

For citation: Paklin N. N., Loginov Yu. Yu., Mozzherin A. V. [Equilibrium distribution of defects in cadmium telluride before exposure to external factors]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 2, P. 315–320. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-315-320.

Равновесное распределение дефектов в теллуриде кадмия до воздействия внешних факторов

Н. Н. Паклин¹, Ю. Ю. Логинов², А. В. Мозжерин¹

¹Сибирский федеральный университет Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31 E-mail: npaklin@sfu-kras.ru

Надежность электронного оборудования, в том числе и в аэрокосмической отрасли, как в нормальных, так и в экстремальных условиях сопряжена с деградацией материалов ввиду формирования и развития дефектной сети. Теллурид кадмия – один из полупроводников, который активно используется при создании солнечных элементов и современных устройств микроэлектроники. В работе предложена модель распределения точечных дефектов в теллуриде кадмия до воздействия какого-либо ионизирующего излучения, что позволило рассчитать эффективную энергию тепловой активации пары Френкеля – 1,37 эВ. Исследования особенностей формирования и эволюции дефектов с применением методов моделирования в теллуриде кадмия, в перспективе позволит повысить качество его технологического использования, экономя финансовые ресурсы и повышая надежность изделий.

Ключевые слова: теллурид кадмия, динамика структурных дефектов, энергия тепловой активации.

Equilibrium distribution of defects in cadmium telluride before exposure to external factors

N. N. Paklin, Yu. Yu. Loginov, A. V. Mozzherin

 ¹Siberian Federal University
 79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
 ²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
 31, Krasnoiarskii Rabochi prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation E-mail: npaklin@sfu-kras.ru

The reliability of electronic equipment, including in the aerospace industry, both under normal and extreme conditions, is associated with the degradation of materials due to the formation and development of a defective network. Cadmium telluride is one of the semiconductors that is actively used in the creation of solar cells and modern microelectronic devices. In this paper, the model of the point defects distribution in cadmium telluride before exposure to any ionizing radiation is proposed, that made it possible to calculate the effective thermal activation energy of a Frenkel pair equal to 1.37 eV. Studies of the features of the defects formation and evolution using modeling methods in cadmium telluride, in the future, will improve the quality of its technological use, saving financial resources and increasing the reliability of products.

Keywords: cadmium telluride, dynamics of structural defects, thermal activation energy.

Введение

Современные технологии позволяют производить теллурид кадмия достаточно высоко качества, тем не менее, в полупроводнике в процессе и после выращивания, пусть и в незначительном количестве, формируются структурные дефекты, которые создаются вследствие теплового и механического напряжения. Возможные одиночные собственные точечные дефекты, существующие в бинарном соединении CdTe, включают нейтральный Cd или ионизированный междоузельный Cdi, вакансию кадмия VCd, междоузельный теллур Tei, вакансия теллура VTe, Te в узле Cd. Среди них донорами являются Cdi, VCd, а акцепторами Tei и VTe [1]. При наличии достаточной энергии структурные дефекты формируют кластеры, причиной являются термомеханические напряжения.

Особенности формирования кластеров вакансионного и междоузельного типов в теллуриде кадмия при облучении электронами обсуждалось в [2], при этом была построена модель распределения точечных дефектов (вакансий и междоузельных атомов) и их кластеров (пор и преципитатов) при неравновесных условиях, обусловленных электронным облучением [3; 4].

Целью настоящей работы является создание модели распределения точечных дефектов до воздействия какого-либо ионизирующего излучения. Фактически определяется влияние земных условий на материал, до его использования в космической среде, где материалы подвергаются воздействию облучения, описывается эволюция точечных дефектов и их кластеров в CdTe. Полученные результаты позволят затем перейти к изучению неоднородных условий – условий, в которых работают аэрокосмические аппараты в космосе.

Моделирование дефектообразования в СdТе

Для описания динамики дефектов в кристалле CdTe вводятся следующие величины: c_0 и c_n – концентрации узлов кристалла до облучения и в процессе облучения; концентрации точечных дефектов c_1 – междоузлий и c_V – вакансий; концентрации кластеров c_L – дислокационных петель и c_B – пор; усредненные размеры кластеров r_L – радиусы петель и r_B – радиусы пор. Скорость генерации точечных дефектов (пар Френкеля) при электронном облучении в единице объема c_0G , где $G = \sigma \cdot j$ – вероятность рождения одной пары Френкеля в секунду на один узел, σ – сечение рассеяния электрона на узле кристалла, $j = 10^{19}$ см⁻² c^{-1} – плотность потока электронов. Вероятности реакций в секунду на одну пару дефектов пропорциональны величинам: K_0 – рекомбинация пары Френкеля (при этом узел восстанавливается), K_I , K_V – рождение минимальных кластеров (сдвоенных точечных дефектов) или димеждоузлия и дивакансии (при этом исчезают два точечных дефекта). Скорости реакций в секунду в единице объема и коэффициенты диффузии вычисляются по формулам

$$(K_0, K_I, K_V) = b^3 v \cdot \exp\left[-\frac{(E_0, E_I, E_V)}{kT}\right],$$
 (1)

$$(D_I, D_V) = b^2 \, \mathbf{v} \cdot \exp\left[-\frac{(E_{mI}, E_{mV})}{kT}\right],\tag{2}$$

где (E_0, E_I, E_V) – энергии активации соответствующих реакций; E_{mI}, E_{mV} – энергии миграции точечных дефектов; v – частота колебаний атомов в узлах решетки; b – постоянная решетки CdTe или величина вектора Бюргерса; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура. Для вычислений используются численные значения величин для кристалла CdTe (см. таблицу).

\mathcal{C}_0	σ	b	ν	E_0	E_{I}	E_V	E_{mI}	E_{mV}
см ⁻³	см ²	HM	c^{-1}	эВ	эВ	эВ	эВ	эВ
$1,5 \times 10^{22}$	3×10 ⁻²²	0,648	10^{13}	0,25	0,45	0,5	0,32	0,6

Численные значения ряда параметров кристалла теллурида кадмия

Эволюция точечных дефектов и их кластеров при электронном облучении удовлетворительно описывается следующей системой уравнений [2; 3; 5; 6]:

$$\frac{\partial c_n}{\partial t} = -Gc_n + K_0 c_I c_V, \tag{3}$$

$$\frac{\partial c_I}{\partial t} = D_I \frac{\partial^2 c_I}{\partial z^2} + Gc_n - K_0 c_I c_V - 2K_I c_I^2 - \frac{2\pi r_L}{b} K_I c_I c_L, \qquad (4)$$

$$\frac{\partial c_V}{\partial t} = D_V \frac{\partial^2 c_V}{\partial z^2} + Gc_n - K_0 c_I c_V - 2K_V c_V^2 - \frac{4\pi r_B^2}{b^2} K_V c_V c_B,$$
(5)

$$\frac{\partial c_L}{\partial t} = K_I c_I^2,\tag{6}$$

$$\frac{\partial c_B}{\partial t} = K_I c_V^2,\tag{7}$$

$$\frac{\partial r_L}{\partial t} = K_I c_I b, \tag{8}$$

$$\frac{\partial r_B}{\partial t} = K_V c_V b. \tag{9}$$

В качестве начальных условий берутся пространственно однородные распределения концентраций точечных дефектов и нулевые условия для концентраций и размеров кластеров:

$$c_I = c_V = 10^{12} \,\mathrm{cm}^{-3}, \quad c_L = c_B = 0, \quad r_L = r_B = 0.$$
 (10)

Такой выбор начальных условий грубый, но удобный и может быть оправдан, если результат сравнивается с экспериментальными данными, отвечающими большим временам. Действительно, из-за высокой скорости генерации пар Френкеля начальные условия мало влияют на динамику при больших временах облучения. При малых временах облучения начальные условия заметно влияют на динамику, поэтому они должны быть стационарными решениями исходной системы уравнений. Однако чтобы физически приемлемые стационарные решения существовали, систему уравнений следует доработать, например, учесть изменение количества узлов. Вычисления из первых принципов очень сложные, требуют больших компьютерных ресурсов либо используют модельные упрощения [7]. Экспериментальные данные разных авторов дают большой разброс в зависимости от метода [8]. Самый простой и интуитивно понятный метод – принцип детального равновесия. Если некоторые данные надежно установлены, то оставшиеся неизвестные величины можно вычислить без особых трудностей, что мы и будем использовать в данной работе.

Пространственно-однородная модель

Сначала рассмотрим модель типа «бесконечный кристалл», цель – исключить граничные условия, т. е. начальные условия пространственно однородные. Вместо величины G, описывающей генерацию пар Френкеля при облучении, введем пока неизвестную эффективную величину P, описывающую тепловую генерацию пар Френкеля. Если в системе (3)–(9) обратить в ноль частные производные по времени и отбросить диффузию, то получится тривиальное решение – все искомые переменные равны нулю как при абсолютном нуле температуры. При температуре

T = 300 K и ожидаемом тепловом равновесии можно не рассматривать большие кластеры и считать их радиусы нулевыми, хотя радиус не может быть меньше постоянной решетки. В этом случае три первых уравнения системы (3)–(5) дают одно и то же уравнение для трех неизвестных: $Pc_n = K_0c_1c_V$. Здесь учитываются только реакции рекомбинации, а сдвоенные дефекты отбрасываются. Количество точечных дефектов много меньше числа узлов и можно считать, что $c_n = c_0$. Величина K_0 известна, но величины c_1, c_V экспериментально не наблюдаемы, а физические процессы описываемые величиной P очень разнообразны и еще мало изучены [9; 10]. Таким образом, недостаточно отбросить некоторые слагаемые в системе (3)–(9), нужно доработать, т. е. учесть дополнительные реакции, которые могут обеспечить тепловое равновесие и не противоречат физическим условиям.

Рассмотрим следующую модель: будем учитывать баланс между процессами генерации точечных и сдвоенных дефектов и процессами их рекомбинации. Для вычислений удобно ввести безразмерные величины. Все концентрации поделим на величину c_0 , тогда используя замены: $c_n = n \cdot c_0$, $c_I = u \cdot c_0$, $c_V = v \cdot c_0$ и полагая n = 1, что справедливо при нормальных условиях (T = 300 K), перепишем первые три уравнения системы как

$$P = c_0 K_0 uv + c_0 K_I u^2 \cdot c_0 K_0 v + c_0 K_V v^2 \cdot c_0 K_0 u, \tag{11}$$

$$P = c_0 K_0 uv + 2c_0 K_I u^2 - c_0 K_I u^2 \cdot c_0 K_0 v + c_0 K_V v^2 \cdot c_0 K_0 u,$$
(12)

$$P = c_0 K_0 uv + 2c_0 K_V v^2 + c_0 K_I u^2 \cdot c_0 K_0 v - c_0 K_V v^2 \cdot c_0 K_0 u.$$
(13)

Здесь в первом уравнении (11) учтены процессы восстанавливающие узлы: рекомбинация точечных дефектов, рекомбинация вакансии с димеждоузлием и рекомбинация междоузлия с дивакансией. В (12) учтены процессы, рождающие междоузлие (со знаком минус) и уничтожающие междоузлие (со знаком плюс). Аналогично в (13) учтены процессы, рождающие или уничтожающие вакансию. Вычитая (11) из (12) и (13) получаем простые аналитические выражения для величин u и v, а их подстановка обратно в (11) дает простое выражение для величины P. Соберем эти результаты вместе и запишем в следующем виде:

$$u = v = \frac{1}{c_0 K_0} \approx 1,0562165 \times 10^{-10} \Longrightarrow c_I = c_V \approx 1,6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3},$$
(14)

$$P = \frac{K_0 + K_I + K_V}{c_0 K_0^2} \approx 1,05674436 \times 10^{-10} \ c^{-1} \ . \tag{15}$$

Согласно формуле $P = v \cdot \exp(-E_p / kT)$ мы можем вычислить эффективную энергию тепловой активации пары Френкеля $E_p = kT \cdot \ln(v / P) \approx 1,36767$ эВ.

Заключение

В результате исследования рассчитана эффективная энергия тепловой активации пары Френкеля – 1,37 эВ, что является первым этапом комплексного изучения условия образования структурных дефектов и их кластеров в кристаллах теллурида кадмия при нормальных условиях с температурой в 300 К. Описанные результаты совпадают с теоретическими данными по порядку величины, но имеют небольшие отличия. Это неизбежно, так как наша модель базируется на представлении изначально «идеального» кристалла. Тем не менее, представленная модель подтверждает данные о появлении и эволюции дефектной сети в кристалле без внешнего воздействия и дает возможность в дальнейшем использовать полученные данные для неоднородной модели бинарного кристалла, с получением фундаментально важных численных данных по энергии тепловой активации.

Библиографические ссылки

1. Yujiea L., Guolic M., Wanqi J. Point defects in CdTe // Journal of Crystal Growth. 2003. Vol. 256. P. 266–275.

2. Логинов Ю. Ю., Браун П. Д., Дьюроуз К. Закономерности образования структурных дефектов в полупроводниках A₂B₆. М. : Логос, 2003. 304 с.

3. Loginov Y. Y., Mozzherin A. V., Paklin N. N. Particularities of the interstitial atoms and vacancies clusters formation in a thin cadmium telluride foil during in situ electron irradiation in a TEM // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2022. Vol. 1230. P. 012013. Doi:10.1088/1757-899X/1230/1/012013.

4. Djafari-Rouhani M., Gue A., Idrissi-Saba H., Esteve D. Simulation a l'echelle atomique de la formation des boucles de dislocation sous irradiation // Journal de Physique I. 1994. Vol. 4 (3). P. 453–466.

5. Loginov Yu. Yu., Mozzherin A. V., Bril'kov A. V. Dependence of the Critical Radius of Partial Dislocation Loops on the Stacking Fault Energy in Semiconductors // Physics of the Solid State. 2014. Vol. 56, No. 4. P. 720–722.

6. Горичок И. В. Энтальпия образования дефектов Шоттки в полупроводниках // ФТТ. 2012. Т. 54, вып. 3. С. 1373–1376.

7. Freysoldt C, Grabowski B, Hickel T, Neugebauer J, Kresse G, Janotti A, Van de Walle C. G. First-principles calculations for point defects in solids // Rev. Mod. Phys. 2014. Vol. 86, No. 1. P. 27–39.

8. Корбетт Дж., Бургуэн Ж. Дефектообразование в полупроводниках. М. : Мир, 1979. С. 9–162.

9. Вавилов В. С., Кив А. Е., Ниязова О. Р. Механизмы образования и миграции дефектов в полупроводниках. М. : Наука, 1981. 368 с.

10. Вавилов В. С., Кекелидзе Н. П., Смирнов Л. С. Действие излучений на полупроводники. М. : Наука, 1988. 192 с.

References

1. Yujiea L., Guolic M., Wanqi J. Point defects in CdTe. *Journal of Crystal Growth*. 2003, Vol. 256, P. 266–275.

2. Loginov Y. Y., Brown P. D., Durose K. Zakonomernosti obrazovaniya strukturnykh defektov v poluprovodnikakh A_2V_6 [Regularity of the structural defects formation in semiconductors A_2B_6]. Moscow, Logos, 2003.

3. Loginov Y. Y., Mozzherin A. V., Paklin N. N. Particularities of the interstitial atoms and vacancies clusters formation in a thin cadmium telluride foil during in situ electron irradiation in a TEM. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* 2022. Vol. 1230. P. 012013. Doi: 10.1088/1757-899x/1230/1/012013.

4. Djafari-Rouhani M., Gue A., Idrissi-Saba H., Esteve D. Simulation a l'echelle atomique de la formation des boucles de dislocation sous irradiation. *Journal de Physique I*, EDP Sciences. 1994, Vol. 4 (3), P. 453–466.

5. Loginov Yu. Yu., Mozzherin A. V., Bril'kov A. V. Dependence of the Critical Radius of Partial Dislocation Loops on the Stacking Fault Energy in Semiconductors. *Physics of the Solid State*. 2014, Vol. 56, No. 4, P. 720–722.

6. Gorichok I. V. Enthalpy of Schottky Defects Formation in Semiconductors. *Physics of the Solid State*. 2012, Vol. 54, P. 1373–1376.

7. Freysoldt C., Grabowski B., Hickel T., Neugebauer J., Kresse G., Janotti A., Van de Walle C. G. First-principles calculations for point defects in solids. *Rev. Mod. Phys.* 2014, Vol. 86, No. 1.

8. Corbett J., Bourgoin J. *Defektoobrazovanie v poluprovodnikakh* [Defect formation in semiconductors]. Moscow, Mir Publ., 1979, P. 9–162.

9. Vavilov V. S., Kiv A. E., Niyazova O. R. *Mekhanizmy obrazovaniya i migratsii defektov v poluprovodnikakh* [Mechanisms of the defects formation and migration in semiconductors]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 368 p.
10. Vavilov V. S., Kekelidze N. P., Smirnov L. S. *Deystvie izlucheniy na poluprovodniki* [Effect of radiation on semiconductors]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 192 p.

© Паклин Н. Н., Логинов Ю. Ю., Мозжерин А. В., 2022

Паклин Николай Николаевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической физики; Сибирский федеральный университет. E-mail: npaklin@sfu-kras.ru.

Логинов Юрий Юрьевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры технической физики; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: loginov@sibsau.ru.

Мозжерин Александр Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры Юнеско «Новые материалы и технологии»; Сибирский федеральный университет. E-mail: amozzherin@sfu-kras.ru.

Paklin Nikolai Nikolaevich – Cand. Sc., Associate Professor of the Theoretical Physics Department; Siberian Federal University. E-mail: npaklin@sfu-kras.ru.

Loginov Yuri Yurievich – Dr. Sc., Professor of the Technical Physics Department; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: loginov@sibsau.ru.

Mozsherin Alexandr Vladimirovich – Cand. Sc., Associate Professor of the UNESCO "New Materials and Technologies" Department; Siberian Federal University. E-mail: amozzherin@sfu-kras.ru.

УДК 621.87 629.78 Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-321-336

Для цитирования: Пась О. В., Серков Н. А. Исследование возможностей повышения точности механической обработки вафельного фона методами программной коррекции // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 2. С. 321–336. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-321-336.

For citation: Pas O. V., Serkov N. A. [Research of the ways to increase the accuracy of the mirror milling machining of the waffle grids by means of the digital correction techniques]. *Aerospace Journal.* 2022, Vol. 23, No. 2, P. 321–336. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-321-336.

Исследование возможностей повышения точности механической обработки вафельного фона методами программной коррекции

О. В. Пась^{1*}, Н. А. Серков²

¹АО «НПО «Техномаш» имени С. А. Афанасьева» Российская Федерация, 127018, г. Москва, 3-й проезд Марьиной Рощи, 40 ²Институт машиноведения имени А. А. Благонравова РАН Российская Федерация, 101000, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., 4 *E-mail: o.pa88@yandex.ru

Оболочки с вафельным фоном составляют основную долю сухой массы изделий ракетнокосмической техники. Толщина остаточного полотна, а также ширина продольных и кольцевых ребер являются основными параметрами вафельного фона. Наиболее распространенная технология получения вафельного фона - механическая обработка обечаек на станках системы высокоточной обработки серии CBO, осуществляющих отслеживание и копирование задней стенки заготовки, что обеспечивает «постоянство» остаточного полотна независимо от погрешностей формы заготовки. При таком способе обработки действует ряд других факторов, приводящих к отклонениям по толщине остаточного полотна и ширине ребер, что приводит к увеличению дополнительных масс изделия, необходимости применения доводочных операций и увеличению числа возможных дефектов при фрезеровании. Таким образом, представляется крайне актуальной задача повышения точности механообработки вафельного фона, что позволит в перспективе увеличить производительность и повысить качество изготовления вафельных оболочек.

С этой целью в работе подробно рассмотрена технология зеркального фрезерования вафельного фона. Описаны и классифицированы факторы, приводящие к отклонениям по толщине остаточного полотна. Проанализировано и выявлено влияние отклонение оси шпинделя от нормали к поверхности на величину ошибки по толщине остаточного полотна. Выполнено математическое моделирование образования ошибки по толщине остаточного полотна из-за наличия зазора в системе слежения. Приведено развернутое описание различных методов повышения точности обработки по толщине остаточного полотна, и обосновано применение способа комбинированной программной коррекции на основе системы с самонастройкой.

Внедрение данного решения позволит повысить энергомассовые характеристики изделий ракетно-космической техники из-за снижения сухой массы конструкции за счет достижения большей точности обработки по толщине остаточного полотна и ребер, а также повысить качество и надежность изготавливаемых изделий за счет сокращения возможных дефектов.

Ключевые слова: зеркальное фрезерование, вафельный фон, тонкостенные детали большого размера, программная коррекция, постпроцессор.

Research of the ways to increase the accuracy of the mirror milling machining of the waffle grids by means of the digital correction techniques

O. V. Pas^{1*}, N. A. Serkov²

¹JSC NPO Technomash named after S. A. Afanas'ev
 40, 3 proezd Mar'inoy Roshchi, Moscow, 127018, Russian Federation
 ²Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences
 4, M. Kharitonyevskiy pereulok, Moscow, 101990, Russian Federation
 *E-mail: o.pa88@yandex.ru

Waffle shells are the main part of the overall dry mass of the products of the aerospace industry. Cell bottom thickness and the width of the longtitudal and circular edges are the main characteristics of the waffle grid.

Mechanical cutting by using of the machine tools of SVO series which perform tracking and copying of the opposite wall thus providing the stability of the bottom thickness despite of the workpiece shape errors is the most wide-spread technology of the manufacturing of the waffle grid.

There are different other factors which act during such a process and lead to bottom thickness and edge width errors which brings to increase of the weight of the part, use of the additional finishing operations and rise of the defects amount during milling process. Thus it is essential to solve the problem of the increase of the machining accuracy of the cell thickness bottom, which might cause the rise of the machining performance and might help to raise the quality of waffle shells.

In order to do this, authors examine in detail the waffle grid mirror milling manufacturing process. The factors which lead to the cell bottom thickness deviations were described and classified. It was analyzed and shown in the paper that deviations of the spindle axis against the surface normal affect the magnitude of cell bottom thickness errors. Authors also perform the mathematical modeling of cell bottom thickness errors because of presence of backlash in tracking system. The paper presents a detailed description of various techniques to increase the machining accuracy of the cell bottom. It was demonstrated that the most suitable is to use the combined digital compensation method by using of self-tuning system.

Implementation of the solution will enhance the mass-energy properties of the aerospace products by means of decrease of the overall dry mass by attainment the higher cell bottom machining accuracy. It also will bring to raise of the quality and reliability of production by reducing the defects amount.

The mirror milling machining process was considered. The factors leading to the thickness er-rors of the pocket bottoms were classified. Perfomed the simulation of the thickness errors genera-tion caused by the influence of the most significant factors. Techniques to increase the accuracy during machining of the pocket bottoms were analysed, provided the reason of using the combined digital correction method with self-tuning from pass to pass.

Keywords: mirror milling, waffle grid, large thin-walled parts, digital compensation algorithm, postprocessor.

Введение

Вафельные оболочки [1; 2] представляют собой тонкостенные обечайки цилиндрической, конической или сферической формы с сеткой подкрепляющих ребер. Вафельные оболочки являются основными несущими элементами корпусов изделий ракетно-космической техники (РКТ), в совокупности составляющими основную долю «сухой» массы изделия. Применение вафельных оболочек обеспечивает максимальные прочностные характеристики при минимальной массе конструкции [3–5].

Для достижения высоких массовых и прочностных характеристик изделия предъявляются повышенные требования по точности обработки остаточного полотна и ребер карманов вафельных оболочек [6].

Данные требования наряду с особенностями конструкций, имеющих вафельный фон и выраженных малой жесткостью при больших габаритных размерах заготовок, обуславливают применение специализированных методов и алгоритмов обработки [7], направленных на компенсацию ошибок формы заготовки, деформаций и других факторов, которые приводят к отклонениям фактической толщины остаточного полотна от заданной. Авторы [8] предлагают рассчитывать и корректировать ошибки фрезерования тонкостенных деталей с применением модели деформации инструмента и заготовки на основе метода конечных элементов. В [9] используется аналитическая модель сил резания и среда ANSYS для вычисления деформаций при фрезеровании нежестких деталей. В работе [10] представлена модель для вычисления ошибок формы, возникающих из-за деформации заготовки в процессе 5-координатного фрезерования лопаток двигателя. Модель может быть использована для генерирования скорректированной траектории в процессе обработки. Авторы [11] предлагают использовать лазерный датчик для измерения и построения модели фактической поверхности деформированной тонкостенной заготовки перед обработкой, которая используется для расчета корректоров и предыскажения траектории обработки детали. Статья [12] описывает технологию фрезерования вафельного фона обечайки с применением лазерного датчика, измеряющего координату противоположной стенки, для расчета и коррекции деформаций заготовки в режиме реального времени. В работе [13] с целью повышения точности обработки остаточного полотна авторы предлагают новую стратегию обработки тонкостенного изделия типа «днище», суть которой заключается в коррекции опорных точек управляющей программы с учетом фактической геометрии поверхности заготовки и деформаций в процессе резания. Фактическая геометрия поверхности вычисляется перед обработкой на основе данных измерений контактным щупом и ультразвуковым датчиком. Деформации в процессе резания вычисляются на основе предсказательной модели, параметры которой определяются по результатам измерений толщин полотна после предыдущего прохода. В работе [14] метод опорных векторов используется для классификации ошибок по толщине остаточного полотна на статические ошибки, зависящие от положения инструмента в рабочей зоне и динамические ошибки, меняющиеся со временем, предложены алгоритмы компенсации обоих типов ошибок. В работе [15] предлагается повысить точность обработки тонкостенных изделий с рядами карманов путем вычисления корректоров на основе модели, построенной на принципах машинного обучения.

Следует, однако, отметить, что на сегодняшний день зеркальное фрезерование [16; 17] является наиболее эффективной технологией механической обработки тонкостенных оболочек с точки зрения точности и производительности. При отечественном подходе один из основных способов производства вафельных оболочек – зеркальное фрезерование свернутой поверхности обечайки на станках типа СВО (система высокоточной обработки) [18].

Технология обработки вафельного фона на станках СВО обеспечивает компенсацию погрешностей установки и формы заготовки и увеличивает виброустойчивость системы СПИД (станок, приспособление, инструмент, деталь) за счет использования следящей опоры, выполняющей роль подвижного упора, и копировальной головки, которая отслеживает заднюю стенку заготовки.



Рис. 1. Схема выполнения зеркального фрезерования вафельного фона

Fig. 1. Waffle grid mirror milling process scheme

На рис. 1 представлена схема выполнения зеркального фрезерования вафельного фона на станках типа СВО. В данном случае приводы П1 и П2 осуществляют синхронное движение по управляющей программе (УП). Датчик Д, встроенный в копировальную головку КГ, отслеживает перемещение штока пневмоцилиндра; сигнал V с датчика поступает в систему числового программного управления (ЧПУ), которая корректирует положение фрезерной головки ФГ со шпинделем Ш, задавая корректирующее воздействие W приводу осевого перемещения фрезерной головки П3 в зависимости от отклонения е внутренней поверхности заготовки 3 с противоположной стороны.

Несмотря на компенсацию погрешностей установки и формы заготовки при осуществлении обработки вафельной оболочки на станке CBO, воздействие ряда факторов в процессе выполнения зеркального фрезерования вафельного фона приводит к отклонениям по толщине остаточного полотна и ширине продольных и кольцевых ребер карманов. Как следствие, это приводит к увеличению дополнительных масс изделия и необходимости выполнения доводочных операций с применением энергозатратных и трудоемких электрофизических методов обработки [19]. Поэтому развитие методов повышения точности обработки остаточного полотна и ребер карманов является актуальным направлением исследований. В данной работе представлены результаты исследования возможностей повышения точности механической обработки вафельного фона методами программной коррекции.

В ходе проведения исследований были решены частные задачи:

1. Рассмотрены основные факторы, вызывающие отклонения остаточного полотна, и степень этого влияния.

2. Исследованы методы повышения точности обработки поверхности кармана (остаточного полотна) и дан анализ направлений повышения точности механической обработки, прежде всего, применительно к повышению точности обработки дна кармана.

3. Предложено усовершенствовать существующую технологию обработки вафельного фона, применив комбинированную систему коррекции (самонастраивающуюся систему с коррекцией по возмущению).

Основным методом исследования в данной работе является цифровое моделирование в среде MATLAB & Simulink в сочетании с базой экспериментальных данных, полученных на реальном станке.

Факторы, влияющие на точность обработки по остаточному полотну

Группы факторов. При схеме обработки (рис. 1) можно выделить девять основных факторов (рис. 2), приводящих к отклонениям толщины остаточного полотна. Основными возмущениями при обработке изделия вафельного фона является:

1) недостаточная жесткость (конструктивно обоснованная) и её неоднородность для отдельных ячеек (присутствующие элементы типа фланцев, окантовок и т. д.),

2) большие массогабаритные размеры при сварной конструкции заготовки.

В процессе опытной обработки фрезерованием вафельных обечаек установлено, что отклонения толщины ребер и остаточного полотна имеют функциональную составляющую, зависящую как от номера точки обработки внутри одной ячейки, так и от номера кармана внутри ряда и от номера ряда. Поэтому факторы, влияющие на отклонение толщин ребер и полотна от номинальных значений, предлагается разделить на две группы (рис.2):

I группа – факторы, влияющие на толщину в пределах одного кармана;

II группа – факторы, влияющие на толщину по ряду и по всему изделию [5].

Факторы I группы приводят к образованию различных по величине отклонений в зависимости от положения режущего инструмента внутри одного кармана. При этом действие данных факторов можно рассматривать как квазипостоянное для близко расположенных ячеек с одной и той же траекторией обработки (одинаковые «картины» отклонений).

В свою очередь, факторы II группы определяют изменение толщин в зависимости от положения (порядкового номера) ячейки в рабочем пространстве станка и не оказывают существенного влияния на разнотолщинность внутри одной ячейки.



Рис. 2. Факторы, вызывающие отклонения толщины остаточного полотна

Fig. 2. Factors which affect cell bottom thickness errors

Следует отметить, что независимо от физической природы отклонения (геометрические, силовые, температурные факторы), как правило, случайную составляющую уменьшают конструкторско-технологическими методами, а функциональную (систематическую) – убирают цифровой коррекцией [20].

Необходимо подчеркнуть, что окончательное значение толщины остаточного полотна определяется на чистовом проходе. При чистовом проходе обеспечивается заданная чистота поверхности и существенное уменьшение сил резания. При этом влияние случайной составляющей сил резания на толщину остаточного полотна существенно уменьшается.

Факторы, сильно влияющие на толщину остаточного полотна и мало изученные в настоящее время. Такими факторами при чистовом фрезеровании кармана являются:

1) отклонение оси шпинделя от нормали к обрабатываемой поверхности;

2) погрешности копирования задней стенки кармана.

Влияние отклонения оси шпинделя от нормали к обрабатываемой поверхности на отклонение толщины остаточного полотна. На рис. 3 приведена схема образования ошибки по толщине остаточного полотна из-за отклонения оси шпинделя от нормали к поверхности. Как видно на рисунке, положение инструмента корректируется в точке A₀ на центральной оси инструмента по сигналу V с датчика слежения за контуром, который расположен соосно с фрезой.

В свою очередь, формообразование дна кармана осуществляется в точках A_1 или A_2 в зависимости от угла наклона $\angle \alpha$ линии поверхности задней стенки заготовки к торцу инструмента. Вследствие чего возникает ошибка *E* по толщине остаточного полотна. Если рассматривать участок поверхности задней стенки заготовки как прямую линию в окрестности точки A_0 , то данную ошибку можно выразить формулой

$$E = \left| \frac{R_{\rm dyp} * 360}{\pi D} \cdot \mathrm{tg}a \right|,\tag{1}$$

здесь $R_{\phi p}$ – радиус фрезы; D – диаметр заготовки.

$$tga = \frac{V_{i+1} - V_{i-1}}{B_{i+1} - B_{i-1}},$$
(2)

здесь V_i – показания датчика слежения за контуром в *i*-й точке; B_i – показания датчика поворота стола в *i*-й точке.



Рис. 3. Схема образования ошибки по толщине остаточного полотна из-за отклонения оси шпинделя от нормали к поверхности



Используя сигнал V с датчика слежения за контуром, полученный при предварительном обмере заготовки, разобьем его на участки и аппроксимируем сигнал по методу наименьших квадратов V = k * B + t на каждом из участков:

$$k = \frac{n * \sum_{i=1}^{n} B_i V_i - \sum_{i=1}^{n} B_i * \sum_{i=1}^{n} V_i}{n * \sum_{i=1}^{n} B_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} B_i\right)^2},$$
(3)

$$t = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_i - k * \sum_{i=1}^{n} B_i}{n}, \qquad (4)$$





Fig. 4. Curves of the mean values of the cell bottom thickness errors for the whole row of cells

здесь V_i – показания с датчика слежения за контуром в *i*-й точке; B_i – показания датчика поворота стола в *i*-й точке; n – количество точек аппроксимирующей прямой.

Далее по формулам (1) и (2) рассчитываются величины ошибок на каждом из участков. На рис. 4 приведены кривые ошибок по толщине остаточного полотна: черная кривая – усредненные значения измеренных ошибок, серая кривая – рассчитанные ошибки в соответствии с (1) и (2). Из рис. 4 видно, что расчетные отклонения хорошо коррелируют с измеренными отклонениями обработки пояса карманов. Влияние погрешности копирования задней стенки кармана на отклонение толщины остаточного полотна. Эффект влияния ошибки копирования задней стенки заготовки на толщину остаточного полотна проиллюстрирован на рис. 5. Здесь: 1 – серая сплошная линия – сигнал V с датчика слежения за контуром, записанный при вращении поворотного стола с заготовкой по координате В в прямом и обратном направлении, 2 – черная сплошная линия – сигнал, полученный «зеркальным отражением вокруг вертикальной оси» сигнала V, записанного при предварительном измерении задней стенки ячейки без выполнения реверса, т. е. «идеальный» сигнал с датчика копирования; 3 – черная штриховая линия – сигнал энкодера поворотного стола оси В; 4 – серая штриховая линия – сигнал энкодера оси Z (вертикальное перемещение суппорта). Как видно из рис. 5, наблюдается существенное различие между «идеальным» сигналом V – кривая 2 и сигналом V – кривая 1, записанным датчиком копирования при вращении поворотного стола с реверсом по координате В. Наблюдается характерная «полочка», именно в момент реверса [21].



Рис. 5. Сигналы с датчика копирования задней стенки при изменении направления движения

Fig.5. Signals from the opposite wall tracking sensor during the abrupt changes in the movement direction

Возможной причиной расхождения сигналов является наличие «упругого» зазора в системе копирования «копируемая поверхность – измерительный наконечник – преобразователь «перемещение – электрический сигнал» – привод слежения. Для проверки данного предположения была построена в Simulink модель копировальной системы вафельной обработки в соответствии со схемой, показанной на рис. 1.

Модель включает датчик слежения за контуром (блок V model на рис. 6) с зазором Backlash и модель привода по координате W (блок W model), отрабатывающей сигнал с датчика слежения. Для моделирования зазора использован стандартный блок Backlash, который обычно применяется для моделирования геометрического зазора [21]. В данной модели «идеальный» сигнал V формируется из массива данных, полученных предварительным обмером аналогично кривой 2 (рис. 5). Сигнал подается на вход модели системы слежения – блок V_model с блоком зазора Backlash и выводится на Scope1, где сравнивается с сигналом vmeas, измеренным во время чистовой обработки ячейки по траектории «зигзаг». После чего данный сигнал подается на вход модели привода, блок W_model; полученный на выходе сигнал используется для вычисления расчетной ошибки E_calculated как разницы между сигналом V, полученным предварительным обмером и фактическим сигналом W, на выходе системы с зазором. Расчетная ошибка вместе с измеренной ошибкой E measured выводится на Scope2.

На рис. 7 приведены сигналы со Scope1 при моделировании прохода по одной ячейке. Здесь *1* – серая штриховая линия – фактический измеренный сигнал копирования V во время обработки, *2* – черная сплошная линия – рассчитанный «идеальный» сигнал с датчика слежения за контуром (рассчитывается на основе данных о кривизне кармана до обработки), *3* – серая сплошная линия – сигнал V, полученный моделированием («упругого» зазора) при обработке кармана по траектории «зигзаг».



Рис. 6. Модель копировальной системы вафельной обработки при наличии нелинейности типа «зазор» в измерительной цепи слежения за контуром задней стенки заготовки





Рис. 7. Сигналы, полученные на Scope1 при моделировании прохода по одной ячейке

Fig. 7. Signals received in the Scope1 during modeling of the pass through one cell

Характер всех трех кривых на участке ab и a_1b_1 идентичен, а на участке ba_1 наблюдаются существенные отличия, а именно, характерная «полочка» – признак зазора.

На рис. 8 приведены сигналы со Scope2 при моделировании образования отклонения толщины остаточного полотна при проходе по одной ячейке. Здесь 1 – серая штриховая линия – полученный на модели привода сигнал W перемещения инструмента вдоль оси шпинделя во время обработки кармана по траектории «зигзаг», 2 – черная штриховая линия – рассчитанный «идеальный» сигнал с датчика слежения за контуром (рассчитывается на основе данных о кривизне кармана до обработки), 3 – черная сплошная линия – измеренная ошибка по толщине остаточного полотна, 4 – серая сплошная линия – рассчитанная ошибка по толщине остаточного полотна. Расчётная кривая 4 есть «разность» кривых 1 и 2 и, в целом, хорошо согласуются с кривой 3 за исключением участка *ab* (возможно, за счет неточности согласования точек отсчёта сигналов измерения и моделирования).



Рис. 8. Сигналы, полученные на Scope2 при моделировании прохода по одной ячейке



Результаты моделирования показывают, что периодическая ошибка при резком изменении траектории (реверсе одной из управляемых координат) носит функциональный характер и может быть объяснена «упругим» зазором в системе копирования задней стенки заготовки. Следует отметить сложность компенсации данной ошибки методами коррекции по возмущению, особенно, для более сложных траекторий типа «спираль».

Полученные и представленные выше результаты моделирования влияния отдельных факторов на толщину остаточного полотна указывают на тот факт, что среди рассматриваемых факторов (рис. 2) не удается выделить 1–2 фактора, которые доминировали бы по степени влияния на интегральное отклонение толщины остаточного полотна, и это является основной предпосылкой для выбора наиболее подходящего метода повышения точности обработки по толщине остаточного полотна. Ниже укрупненно рассмотрены основные методы повышения точности механической обработки и обоснован выбор системы и алгоритма коррекции.

Методы повышения точности обработки по толщине остаточного полотна

В [22] рассмотрены основные направления повышения точности металлорежущих станков с ЧПУ, разделенные на две группы:

1) совершенствование конструкции оборудования и технологии изготовления;

2) совершенствование процесса управления машины с ЧПУ методами программной коррекции. Как уже говорилось выше, применительно к чистовому фрезерованию вафельного фона перспективным представляется использование методов программной коррекции, так как они позволяют компенсировать наиболее существенные функциональные составляющие погрешности обработки остаточного полотна.

Различают следующие методы коррекции, используемые в процессе управления станком с ЧПУ:

1) методы коррекции на основе априорной информации (коррекция по результатам калибровки станка, предыскажение УП);

2) методы коррекции, основанные на принципе обратной связи;

3) методы коррекции, основанные на принципе компенсации возмущений.

При этом входными данными для методов коррекции могут служить результаты выполнения дополнительных контрольно-измерительных операций:

- сигналы с энкодеров осей X(t), Y(t), Z(t), B(t),..;
- сигнал с датчика слежения за контуром задней стенки V(t);
- сигнал с ультразвукового датчика контроля толщины остаточного полотна T(t) и др.

Наибольший эффект с точки зрения компенсации влияния большинства факторов может дать использование главного принципа управления – управления по отклонению в системе с отрицательной обратной связью, а именно, системы ультразвукового измерения (УЗИ) толщины в системе активного контроля с обратной связью по толщине остаточного полотна (рис. 9, *a*).





Ультразвуковой датчик устанавливается так, что он измеряет толщину остаточного полотна обрабатываемой обечайки непосредственно в зоне резания. Информация об отклонениях размера поступает в систему ЧПУ, в результате чего в режиме реального времени корректируется траектория движения фрезы относительно обрабатываемой детали (рис. 9, *a*):

$$Y_{c}(t) = Y_{ref}(t) + \left(T_{act}(t) - T_{ref}\right) \cdot W_{per}(s)$$
(5)

Здесь $Y_c(t)$ – текущее значение сигнала коррекции по обратной связи по толщине остаточного полотна для привода оси Y; $Y_{ref}(t)$ – заданное текущее программное значение координаты Y; $T_{acl}(t)$ – текущее измеренное значение толщины остаточного полотна; T_{ref} – заданное программное значение толщины остаточного полотна; $W_{per}(s)$ – передаточная функция регулятора, вычисляющего корректирующее воздействие по координате Y на основе показаний датчика обратной связи по толщине остаточного полотна. Однако в настоящее время это решение не удается реализовать из-за большого запаздывания сигнала, поступающего в систему ЧПУ от системы УЗК (время запаздывания ≥ 442 мс) [23; 24].

В соответствии с теорией автоматического управления альтернативой принципу управления по отклонению является принцип управления по возмущению (рис. 9, *б*), который дает хорошие результаты в случаях, когда на управляемый объект действуют один – два сильнодействующих фактора и хорошо изучены законы влияния возмущения на управляемый процесс.

Данные с датчика слежения за контуром задней стенки заготовки V(t) в привязке к данным с энкодеров осей B(t), Z(t) могут быть использованы в системе коррекции по возмущению (рис. 9, δ) для расчета корректирующей поправки K_{dist} , исходя из изложенной выше схемы влияния отклонения оси шпинделя от нормали к поверхности. В таком случае текущее значение сигнала коррекции по возмущению для привода оси *Y* будет определяться выражением:

$$Y_c = Y_p + K_{dist} \,, \tag{6}$$

здесь Y_c – заданное перемещение по координате Y с учетом коррекции по возмущению; Y_p – заданное перемещение по Y по нескорректированной УП; $K_{dist} = f(B, Z, V, R_{dp})$ – рассчитанная по (1), (2) корректирующая поправка для текущих значений координат (B, Z).

Отметим, что без существенной потери точности корректирующая поправка *Kdist* может быть вычислена заранее до выполнения чистового фрезерования. В этом случае используется массив значений $[B_v, Z_v, V]$, полученный при предварительном обмере задней стенки заготовки датчиком *V* по всему поясу карманов.

Данный массив $[B_v, Z_v, V]$ загружается в блок коррекции по возмущению, в результате вычисляется массив корректирующих поправок $[B_v, Z_v, K]$ для всех пар значений (B_v, Z_v) . Затем блок коррекции по возмущению вычисляет корректирующую поправку для опорных точек траектории $[B_p Z_p Y_p...]$ путем интерполяции рассчитанных ранее корректоров.

Вне зависимости от того, осуществляется ли вычисление сигнала коррекции до или во время обработки, такой подход позволяет компенсировать влияние одного фактора из девяти, что является недостаточным для достижения инвариантности управляемой координаты от возмущений.

Поэтому предлагается усовершенствовать существующую технологию обработки вафельного фона, применив комбинированную систему коррекции (самонастраивающуюся систему плюс управление по возмущению).

Комбинированная система коррекции

На рис. 10 представлена блок-схема комбинированной системы коррекции, которая использует как коррекцию по возмущению, так и коррекцию по обратной связи.

В данной системе используются несколько потоков информации:

– результаты измерения толщины остаточного полотна системой УЗК после чистовой обработки *i*-го кармана в виде карты толщин $[B_t^i Z_t^i T_{act}^i]$;

– результаты измерения задней стенки заготовки датчиком слежения за контуром V в виде массива $[B_v Z_v V]$;

– массив опорных точек траектории обработки $[B_p Z_p Y_p...]$, рассчитанный в постпроцессоре на основе заданных в САМ-системе траектории движения инструмента и режимов резания с учетом кинематической модели станка.



Рис. 10. Блок-схема комбинированной системы коррекции с самонастройкой

Fig. 10. Block diagram of the combined correction system with self-tuning

Чистовая обработка первой ячейки разделяется на два прохода: получистовой с припуском *b* под чистовую обработку $Y_p^1 = Y_p + b$ и чистовой по скорректированной УП $Y_p^1 = Y_c^1$. После получистового прохода карта толщин $[B_t^i, Z_t^i, T_{act}]$ и массив опорных точек траектории нескоррек-

тированной УП [$B_p Z_p Y_p...$] загружаются в блок самонастройки, где происходит первоначальная обработка сигнала толщины (сглаживание, фильтрация), интерполяция сигнала. В результате рассчитывается сигнал коррекции по обратной связи K^1_{fb} для всех опорных точек траектории УП:

$$K_{fb}^{1} = T_{pf}^{1} - T_{ref} - b, \qquad (7)$$

здесь T^{l}_{pf} – результаты измерения толщины остаточного полотна первой ячейки после получистового прохода при $Y_{p} = Y_{p} + b$; T_{ref} – заданная толщина остаточного полотна; b – припуск под получистовую обработку.

Скорректированная управляющая программа перемещения по оси *Y*, которая отрабатывает сигнал коррекции при чистовой обработке, примет вид

$$Y_c^1 = Y_p + K_{fb}^1. (8)$$

При чистовой обработке второй, ..., *i*-й, *i*+1 ячейки применяется та же самая УП, что и для чистовой обработки первой ячейки

$$Y_{c}^{2} = Y_{p} + K_{fb}^{2} = Y_{p} + K_{fb}^{1},$$
...
$$Y_{c}^{i} = Y_{p} + K_{fb}^{i} = Y_{p} + K_{fb}^{i-1},$$

$$Y_{c}^{i+1} = Y_{p} + K_{fb}^{i+1} = Y_{p} + K_{fb}^{i},$$
(9)

здесь Y_c^i – заданное в кадре перемещение по координате Y при чистовой обработке *i*-й ячейки с учетом коррекции по обратной связи; Y_p – заданное в кадре перемещение по Y по нескорректированной УП; K_{fb}^i – сигнал коррекции по обратной связи для *i*-й ячейки.

При этом влияние факторов II группы, рассмотренных ранее, будет приводить к увеличению ошибок T^{i}_{act} при обработке последующих ячеек. Следовательно, необходимо периодически выполнять перерасчет (перенастройку системы) сигнала коррекции по обратной связи K^{i}_{fb} для обеспечения требуемой точности чистовой обработки. С этой целью во время чистовой обработки *i*-й ячейки производится обмер карты толщин $[B^{i}_{t} Z^{i}_{t} T^{i}_{act}]$, результаты измерения толщин загружаются в блок самонастройки, где сигнал толщины T^{i}_{act} оценивается на предмет принадлежности граничному диапазону (T_{th}^{\min} ... T_{th}^{\max}). Если значение толщины остаточного полотна T^{i}_{act} после обработки *i*-й ячейки выходит за сигнальные границы, сигнал коррекции для последующей ячейки K^{i+1}_{fb} перерассчитывается подобно тому, как это осуществлялось для первой ячейки, т. е. выполняется получистовой проход с припуском *b* на *i*+1 ячейке, расчет корректоров K^{i+1}_{fb} . Далее выполняется чистовая обработка *i*+1, *i*+2 и т. д. ячеек с рассчитанным корректором K^{i+1}_{fb} . Сказанное выше можно описать соотношением:

$$K_{fb}^{i+1} = K_{fb}^{i}, \text{ при } \max(T_{act}^{i}) < T_{th}^{\max}, \min(T_{act}^{i}) > T_{th}^{\min}$$

$$K_{fb}^{i+1} = T_{pf}^{i+1} - T_{ref} - b, \text{ при } \max(T_{act}^{i}) \ge T_{th}^{\max}, \min(T_{act}^{i}) \le T_{th}^{\min}$$
(10)

здесь K^{i+1}_{fb} – сигнал коррекции по обратной связи для i+1 ячейки; T^{i}_{act} – результаты измерения толщины остаточного полотна i-й ячейки после чистового прохода по программе Y^{i}_{c} ; T^{i+1}_{pf} – результаты измерения толщины остаточного полотна i+1 ячейки после получистового прохода по программе $Y_{p} = Y_{p} + b$; T_{ref} – заданная толщина остаточного полотна; b – припуск под получистовую обработку; T_{th}^{\min} , T_{th}^{\max} – соответственно максимальное и минимальное сигнальное значение толщины остаточного полотна.

Увеличить интервал между операциями перенастройки системы можно компенсируя влияние части факторов II группы путем введения и расчета дополнительной коррекции по возмущению K^{i}_{dist} . Как описано выше, данный корректор K^{i}_{dist} можно рассчитать до чистовой обработки

по формулам (1) и (2) на основе массива значений $[B_v Z_v V]$, полученного при предварительном обмере задней стенки заготовки, и массива опорных точек траектории обработки *i*-й ячейки $[B_p Z_p Y_p...]$.

С учетом коррекции по возмущению, вычисляемой перед обработкой и коррекцией по обратной связи, которая рассчитывается при обработке, формула (6) для чистовой обработки *i*-й ячейки примет вид

$$Y_{c}^{i} = Y_{p} + K_{fb}^{i} + K_{dist}^{i} \,, \tag{11}$$

здесь K_{dist}^{i} –корректор по возмущению, рассчитанный по формулам (1) и (2).

Заключение

Можно сделать следующие выводы:

 проведено объединение факторов в две группы, приводящих к отклонениям по толщине остаточного полотна обечайки, по признаку зависимости в функции номера точки обработки внутри одной ячейки и в функции номера кармана внутри ряда и от номера ряда;

 исследовано влияние отклонения оси шпинделя от перпендикулярности к обрабатываемой поверхности на толщину остаточного полотна и разработана методика вычисления и внесения корректирующей поправки в УП;

– исследовано влияние погрешности копирования задней стенки кармана на отклонение толщины остаточного полотна и выявлен механизм («упругий» зазор) образования специфической формы (наличие «площадки») кривой отклонения остаточного полотна при реверсе поворотного стола для случая обработки кармана строчками. Результаты проведенного исследования могут быть использованы для модернизации (усовершенствования) механизма копирования с целью повышения точности обработки остаточного полотна;

 предложена комбинированная система коррекции, объединяющую самонастройку от кармана к карману с самонастройкой от прохода к проходу и управление по возмущению;

 – разработана схема и алгоритм работы комбинированной системы коррекции с самонастройкой от кармана к карману как наиболее рациональной (число коррекций) с точки зрения уменьшения функциональной составляющей ошибки по толщине остаточного полотна;

 представленный в статье материал по исследованию возможностей повышения точности обработки остаточного полотна вафельных обечаек методами программной коррекции как одно целое дает возможность инженерам – проектировщикам специального оборудования сопоставлять возможности цифровой коррекции и конструкторско-технологических направлений улучшения технологического оборудования;

– для завершения на данном этапе проводимых исследований по точности обработки остаточного полотна необходимо опробовать предложенный алгоритм методом имитационного моделирования на базе имеющихся данных измерений отклонений обработанных обечаек на станке СВО.

Библиографические ссылки

1. Кац И. Л. К истории создания конструкции, метода расчёта и примеров реализации вафельных обечаек баков ракет [Электронный ресурс]. URL: https://listak.livejournal.com/ 2484.html (дата обращения: 22.12.2021).

2. Ворожейкин В. А, Литвинчук А. Ю. Сквозная технология изготовления несущих корпусов изделий ракетно-космической техники // Решетневские чтения : материалы XXI Междунар. науч. конф. (8–11 ноября 2017, г. Красноярск) : в 2-х ч. / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2017. С. 481–482.

3. Зайцев А. М. Разработка направлений повышения эффективности технологической подготовки производства деталей и узлов ракетно-космической техники: дис. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. 166 с. 4. Зайцев А. М., Шачнев С. Ю. Определение технологичности обечайки с вафельной конструкцией // РИТМ машиностроение. 2018. № 4. С. 42–43.

5. Pas O., Serkov N. Developing an algorithm to control the accuracy of the milling of aerospace parts with cellular structure by using copying machine- tools with CNC of "SVO" type // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 489. P. 351–355.

6. Пась О. В., Серков Н. А. Повышение точности обработки остаточного полотна вафельных оболочек методом самонастройки от прохода к проходу // XXXII Междунар. инновационная конф. молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения : сб. тр. конф. 2021. С. 498–502.

7. Del Sol I., Rivero A., López de Lacalle L.N., Gamez, A.J. Thin-Wall Machining of Light Alloys: A Review of Models and Industrial Approaches // *Materials (Basel)*. 2019. Vol. 12. P. 2012.

8. Liu S., Xiao-dong S., Xiao-bo G., Wang D. Simulation of the deformation caused by the machining cutting force on thin-walled deep cavity parts // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 92. P. 3503–3517.

9. Du Z., Zhang D., Hou H., Liang S.Y. Peripheral milling force induced error compensation using analytical force model and APDL deformation calculation // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 88. P. 3405–3417.

10. Li Z.-L., Tuysuz O., Zhu L.-M., Altintas Y. Surface form error prediction in five-axis flank milling of thin-walled parts // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2018. Vol. 128. P. 21–32.

11. Bi Q., Huang N., Shaokun Z., Shuai C., Yuhan W. Adaptive machining for curved contour on deformed large skin based on on-machine measurement and isometric mapping // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2018. Vol. 136.

12. Wang X., Li Z., Bi Q., Zhu L., Ding H.. An accelerated convergence approach for real-time deformation compensation in large thin-walled parts machining // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2019. Vol. 142. P. 98–106.

13. Huang N., Yin C., Liang L., Hu J., Wu S. Error compensation for machining of large thinwalled part with sculptured surface based on on-machine measurement // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 96. P. 4345–4352.

14. Bi Q., Wang X., Wu Q., Zhu L., Ding H. Fv-SVM-Based Wall-Thickness Error Decomposition for Adaptive Machining of Large Skin Parts // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019. Vol. 15. P. 2426–2434.

15. Ge G., Du Z., Yang J. On-machine measurement-based compensation for machining of thin web parts // *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 48. P. 844–851.

16. Panczuk R., Foissac P.-Y. Process and device for machining of panels. US Patent No. 7682112B2, 2010.

17. Авиационный консалтинг. Оборудование и технология механической обработки методом зеркального фрезерования [Электронный ресурс]. URL: https://www.aviacons.ru/ru/postavkaimportnogo-oborudovaniya/zerkalnoye-frezerovaniye/ (дата обращения: 22.12.2021).

18. Писаренко А. А., Ковалев А. М. Механообрабатывающий центр модели «СВО-3500» для формирования вафельного фона на крупногабаритных корпусных конструкциях изделий ракетно-космической техники // Вестник «НПО «Техномаш». 2018. № 6. С. 86–90.

19. Батрутдинов Р., Сысоев С. Технология изготовления вафельного фона в обечайках летательных аппаратов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2011. № 7. С. 7–8.

20. Серков Н. А. Основные направления повышения точности металлорежущих станков // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2010. № 2. С. 26–35.

21. Pas O. V., Serkov N. A. Influence of the gap and the friction on trajectory reproduction accuracy in a multiaxis machine with cnc // JVE International Ltd. Vibroengineering PROCEDIA. 2016. Vol. 8. P. 483–488.

22. Серков Н. А. Точность многокоординатных машин с ЧПУ: Теоретические и экспериментальные основы. М. : ЛЕНАНД, 2015. 304 с.

23. Zhang S., Bi Q., Ji Y., Wang Y. Real-Time Thickness Compensation in Mirror Milling Based on Modified Smith Predictor and Disturbance Observer // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2019. Vol. 144. P. 1–14.

24. Mahmud A. Mechanical Pocket Milling of Thin Aluminum Panel with a Grasping and Machining End Effector. Universite De Montreal, 2015. 147 p.

References

1. Kac I. L. *K istorii sozdaniya konstrukcii, metoda raschyota i primerov realizacii vafel'nyh obechaek bakov raket* [To the history of the creation of design, calculation techniques and examples of implementation of the waffle shells of the rocket tanks] (In Russ.). Available at: https://listak.livejournal.com/2484.html (accessed: 22.12.2021).

2. Vorozhejkin V. A, Litvinchuk A. Ju [Pass-through method of the manufacturing of the loadcarrying bodies of the products of space industry]. *Reshetnevskie chtenija: materialy XXI Mezhdunar. nauch. konf.* [Materials XXI Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2017, p. 481– 482 (In Russ.).

3. Zajcev A. M. *Razrabotka napravleniy povysheniya ehffektivnosti tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva detaley i uzlov raketno-kosmicheskoy tekhniki* [Development of the approaches of increasing the efficiency of the engineering process of the parts and units of the space industry. Dr. techn. sci. diss]. Moscow, BMSTU Publ., 2016, 166 p.

4. Zajcev A. M., Shachnev S. Yu. [Determination of the manufacturability of the shells with waffle-based design]. *RITM mashinostroeniya*. 2018, No. 4, P. 42–43 (In Russ.).

5. Pas O., Serkov N. Developing an algorithm to control the accuracy of the milling of aerospace parts with cellular structure by using copying machine-tools with CNC of "SVO" type. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019, Vol. 489, P. 351–355.

6. Pas' O. V., Serkov N. A. [An improvement of the accuracy of the mirror-milling of the shells with cellular structure by means of self-tuning approach pass by pass]. *XXXII Mezhdunarodnaja innovacionnaja konferencija molodyh uchenyh i studentov po problemam mashinovedenija. Sbornik trudov konferencii* [Materials XXXII International Scientific Conference of Young Scientists and Students on problems of Mechanical Engineering]. Moscow, 2021, P. 498–502 (In Russ.).

7. Del Sol I., Rivero A., López de Lacalle L.N., Gamez, A.J. Thin-Wall Machining of Light Alloys: A Review of Models and Industrial Approaches. *Materials (Basel)*, 2019, Vol. 12, P. 2012.

8. Liu S., Xiao-dong S., Xiao-bo G., Wang D. Simulation of the deformation caused by the machining cutting force on thin-walled deep cavity parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017, Vol. 92, P. 3503–3517.

9. Du Z., Zhang D., Hou H., Liang S.Y. Peripheral milling force induced error compensation using analytical force model and APDL deformation calculation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017, Vol. 88, P. 3405–3417.

10. Li Z.-L., Tuysuz O., Zhu L.-M., Altintas Y. Surface form error prediction in five-axis flank milling of thin-walled parts. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2018, Vol. 128, P. 21–32.

11. Bi Q., Huang N., Shaokun Z., Shuai C., Yuhan W. Adaptive machining for curved contour on deformed large skin based on on-machine measurement and isometric mapping. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2018, Vol. 136.

12. Wang X., Li Z., Bi Q., Zhu L., Ding H.. An accelerated convergence approach for real-time deformation compensation in large thin-walled parts machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2019, Vol. 142, P. 98–106.

13. Huang N., Yin C., Liang L., Hu J., Wu S. Error compensation for machining of large thinwalled part with sculptured surface based on on-machine measurement. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018, Vol. 96, P. 4345–4352. 14. Bi Q., Wang X., Wu Q., Zhu L., Ding H. Fv-SVM-Based Wall-Thickness Error Decomposition for Adaptive Machining of Large Skin Parts // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019, Vol. 15, P. 2426–2434.

15. Ge G., Du Z., Yang J. On-machine measurement-based compensation for machining of thin web parts. *Procedia Manufacturing*. 2020, Vol. 48, P. 844–851.

16. Panczuk R., Foissac P.-Y. Process and device for machining of panels. US Patent No. 7682112B2, 2010.

17. Aviacionnyy konsalting. Oborudovanie i tehnologiya mehanicheskoy obrabotki metodom zerkal'nogo frezerovaniya [Aviation Consulting. Mirror milling machining equipment and technology] (In Russ.). Available at: https://www.aviacons.ru/ru/postavka-importnogo-oborudovaniya/zerkalnoyefrezerovaniye/ (accessed: 22.12.2021).

18. Pisarenko A. A., Kovalev A. M. [Machining center SVO-3500 for manufacturing waffle shells for using in large loadcarrying bodies of the products of space industry]. *Vestnik FGUP NPO Tekhnomash.* 2018, No. 6, P.86–90 (In Russ.).

19. Bartrutdinov R. G., Sysoev S. K. [Manufacturing technology for producing waffle grid for aircrafts shells]. *Aktual'nye problemy aviacii i kosmonavtiki*. 2011, No. 1, P. 7–8 (In Russ.).

20. Serkov N. A. [Main ways of increasing the accuracy of the machine-tools]. *Problemy mashi-nostroeniya i avtomatizacii*. 2010, No. 2, P. 26–35 (In Russ.).

21. Pas O., Serkov N. Influence of the gap and the friction on trajectory reproduction accuracy in a multiaxis machine with cnc. *JVE International Ltd. Vibroengineering PROCEDIA*. 2016, Vol. 8, P. 483–488.

22. Serkov N. A. *Tochnost' mnogokoordinatnyh mashin s ChPU: Teoreticheskie i yeksperimental'nye osnovy* [Accuracy of the multiaxis machine tools: theoretical and practical basics. Dr. techn. sc. diss]. Moscow, Lenand Publ., 2015, 304 p. (In Russ.).

23. Zhang S., Bi Q., Ji Y., Wang Y. Real-Time Thickness Compensation in Mirror Milling Based on Modified Smith Predictor and Disturbance Observer. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2019, Vol. 144, P. 1–14.

24. Mahmud A. Mechanical Pocket Milling of Thin Aluminum Panel with a Grasping and Machining End Effector. Universite De Montreal, 2015, 147 p.

С Пась О. В., Серков Н. А., 2022

Пась Олег Викторович – начальник отделения автоматизации технологических процессов; АО «НПО «Техномаш» имени С. А. Афанасьева». E-mail: 0.pa88@yandex.ru.

Серков Николай Алексеевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вибротехнических систем; Институт машиноведения имени А. А. Благонравова Российской академии наук. E-mail: serkov1943@mail.ru.

Pas Oleg – head of the process automation department; JSC "NPO "Technomash named after S. A. Afanas'ev". E-mail: o.pa88@yandex.ru.

Serkov Nikolay – Dr. Sc., leading researcher in vibration engineering lab; Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Science named after A. A. Blagonravov. E-mail: serkov1943@mail.ru.

УДК 621.9.048 Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-337-346

Для цитирования: Шестаков И. Я., Шестаков В. И., Ремизов И. А. Коэффициент эрозии при электроконтактной обработке металлов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 2. С. 337–346. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-337-346.

For citation: Shestakov I. Ya., Shestakov V. I., Remizov I. A. [Erosion coefficient in electric contact processing of metals]. *Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 2, P. 337–346. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-337-346.

Коэффициент эрозии при электро-контактной обработке металлов

И. Я. Шестаков^{1*}, В. И. Шестаков¹, И. А. Ремизов²

 ¹Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31
 ²Красноярский государственный медицинский университет имени профессора В. Ф. Войно-Ясенецкого Российская Федерация, 660022, г. Красноярск, ул. Партизана Железняка, 1
 *E-mail: yakovlevish@mail.ru

В производстве ракетно-космической техники используются труднообрабатываемые стали и сплавы традиционными методами. Поэтому применяютсяэлектрические способы обработки деталей, использующие разновидности термического воздействия электрического тока непосредственно в процессе удаления слоя материала. В технологии размерной электрообработки возрастает роль электроэрозионных методов, которые находят все большее применение во всех отраслях машиностроения как наиболее эффективные, а зачастую, и как единственно возможные способы обработки деталей из современных высокопрочных и вязких конструкционных материалов. Одним из перспективных методов электрообработки металлических заготовок является электроконтактный. Для оценки эффективности этого метода применяется производительность. Проведённый литературный анализ показал, что для оценки производительности используется произведение силы тока на коэффициент, учитывающий режим обработки и материал электродов. В дальнейшем этот коэффициент получил название коэффициента электрической эрозии. Для металлов, используемых в коммутирующей аппаратуре значение коэффициента, приводится. Однако применять его для расчёта производительности электроконтактной обработки нельзя из-за значительного отличия эрозионных процессов, протекающих в межэлектродном зазоре. По литературным данным произведён расчёт коэффициента эрозии при электроконтактной обработке, результаты представлены в таблице. В нескольких работах указано, что коэффициент эрозии зависит от полярности включения электродов-вращающегося диска и обрабатываемой заготовки. Приведённые данные противоречивы, поэтому были проведены исследования влияния полярности включения на коэффициент эрозии. При одинаковой марке обрабатываемого материала и вращающегося диска полярность включения не имеет значения. Выявлено, что для стали марки Cm3 коэффициент эрозии зависит от напряжения на электродах и при приближении к напряжению дугообразования резко возрастает независимо от полярности включения. Для нержавеющей стали резкое увеличение коэффициента эрозии наблюдается только при прямой полярности включения.

Ключевые слова: электроконтактная обработка, производительность, коэффициент эрозии, напряжение на электродах, полярность включения.

Erosion coefficient in electric contact processing of metals

I. Ya. Shestakov^{1*}, V. I. Shestakov¹, I. A. Remizov²

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
 31, Krasnoiarskii Rabochi prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
 ²Prof. V. F. Voino-Yasenetsky Krasnoyarsk State Medical University
 1, Partizan Zheleznyaka St., Krasnoyarsk, 660022, Russian Federation
 *E-mail: yakovlevish@mail.ru

In the production of rocket and space technology, difficult-to-machine steels and alloys are used by traditional methods. Therefore, electrical methods for processing parts are used that use a variety of thermal effects of an electric current directly in the process of removing a layer of material. In the technology of dimensional electrical processing, the role of electroerosive methods is increasing, which are increasingly used in all branches of mechanical engineering as the most effective, and often, and as the only possible ways of processing parts made of modern high-strength and viscous structural materials. One of the most promising methods of electrical processing of metal blanks is electrocontact. Performance is applied to evaluate the effectiveness of this method. The carried out literary analysis showed that the product of the current strength and the coefficient taking into account the processing mode and the material of the electrodes is used to assess the productivity. Later, this coefficient was called the coefficient of electrical erosion. For metals used in switching equipment, the value of the coefficient is given. However, it cannot be used to calculate the performance of electrical contact processing due to the significant difference in erosion processes occurring in the interelectrode gap. According to the literature data, the erosion coefficient was calculated during electrical contact processing, the results are presented in the table. In several works it is indicated that the erosion coefficient depends on the polarity of the inclusion of the rotating disk electrodes and the workpiece being processed. The data presented are contradictory; therefore, studies were carried out on the influence of the inclusion polarity on the erosion coefficient. With the same grade of the processed material and the rotating disc, the polarity of the inclusion does not matter. It was revealed that for steel grade St.3 the erosion coefficient depends on the voltage on the electrodes and, when approaching the arcing voltage, increases sharply, regardless of the polarity of the inclusion. For stainless steel, a sharp increase in the erosion coefficient is observed only at the straight polarity of the inclusion.

Keywords: electrical contact processing, productivity, erosion coefficient, voltage across the electrodes, polarity of inclusion.

Введение

Тенденции современного развития и повышения технического уровня авиакосмической техники связаны с непрерывным улучшением эксплуатационных характеристик применяемых материалов – их прочности, твердости, ударной вязкости, жаропрочности, стойкости к коррозионным средам и т. д. В свою очередь появление новых видов материалов, обладающих специфическими физико-механическими свойствами и, как следствие, характеризующихся трудностью их обработки традиционными методами, обуславливает актуальность создания и широкого внедрения в промышленность новых эффективных технологических процессов, основанных на фундаментальных достижениях современной науки и техники. Одним из приоритетных направлений, существенно расширяющих технологические возможности процесса обработки деталей, изготавливаемых из сталей и сплавов, обладающих высокими прочностными характеристиками, является использование локального термического воздействия непосредственно на физико-механические свойства обрабатываемого материала, включая изменение его структурных характеристик и агрегатного состояния, так что производительность обработки не зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала, а определяется только его теплофизическими характеристиками Видное место в этом, успешно развивающемся в последние годы, перспективном направлении занимают электрические способы обработки деталей, использующие разновидности термического воздействия электрического тока непосредственно в процессе удаления слоя материала В технологии размерной электрообработки возрастает роль электроэрозионных методов, которые находят все большее применение во всех отраслях машиностроения как наиболее эффективные, а зачастую, и как единственно возможные способы обработки деталей из современных высокопрочных и вязких конструкционных материалов [1–5]. В этих условиях приобретает актуальность проблема широкого использования потенциальных возможностей электрических методов обработки, и создание на их базе новых эффективных технологических процессов.

Одним из перспективных методовэлектрообработки металлических заготовок является электроконтактный [6]. По сравнению с другими видами электрообработки металлов электроконтактная имеет ряд преимуществ. Для её реализации не требуются жидкие среды, незначительно изнашивается режущий инструмент и применяется безопасное для работы напряжение на электродах. Обработке подвергается любой электропроводный материал независимо от прочности и твёрдости [7].

Анализ литературных данных

Технологические показатели, принятые за критерии оценки эффективности процесса электроконтактнойобработки это: производительность, удельный расход электроэнергии, качество обработанной поверхности (шероховатость, глубина измененного слоя, подвергшегося термическому воздействию, наличие микротрещин на обработанной поверхности) и износ электродинструмента. Наиболее важным показателем ЭКО является производительность.

При электроконтактной обработке массовая производительность (*m*) определяется как масса удалённого (снятого) металла (М) в единицу времени

$$m = M / t$$
,

где *М* – масса снятого (удалённого) металла; *t* – время обработки.

При электроконтактной обработке в воздушной среде зависимость скорости съёма от среднего тока имеет характер, близкий к линейному, то производительность процесса [1] можно оценивать через силу тока

$$m=kI$$
,

где *k* – коэффициент, учитывающий режим обработки и материал электродов.

При разрезании заготовок производительность

$$m = k 1 I$$
,

где k1 = k / b; b – толщина заготовки.

Массовую производительность [8] предлагается определять по формуле

$$m = V_{\pi}Bb\rho$$
,

где $V_{\rm n}$ – скорость подачи инструмента, см/мин; B – толщина заготовки, см; b – ширина прорези, см; ρ – плотность обрабатываемого материала, г/см³. $V_{\rm n}$ – выбирают на основе практического опыта.

Теплофизические свойства материала в расчёте не учитываются. Однако скорость подачи инструмента можно рассчитать с учётом теплофизических свойств обрабатываемого материала [5].

В первых работах по электро-контактной обработке [9] для расчёта производительности предлагалось учитывать электрическую и механическую составляющие эрозии в процессе

$$m = M / t = k_{\text{эл}} * I + k_{\text{mex}} * N / b * g_{\text{s}}$$

где k_{3n} и $k_{\text{мех}}$ – коэффициенты электрической и механической эрозии; g – ускорение свободного падения; N – механическая мощность в зазоре, которая определяется по формуле $N = 2 * \pi * n * P * k_{\text{m}} * r / 60$

где n – число оборотов дискового инструмента; P – усилие подачи; $k_{\rm rp}$ – коэффициент трения между диском и обрабатываемой заготовкой; r – радиус диска.

Усилие подачи определяется расчётным путём [10], величина $k_{\rm rp}$ не определяемая, так как неизвестно состояние материала заготовки и инструмента в зоне контакта.Коэффициенты эрозии могут быть определены только экспериментальным путём. Учитывая тот факт, что наибольшее использование получила ЭКО в режиме оплавления, т. е. когда механическая эрозия незначительна (менее 5 %), в дальнейшем рассматривается только электрическая эрозия.

С электрической эрозией столкнулись специалисты в области коммутирующей аппаратуры для материалов контактов. В справочнике [11] рассматриваются механические, электрические, теплофизические свойства контактных материалов. Однако количественные эрозионные характеристики не представлены. Наиболее полные свойства контактных материаловимеются в справочнике [12]. Так, для железа коэффициент эрозии $k_{\rm sp} = 0,006 \text{ мм}^3/\text{A*c.}$

В работах [13; 14] исследовалась связь между теплосодержанием, физико-механическими и эрозионными характеристиками металлов. Основные выводы из работ:

– физико-механические и эрозионные характеристики металлов определяются энергией связи между атомами в узлах кристаллической решетки. Энергия связи между атомами изменяется с изменением теплосодержания(энтальпии) единицы объема металла;

- с целью выявления закономерностей поведения металла при различных физических процессах необходимо свойства металла определять на единицу объема (мм³, см³ и т. д.);

– зависимость, связывающая величину межатомного взаимодействия с физико-механическими и эрозионными свойствами веществ, представляет ряд элементов, последовательно расположенных по мере изменения теплосодержания, обусловленный монотонным возрастанием энергии связи атомов в конденсированной фазе независимо от типа химической связи и кристаллического состояния веществ.

Коэффициент электрической эрозии на единицу объёма обрабатываемого металла при электроэрозионно-химической обработке рассмотрен в работе [15].

Производительность обработки при копировально-прошивочных операциях оценивается суммой скоростей электроэрозионной и электрохимической обработок

$$V = V_{\rm sp} + V_{\rm sx} = k_{\rm sp} * i_{\rm sp} + k_{\rm sx} * i_{\rm sx}$$

В этом уравнении коэффициент эрозии кэр определяется:

$$k_{\rm 3p} = 0,4 * U * 60 / (Q * d + 2,2 [k / P_{\rm on}] * \Pi), \, {\rm MM}^3/{\rm A*}{\rm MuH},$$

где *d* – плотность обрабатываемого металла; *k* – эмпирический коэффициент; *P*_{оп} – оптимальное значение мощности, соответствующее максимальному съёму материала на единицу тока.

Значения *k* и P_{on} нужно определять экспериментально, поэтому коэффициент эрозии не рассчитать. В работе приводится значение коэффициента эрозии железа при электроэрозионнохимической обработке $k_{sp} = 20 \text{ мм}^3 / \text{A} \cdot \text{мин}$, что составит 0,333 мм³/А*с.

При электроэрозионной обработке для расчёта производительности используют коэффициент равный объёму металла, снимаемого одним или несколькими импульсами с суммарной энергией 1 Дж [16]. Этот коэффициент зависит от вида и состояния рабочей среды, её прокачки, материалов и размеров электродов, характеристики импульсов и находят его экспериментально. Если значение этого коэффициента умножить на напряжение, то получается коэффициент эрозии.

Напряжение на электродах при электроэрозионной обработке находится в диапазоне (20–50) В [17]. При таком напряжении $k_{sp} = (0,0033-0,008) \text{ мм}^3/\text{A*c.}$ Малое значение коэффициента эрозии вызывает сомнение в правильности определения объёма металла приходящегося на энергию импульса 1 Дж. Коэффициент эрозии может быть определён по формуле

$$k_{\rm sp} = V / I * 60,$$

где V – объёмная производительность, мм³/мин; I – сила тока, А; 60 – переводной коэффициент.

Расчёт по вышеприведённой формуле по данным из справочника [17] показал, что с увеличением частоты импульсов от 1 до 440 кГц коэффициент эрозии уменьшается в 5–7 раз (с 0,11 до 0,016 мм³/А*с.). Это можно объяснить тем, что рабочая среда не успевает восстановить свои свойства и большая часть электрических импульсов не приводит к пробою межэлектродного промежутка.

При электроконтактной обработке вращающимся электродом-инструментом условия эвакуации продуктов обработки улучшаются, поэтому следует ожидать увеличения коэффициента эрозии.

В работе [17] приведена графическая зависимость коэффициента расплавления вращающихся заготовок из стали 113ГЛ от напряжения холостого хода и полярности включения. Размерность указанного коэффициента совпадает с размерностью коэффициента эрозии. Из графика видно, что полярность включения и напряжение холостого хода влияют на величину коэффициента эрозии. За счёт вращения заготовки *k*эр достигает максимального значения 1 мм³/А*с при напряжении холостого хода 30 В и обратном включении электродов.

В [18] приводятся данные по удельному расходу электроэнергии для ЭКО слитков из коррозионностойких и жаропрочных сталей q = 0.8 - 1.2 кВт*ч/кг.

Рассчитать коэффициент эрозии можно по формуле:

$$k_{\rm sp} = U/q * 3600 * r, \tag{1}$$

где *U* – напряжение, подаваемое на заготовку и вращающийся диск, B; 3600 – коэффициент перевода часов в секунды; *r* – плотность стали, г/мм³.

При q = 1 кВт*ч/кг получим kэр = 0,854 мм³/А*с.

При обработке титана достигнута производительность m = 12,5 г/с, при этом среднее значение тока *I* составило 3574 A, тогда коэффициент эрозии будет равен 0,8 мм³/A*с.

При резке заготовок из алюминиевых сплавов среднее значение удельных энергозатрат составляет 2 кВт*ч/кг, при этом рабочее напряжение при ЭКО листа равно 23 В, прибылей – 28 В, тогда коэффициенты эрозии соответственно будут равны 1,18 и 1,4 мм³/А*с.

В работе [19] указано, что удельный расход электроэнергии при электродуго-контактной обработке для сталей различных марок составляет 1,4–1,8 кВт*ч/кг при среднем напряжении 32,5 В. После подстановки в выражение (1) средних значений получим kэр = 0,717 мм³/А*с.

Для экспериментального определения коэффициента эрозии при электроконтактной обработке вращающимся дисковым электродом на переменном токе промышленной частоты разработана схема исследований и установка для ручной резки металлов [20]. Для расчёта коэффициента эрозии использовалось выражение:

$$k_{\rm sp} = M / I * \tau, \tag{2}$$

где *M* – масса снятого металла, г; *I* – сила тока, А; т – время, в течение которого проводилось снятие металла, с.

Резке подвергали прокат из стали Ст. 3 в виде трубы и уголка. Для трубы коэффициент эрозии равен 0,2, для уголка – 0,3 мм³/А*с. Низкое значение коэффициента эрозии можно объяснить малой величиной напряжения на электродах. Результаты расчётов коэффициента эрозии по данным из разных источников показаны в табл. 1.

Исследования электроконтактной резки на постоянном токе при прямой полярности включения электродов представлены в работе [21]. По результатам опытов рассчитан объёмный коэффициент эрозии. В табл. 2 представлены теплофизические свойства обрабатываемых материалов: температура плавления (*П*пл), коэффициент теплопроводности (λ), массовая удельная теплоёмкость (c), объёмная удельная теплоёмкость (c) коэффициент зрозии (k_{sp}). На основании теплофизических свойств рассчитан критерий Палатника и коэффициент температуропроводности. Критерий Палатника был предложен для оценки эрозионной стойкости металлов

$$\Pi = \lambda * \rho * c * T_{\Pi \Pi} 2.$$

По мнению учёных, этот критерий длянекоторых случаев не соответствует действительности [22].

Таблица 1

Коэффициенты эрозии по литературным данным

Источник	Материал	Вид заготовки	Способ	Коэффициент
			определения $k_{\rm sp}$	эрозии <i>k</i> _{эр} , мм ³ /А*с
17	Сталь 110Г13Л	Стержень цилиндр.	Из графика	1,0
8	Коррозионно-стойкие	Слитки	Форм. (2)	0,85
	и жаропрочные стали			
8	Титан		Форм. (1)	0,8
18	Алюм. сплав	Лист	Форм. (2)	1,18
19	Стали разных марок		Форм. (2)	0,72
20	Сталь Ст3	Труба	Форм. (2)	0,2
	Сталь Ст3	Уголок	Форм. (2)	0,3

Таблица 2

Теплофизические и электроэрозионные свойства металлов и сплавов

Материал	Теплофизические и электроэрозионные свойства							
образцов	$T_{\pi\pi}$,	a105,	П*1014	λ,	ρ,	С,	c'*106	k_{sp} ,
	°C	м ² /с		Вт/(м·К)	кг/м ³	Дж/(кг•К)	Дж/м3К	мм ³ /А*с
1. Сталь, Ст3	1540	0,81	5,04	39,71	7800	628	4,9	0,39
2. Сталь нержа-	1510	0,55	8,76	26	7900	598	7,9	0,9
веющая 12X18H10T								
3. Алюминиевый сплав Д16	650	9,84	4.9	238	2696	897	2,4	2,94
4. Медь М1	1084	9,6	25,53	354	8950	412	3,7	0,928
5. Титановый сплав ВТ14	1650	0,34	7,6	8,37	4520	544	2,5	0,984
6. Титан ВТ1	1670	0,77	1,73	18,85	4505	540	2,4	2,06

Методика проведения эксперимента

Для исследования влияния полярности включения электродов на коэффициент эрозии были проведены эксперименты в воздушной среде. Испытания проводились с использованием дискового электрода-инструмента изготовленного из низкоуглеродистой стали диаметром 150 мм и толщиной 1,0 мм. Для вращения электрода-инструмента применялась модернизированная пневматическая радиально-шлифовальная ручная машина ИП2020 [23]. Источником постоянного тока служил сварочный выпрямитель ВДУ-506. Для ЭКОиспользовали цилиндрические полые образцы (трубы) из углеродистой стали Ст3 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т. По результатам испытаний произведён расчёт коэффициента эрозии:

$$k_{\rm sp} = m / I, \tag{3}$$

где *m* – производительность обработки, г/с; *I* – сила тока, А.

Результаты исследований

По формуле (3) рассчитан коэффициент эрозии. Значения коэффициента эрозии в зависимости от напряжения и полярности представлены на рис. 1 и 2. В диапазоне тока от 50 до 175 А значение $k_{\rm 3p} = (0,7-0,80) \text{ мм}^3/\text{A*c}$. При электроконтактной резке труб из нержавеющей стали коэффициент эрозии при прямой полярности равен (0,90–1,0) мм³/А*с, при обратной – (0,71–0,83) мм³/А*с, что совпадает с данными табл. 1 и 2.



Рис. 1. Зависимость коэффициента эрозии стальной трубы (Ст3) от напряжения и полярности включения







Fig. 2. Dependence of the erosion coefficient of a steel pipe (12X18H10T) on the voltage and polarity of switching on

Заключение

1. Полярность включения электродов, изготовленных из материала одной марки не влияет на коэффициент эрозии при электроконтактной обработке сталей.

2. Изменение силы тока практически не влияет на коэффициент эрозии.

3. У меди максимальное значение критерия Палатника, однако коэффициент эрозии близок к нержавеющей стали.

4. При прямой полярности включения коэффициент эрозии в значительной степени определяется напряжением подаваемым на электроды.

5. Коэффициент эрозии зависит от объёмной теплоёмкости обрабатываемого металла.

6. Малое значение коэффициента эрозии титанового сплава BT14 по сравнению с титаном BT1 можно объяснить наличием легирующих компонентов в количестве12 %.

Библиографические ссылки

1. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. Т. 2 / под ред. А. М. Дальского, А. Г. Суслова, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. 5-е изд., испр. М. : Машиностроение, 2003. 944 с.

2. Исследование влияния теплообменных процессов на удельные энергозатраты при электроконтактной резке металла / Т. А. Веретнова, И. Я. Шестаков, А. В. Цуканов и др. // Вестник СибГАУ. 2009. № 2. С. 241–246.

3. Zikeev V. N. Métal Scienceand Heat Treatment // Scientific contribution of A. P. Gulyaevto the physical metallurgy of structural steels. 2008. Vol. 50, No. 11–12, P. 518–521.

4. Vitlin V. B. Metallurgist // Electrocontact-abrasive cutting of semifinishe products. Vol. 27. № 8. P. 285–288.

5. Modeling of Heat Exchange Processes under Electrocontact Cutting of Metals / Veretnova T. A., Shestakov I. Ya., Kovaleva A. A. et al. // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: «Техника и технологии». 2013. № 4. С. 455–461.

6. Муравьев Д. В. Перспективы применения контактно-дуговой резки и обработки металлов в промышленности // Сварочное производство. 2001. № 8. С. 33–35.

7. Повышение эффективности электроконтактной резки металла путем применения системы управления / Веретнова Т. А., Царенко А. А., Веретнов А. Г., Шестаков И. Я. // Цветные металлы. 2019. № 9. С. 69–74.

8. Витлин В. Б., Давыдов А. С. Электро-физико-химические методы обработки в металлургическом производстве. М. : Металлургия, 1988. 127 с.

9. Гуткин Б. Г., Григорчук И. П. Электроконтактная обработка металлов. Л. : Машгиз, 1960. 51 с. 10. Пат. 2296653 Российская Федерация, МПК В23Н 5/04. Способ электроконтактной обработки металлических материалов / Шестаков И. Я., Миленин В. Н., Цуканов А. В., № 2005139775/02 ; заявл. 05.01.2001 ; опубл. 10.04.2007. Бюл. №10. 7с.

11. Электротехнический справочник : в 4 т. Т. 1 Общие вопросы. Электротехнические материалы / под общ. ред. профессоров МЭИ В. Г. Герасимова и др. 9-е изд., стер. М. : Издательство МЭИ, 2003. 440 с.

12. Материалы в приборостроении и автоматике : справочник / под ред. Ю. М. Пятина. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1982. 528 с.

13. Волченкова Р. А. Связь между теплосодержанием и физико-механическими и эрозионными характеристиками металлов // Электронная обработка материалов. 1973. № 4. С. 58–62.

14. Волченкова Р. А. Об эрозионном ряде элементов // Электронная обработка материалов. 1976. № 2. С. 45–48.

15. Аронов А. И., Исакова Р. Б., Мороз И. И. Электроэрозионно-химический способ обработки // Электрохимическая размерная обработка металлов. Кишинёв : Штиинца, 1974. 260 с.

16. Немилов Е. Ф. Справочник по электроэрозионной обработке материалов. Л. : Машиностроение, 1989. 164 с.

17. Справочник по электрофизическим и электрохимическим методам обработки / Г. Л. Амитан и др.; под общ. ред. Волосатого, В. А. Л. : Машиностроение, 1988. 719 с.

18. Витлин В. Б. Давыдов А. С. Электрофизические методы обработки в металлургическом производстве. М. : Металлургия, 1979. 160 с.

19. Веселовский С. И., Фролов В. Я., Донской А. В. Электродугоконтактная резка металлов. СПб. : Энергоатомиздат, 1993. 123 с.

20. Повышение эффективности электроконтактной резки дисковым электродом / Н. А. Терёхин, В. И. Душкин, И. Я. Шестаков, В. Н. Миленин // Технология машиностроения. 2002. № 4. С. 9–12. 21. Оценка влияния процессов теплообмена на технологические показатели электроконтактной резки / А. Г. Веретнов, Т. А. Веретнова, И. Я. Шестаков, А. А. Косович // Успехи современного естествознания. 2013. № 11. С. 157–162.

22. Верхотуров А. Д., Подчерняева И. А., Коневцов Л. А. Самсонов Г. В. и Лазаренко Б. Р. – основатели нового научного направления "Материаловедение электродных материалов для электроэрозионной обработки" // Электрические контакты и электроды. Киев : ИПМ НАН Украины. 2010. С. 274–287.

23. Пат. 32019 Российская Федерация, МПК В23Н 5/04 Ручная отрезная машина. / Н. А. Терёхин, В. И. Душкин, И. Я. Шестаков, В. Н. Миленин, А. В. Цуканов. № 2003111656/20 ; заявл. 24.04.2003 ; опубл. 10.09.2003, Бюл. № 13, 5 с.

References

1. *Spravochnik tehnologa-mashinostroitelya* [Handbook of a mechanical engineer]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003, 944 p.

2. Veretnova T. A., Shestakov I. Ya., Tsukanov A. V., Kovaleva A. A., Remizov I. A. [Investigation of the influence of heat exchange processes on specific energy consumption during electrocontact metal cutting]. *Vestnik SibGAU*. 2009, No. 2, P. 241–246 (In Russ.).

3. Zikeev V. N. Métal Scienceand Heat Treatment. *Scientific contribution of A. P. Gulyaevto the physical metallurgy of structural steels*. 2008. Vol. 50, No. 11–12, P. 518–521.

4. Vitlin V. B. Metallurgist. *Electrocontact-abrasive cutting of semifinishe products*. Vol. 27. No. 8. P. 285–288.

5. Veretnova T. A., Shestakov I. Ya., Kovaleva A. A., Tinkova S. M., Kosovich A. A. Modeling of Heat Exchange Processes under Electrocontact Cutting of Metals. *Journal of Siberian Federal University. Series: "Engineering and Technology"*. 2013, No. 4, P. 455–461.

6. Muraviev D. V. [Prospects for the use of contact-arc cutting and metal processing in industry]. *Welding production*, 2001, No. 8, P. 33–35(In Russ.).

7. Veretnova T. A., Tsarenko A. A., Veretnov A. G., Shestakov I. Ya. [Improving the efficiency of electrocontact metal cutting by using a control system]. *Non-ferrous metals*. 2019, No. 9, P. 69–74 (In Russ.).

8. Vitlin V. B., Davydov A. S. *Elektro-phiziko-chivicheskie metodi obrabotki v metalurgicheskom proisvodstve* [Electro-physical-chemical processing methods in metallurgical production]. Moscow, Metallurgy Publ., 1988, 127 p.

9. Gutkin B. G., Grigorchuk I. P. *Elektrokontaktnaya obrabotka metalov* [Electrical contact processing of metals]. Leningrad, Mashgiz Publ., 1960, 51 p.

10. Shestakov I. Ya., Milenin V. N., Tsukanov A. V. *Sposob elektrokontaktnoii obrabotki metalicheskih materialov* [Method for electrocontact processing of metallic materials]. Patent RF, no. 2296653, 2007.

11. Gerasimov V. G. *Elektrotechnicheskii spravochnik. Vol. 1. Elektrotechnicheskie materiali* [Electrotechnical reference book. Vol. 1. General questions. Electrical materials]. Moscow, MEI Publ., 2003, 440 p.

12. Pyatin Yu. M., Chernyavskaya A. M., Vladimirskii R. A. *Materialy v priborostroenii i av-tomatike: spravochnik* [Materials in instrument making and automation: Handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982, 528 p.

13. Volchenkova R. A. [The relationship between the heat content and the physicomechanical and erosional characteristics of metals]. *Electronic processing of materials*. 1973, No. 4, P. 58–62 (In Russ.).

14. Volchenkova R. A. [On the erosional series of elements]. *Electronic processing of materials*. 1976, No. 2, P. 45–48 (In Russ.).

15. Aronov A. I., Isakova R. B., Moroz I. I. [Electro-erosion-chemical method of processing]. *Electrochemical dimensional processing of metals: sbornik nauch. materialov.* Chisinau, Shtiintsa, 1974, P. 124–131 (In Russ.).

16. Nemilov E. F. *Spravochnik po elektrjerozionnoii obrabotke materialov* [Handbook of EDM materials]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1989, 164 p.

17. Amitan G. L., Baiisupov I. A., Baron Yu. M. *Spravochnik po elektrohimicheskim i elektrofisicheskim metodam obrabotki* [Reference book on electrophysical and electrochemical processing methods]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1988, 719 p.

18. Vitlin V. B. Davydov A. S. *Elektrofizicheskie metody v metallurgicheskom proizvodstve* [Electrophysical processing methods in metallurgical production]. Moscow, Metallurgy Publ., 1979, 160 p.

19. Veselovsky S. I., Frolov V. Ya., Donskoy A. V. *Elektrodugokontaktnaya rezka metallov* [Electric arc contact cutting of metals]. Sankt-Peterburg, Energoatomizdat Publ., 1993, 123 p.

20. Terekhin N. A., Dushkin V. I., Shestakov I. Ya., Milenin V. N. [Improving the efficiency of electrocontact cutting with a disk electrode]. *Mechanical engineering technology*. 2002, No 4, P. 9–12 (In Russ.).

21. Veretnov A. G., Veretnova T. A., Shestakov I. Ya., Kosovich A. A. [Assessment of the influence of heat transfer processes on the technological indicators of electrocontact cutting]. *The successes of modern natural science*. 2013, No. 11, P. 157–162 (In Russ.).

22. Verkhoturov A. D., Podchernyaeva I. A., Konevtsov L. A. [Samsonov G. V. and Lazarenko B. R. Founders of a new scientific direction 'Materials science of electrode materials for electrical discharge machining']. *Electrical contacts and electrodes*. Kiev, IPM NAS of Ukraine, 2010, P. 274–287 (In Russ.).

23. Teryokhin N. A., Dushkin V. I., Shestakov I. Ya., Milenin V. N., Tsukanov A. V. *Ruchnaya otreznaya mashina* [Manual cutting machine]. Patent RF, no. 32019, 2003.

© Шестаков И. Я., Шестаков В. И., Ремизов И. А., 2022

Shestakov Ivan Yakovlevich – Dr. Sc., Associate Professor, Professor of the Department of Electronic Engineering and Telecommunications; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: yakovlevish@mail.ru.

Shestakov Vladislav Ivanovich – undergraduate of the Department of Mechanical Engineering Technology; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: pn3vm4t@gmail.com.

Remizov Igor Anatolyevich – Cand. Sc., Associate Professor of the Department of Medical and Biological Physics; Prof. V. F. Voino-Yasenetsky Krasnoyarsk State Medical University. E-mail: rector@krsk.info.

Шестаков Иван Яковлевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электронной техники и телекоммуникаций; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: yakovlevish@mail.ru.

Шестаков Владислав Иванович – магистрант кафедры технологии машиностроения; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: pn3vm4t@gmail.com.

Ремизов Игорь Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры медицинской и биологической физики; Красноярский государственный медицинский университет имени профессора В. Ф. Войно-Ясенецкого. E-mail: rector@krsk.info.

УДК 65.011.56 Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-347-356

Для цитирования: Цифровой двойник для управления совмещенной литейно-прокатной линией / П. Н. Якивьюк, Т. В. Пискажова, А. В. Сальников, П. М. Гофман // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 2. С. 347–356. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-347-356.

For citation: Yakivyuk P. N., Piskazhova T. V., Salnikov A. V., Gofman P. M. [Digital twin for combined casting and rolling line control]. *Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 2, P. 347–356. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-347-356.

Цифровой двойник для управления совмещенной литейно-прокатной линией

П. Н. Якивьюк^{1*}, Т. В. Пискажова¹, А. В. Сальников², П. М. Гофман³

¹Сибирский федеральный университет, Институт цветных металлов и материаловедения Российская Федерация, 660025, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 95 ²ООО «Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр» Российская Федерация, 660111, г. Красноярск, ул. Пограничников, 37, стр. 1 ³Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31 *E-mail: pavelyakivyuk@yandex.ru

При производстве и эксплуатации ракетно-космических установок широко используются различные алюминиевые сплавы, как в конструктивных элементах, так и в линиях связи, электроснабжении.

Параметры операций обработки сплавов должны жестко выдерживаться для исключения брака и получения продукции нужного качества. Технологические процессы обработки металлов в космическом машиностроении содержат такие операции, как литье, прокатка, прессование и могут использовать непрерывные линии расплав – кристаллизация – формоизменение, что предъявляет дополнительные требования к комплексному управлению такой линией.

Целью работы является создание цифрового двойника для управления совмещенным литейнопрокатным комплексом. На основе ранее представленных математических моделей агрегатов и компонентов комплекса (печь, лоток, кристаллизатор, узел прессования, правильно-охладительное устройство, шпули) в программной среде TIA Portalc применением микропроцессорного контроллера S7-1200 разработана программа, которая имитирует изменение параметров как прокатываемого металла, так и устройств литейно-прокатной линии. Представлена структура и пользовательский интерфейс программы. Проведены расчёты параметров технологического цикла при обработке трёх сплавов, которые дают представление о распределении температур и скоростей прокатываемого металла в каждом узле установки.

Программу можно использовать на производстве как для предварительных расчетов обработки различных сплавов с целью подбора нужных управляющих воздействий, так и в ходе процесса в составе действующего АСУТП для уточнения параметров охлаждения и скорости литья.

Ключевые слова: цифровой двойник, литейно-прокатная линия, программная среда TIA Portal, обработка алюминиевых сплавов.

Digital twin for combined casting and rolling line control

P. N. Yakivyuk^{1*}, T. V. Piskazhova¹, A. V. Salnikov², P. M. Gofman³

¹Siberian Federal University, Institute of Nonferrous Metals and Materials Science
 95, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660025, Russian Federation
 ²United Company RUSAL Engineering-Technological Centre LLC
 37/1, Pogranichnikov st., Krasnoyarsk, 660111, Russian Federation
 ³Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
 31, Krasnoiarskii Rabochi prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
 *E-mail: pavelyakivyuk@yandex.ru

In the production and operation of rocket and space installations, various aluminum alloys are widely used, both in structural elements and in communication lines and power supply. The parameters of alloys processing operations must be strictly maintained in order to exclude defects and obtain products of the required quality. Technological processes of metal processing in space engineering include such operations as casting, rolling, pressing and can use continuous melt-crystallizationshape lines, which imposes additional requirements on the integrated control of such a line.

The aim of the work is to create a digital twin to control a combined casting and rolling complex. Based on the previously presented mathematical models of the units and components of the complex (furnace, tray, mold, pressing unit, straightening and cooling device, spools), a program has been developed in the TIA Portal software environment using the S7-1200 microprocessor controller, which simulates the change in parameters of both rolled metal, and devices of the casting and rolling line. The structure and user interface of the program are presented. The calculations of the parameters of the technological cycle in the processing of three alloys were carried out, which give an idea of the distribution of temperatures and speeds of the rolled metal in each unit of the installation.

The program can be used in production both for preliminary calculations of the processing of various alloys in order to select the necessary control actions, and during the process as part of an existing process control system to refine the cooling parameters and casting speed.

Keywords: digital twin, casting and rolling line, TIA Portal software environment, aluminum alloys processing.

Введение

Технология получения готовых изделий при обработке металлов, в особенности длинномерных, является многоцикловой и включает множество промежуточных технологических операций. Эти факторы приводят к высокой себестоимости продукции и, как следствие, к ее низкой конкурентоспособности. В мировой практике металлообработки в последнее время особое развитие приобрели работы, направленные на создание интегрированных мини-производств с реализацией технологий получения изделий из цветных металлов и сплавов по схеме обработки в одной непрерывной линии расплав – кристаллизация – формоизменение [1]. Для этих процессов характерно объединение процессов литья, обработки металлов давлением и термической обработки в единый технологический процесс. Непрерывный процесс позволяет исключить процесс литья крупных слитков, их нагрев и горячую прокатку, что приводит к экономии капитальных затрат и значительному повышению выхода годного. В то же время, такой подход к производству предъявляет дополнительные требования к алгоритмам управления.

Для современного эффективного управления технологиями обработки металлов необходимо создание и использование компьютерных инструментов имитации процессов. Такой инструмент может представлять собой программу для расчета и отображения взаимосвязанных изменений технологических параметров при изменении условий процесса. Имитационные расчеты осуществляются встроенной в программу математической динамической моделью процесса. Опыт применения подобных программ при получении алюминия-сырца описан в работах [2–4].

Моделирование литейно-прокатных установок для задач управления представлено в литературе в ограниченном объёме и направлено на управление параметрами в отдельных узлах (модель натяжения между клетями, регулирование ширины проката и т. п.) [5]. Имеются модели, описывающие тепловое и напряженно-деформированное состояния узла деформации и кристаллизации [1; 6]. Эти модели разрабатывались с целью определения технологических и энергосиловых параметров деформирующего узла для получения полуфабрикатов необходимого качества из алюминия и его сплавов.

Математическая модель, комплексно описывающая взаимосвязанное изменение параметров узлов агрегата совмещенной обработки металла, позволяет рассчитать и визуализировать процесс в каждой точке линии. Программное обеспечение на базе такой модели является виртуальным двойником литейно-прокатной линии и позволяет отладить алгоритмы управления до запуска реального технологического цикла.

Таким образом, создание подобного рода моделей и программ является сложной научнотехнической задачей, до настоящего времени не решённой в полном объёме, что определяет актуальность исследований.

Объект исследования

Объектом исследования является литейно-прокатный комплекс, схематично представленный на рис. 1, и состоящий из: лотка для выливки металла (1), роторного кристаллизатора (2), индукционной печи для нагрева заготовки перед прокаткой (3), прокатной клети (4), охладительно-выпрямительного устройства (5), шпулей для намотки (6).



Рис. 1. Состав литейно-прокатной линии

Fig. 1. Composition of the casting and rolling line

Из печи металл поступает в лоток, который направляет поток расплавленного металла в роторный кристаллизатор. Литейное колесо вращается, охлаждаяи кристаллизуя металл. На выходе из роторного кристаллизатора получается заготовка трапецеидальной формы, которая в зависимости от требований технологического процесса и от сплава поступает в индукционную печь для дополнительного нагрева или сразу в прокатную клеть. В процессе прокатки получается заготовка заданного диаметра, которая через охладительно-выпрямительное устройство поступает на шпули, где происходит намотка. В агрегате имеются две шпули, меняющие друг друга при достижении максимального количества намотанных слоёв катанки. Заправка прутка и смена шпули происходит автоматически.

Разработка цифрового двойника литейно-прокатной линии

Ранее нами разрабатывались и тестировались модели отдельных узлов совмещенных линий литья и прокатки. Так, в работах [7–8] уделялось внимание моделированию процессов в агрегате СЛИПП, рассматривались кристаллизация металла в колесах, охлаждение прутка, намотка на шпули. В работе [9] представлен виртуальный СЛИПП – программа для управления этим агрегатом. В работах [10–11] моделировалось формирование заготовки из жидкого металла в литейном колесе и подбирался расход охлаждающей воды для достижения заданных температур заготовки и предотвращения перегрева колеса. На базе перечисленных работ в ПО TIAPortal[12], на базе контроллера серии S7-1200, разработана программа, реализующая расчёт температуры металла, скоростей металла, а также скоростей вращения каждого агрегата, входящего в состав установки. Блок-схема работы программы представлена на рис. 2.



- Рис. 2. Блок-схема работы программы
 - Fig. 2. Blockdiagramoftheprogram

В библиотеке конструкций и сплавов заданы все теплофизические константы и конструкционные параметры, используемые в модельном расчёте.

А именно: плотность металла (в жидком и твёрдом агрегатных состояниях); теплоёмкость металла (в жидком и твёрдом агрегатных состояниях); плотность и теплопроводность металла из которого состоит кристаллизатор; коэффициенты теплообмена (вода-металл, воздух металл); конструкционные параметры кристаллизатора, прокатной клети, шпули, расстояния между агрегатами установки; шаг по координате *x*; количество итераций расчёта; тепло кристаллизации; коэффициент теплопроводности среды; коэффициент кинематической вязкости; коэффициент температуропроводности среды.

Расход металла, температура выливки металла, температура воды для охлаждения, расход воды для охлаждения, уставка по температуре металла на выходе из узла кристаллизации, водяное охлаждение заготовки после выхода из прокатной клети, угловая скорость вращения узлов установки являются управляющими воздействиями, задаются пользователем программы и впоследствии могут быть изменены.

В каждом узле агрегата рассчитывается температура металла, скорость движения металла, угловая скорость вращения агрегата. В роторном кристаллизаторе рассчитывается также температура самого литейного колеса. Показатели температуры рассчитываются по шагам, реализуя численное решение дифференциального уравнения. В агрегате шпуля идёт непрерывный расчёт времени заполнения прутком одного слоя накопителя, для того чтобы учесть изменения диаметра и корректировать угловую скорость вращения накопителя по мере заполнения его катанкой.

Перед началом расчёта необходимо выбрать литейно-прокатную линию и набор агрегатов, входящих в её состав. После этого указываем программе, какой тип сплава использовать для расчёта. После начала работы программы происходит обращение к библиотеке теплофизических свойств и типоразмеров, откуда берутся используемые в расчёте данные. На следующем шаге пользователю предлагается занести в программу значения управляющих воздействий, либо использовать начальные значения, заданные по умолчанию. Расход металла и угловые скорости вращения взаимосвязаны, поэтому если изменить расход, программа произведёт расчёт угловых скоростей и наоборот. В зависимости от конструктивных особенностей агрегатов, входящих в состав линии, а также значений параметров, заданных пользователем, производится пересчёт скорости металла и температуры металла в каждом из узлов литейно-прокатной линии. Интерфейс программы представлен на рис. 3.

На нём расположены все узлы установки, через которые происходит обработка металла. По каждому узлу в соответствующих полях вывода представлены рассчитанные программой данные о ходе технологического процесса. Для кристаллизатора это температуры металла и самого литейного колеса в нескольких точках, а также расход, заданный пользователем. Для прокатной клети – температура прутка, скорость прутка, угловая скорость вращения клети. Для участка охлаждения – температура прутка в конечной точке узла.

В правом верхнем углу экрана пользователю предлагается выбрать тип литейно-прокатной установки, в нижнем правом углу экрана – агрегаты, которые войдут в состав линии. Программой предусмотрена опция включения и отключения водяного охлаждения прутка после выхода заготовки из прокатной клети. Для агрегата намотки представлены рассчитанные программой данные угловой скорости и количества намотанных слоёв. В правой части окна расположено меню для управления технологическим процессов, где оператор может изменить расход металла, расход воды на охлаждение, начальную температуру выливки, а также выбрать тип сплава. Пользовательский интерфейс позволяет задать желаемую температуру выходящей из роторного кристаллизатора заготовки. Если данная опция активирована соответствующей кнопкой, программа изменяет в заданных пределах расход воды для охлаждения кристаллизатора таким образом, чтобы приблизить текущую температуру выходящей заготовки к указанной пользователем.

351



Рис. 3. Интерфейс программы с расчетом сплава А5Е



Гистограмма температур, расположенная в центральной нижней части интерфейса, показывает рассчитанные значения температуры металла в кристаллизаторе.

Моделирование работы линии прокатки

С помощью разработанной программы были выполнены расчёты параметров всей линии для трёх разных сплавов на основе алюминия, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Сплав	Плотность, кг/м ³	Теплоёмкость, Дж/(кг·К)
A5E	2700	880
АК4	2770	797
АД33	2710	920

Теплофизические константы сплавов

Расчеты проводились при одинаковой скорости литья и одинаковом расходе воды на охлаждение. Результаты расчётов представлены на рис. 3–5.

На рис. 3 приведены расчётные данные сплава A5E. Температура выливки металла – 780 °C, расход металла – 2 т в час. Металл поступает в кристаллизатор (температура выходящей заготовки 475,4 °C), далее в прокатную клеть (температура выходящего прутка 231,4 °C) и через зоны водяного и воздушного охлаждения (температура выходящего прутка 193,8 °C) на накопитель. Расчёт произведён при уровне расхода воды на охлаждение валков 20 м³/ч.

Для технологов важным является распределение температур проходящего металла по длине колеса кристаллизатора, поэтому этот график рассмотрен отдельно на рис. 4, длина шага 0,1 м. В шагах с 5 по 7 происходит кристаллизация и в расчетной схеме выделяется тепло кристаллизации.

На рис. 5 и 6 представлены результаты имитационных расчетов параметров литья и прокатки сплавов АК4, АД33 с такой же скоростью литья и работой системы охлаждения, что и на рис. 3 для сплава А5Е. Видно, что сплав АД33 остывает быстрее.



Рис. 4. Программный расчёт распределения температуры в кристаллизаторесплава A5E Fig. 4. Software calculation of the temperature distribution in the mold of the A5E alloy



Рис. 5. Программный расчёт сплава АК4

Fig. 5. Software calculation of AK4 alloy





Fig. 6. SoftwarecalculationofalloyAD33

В табл. 2 представлены результаты программных расчётов трёх разных сплавов при температуре выливки 780 °С и расходе металла 2 т в час.

Таблица 2

Значения температур металла на выходе из агрегатов

Сплав	Печь, °С	Кристаллизатор, °С	Клеть, °С	Участок охлаждения, °С
A5E	780	503,3	417,3	224,8
AK4	780	493,9	409,8	224,2
АД33	780	474,3	391,8	220,7

В табл. 3 представлены результаты имитационных расчётов параметров литья-прокатки сплаваА5Е при температуре выливки 780 °С и различных значениях расхода металла.

Таблица 3

Значения температур металла на выходе из агрегатов для сплава А5Е

Расход металла, тонны/час	Печь, °С	Кристаллизатор, °С	Клеть, °С	Участок охлаждения, °С
2	780	503,3	417,3	224,8
3	780	559,7	493,7	272,9
1	780	389	266,8	200,5

Заключение

На основе математических моделей в ПО TIA Portal разработана программа, являющаяся цифровым двойником литейно-прокатной линии. Интерфейс программы позволяет включать и отключать работу некоторых агрегатов, тем самым формируя последовательность обработки заготовки, включать и отключать водяное охлаждение, изменять расход металла и расход воды на охлаждение валков. Проведены расчёты параметров технологического цикла при обработке трёх сплавов, которые дают представление о распределении температур и скоростей прокатываемого металла в каждом узле установки. Программу можно использовать на производстве как для предварительных расчетов обработки различных сплавов с целью подбора нужных управляющих воздействий, так и в ходе процесса для уточнения параметров охлаждения и скорости литья.

Библиографические ссылки

1. Сидельников С. Б., Довженко Н. Н., Загиров Н. Н. Комбинированные и совмещённые методы обработки цветных металлов и сплавов : монография. М. : МАКСПресс, 2005. 344 с.

2.Piskazhova T. V., Mann V. C. The Use of a Dynamic Aluminum Cell Model // JOM. 2006. Vol. 58, No. 2, P. 48–52.

3. Пискажова Т. В. Программа-имитатор для поддержки принятия технологических решений при получении алюминия // Автоматизация в промышленности. 2010. № 7. С. 41–44.

4. Multimedia for Training Cell Operators / C. Fradet, B. Bouchard, J. Lapointe, G. Rivard // Light Metals. 2001. P. 387–391.

5. Восканьянц А. А. Автоматизированное управление процессами прокатки. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. 85 с.

6. Прессование алюминиевых сплавов: моделирование и управление тепловыми процессами: монография / Н. Н. Довженко, С. В. Беляев, С. Б. Сидельников и др. // Красноярск : СФУ, 2009. 256 с.

7. Разработка математической модели литейного агрегата СЛИПП, реализующего метод совмещённого литья и прокатки-прессования для производства пресс-изделий из цветных металлов и сплавов / С. Б. Сидельников, Т. В. Пискажова, В. М. Белолипецкий, П. Н. Якивьюк // Металлургия: технологии, управление, инновации, качество : сб. тр. 17 Всеросс. науч.-практ. конф. Новокузнецк, 2013. С. 174–178. 8. Математическая модель процесса совмещённого литья и прокатки-прессования для управления работой агрегата СЛИПП / С. Б. Сидельников, Т. В. Пискажова, В. М. Белолипецкий, П. Н. Якивьюк // Цветные металлы и минералы : сб. докладов VI Междунар. конгресса. Красноярск, 2014. С. 1167–1170.

9. «Виртуальный СЛИПП» – математическая модель для управления агрегатом СЛИПП и её визуализация с помощью программных продуктов Wince 7.0 и Step 7 / С. Б. Сидельников, Т. В. Пискажова, В. М. Белолипецкий и др. // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 2. С. 470–477.

10. Якивьюк П. Н., Пискажова Т. В., Белолипецкий В. М. Математическая модель для управления охлаждением роторного кристаллизатора // Вестник ИрГТУ. 2017. Т. 21, № 9. С. 104–113.

11. Virtual casting and rolling lines development / P. N. Yakiv'yuk, T. V. Piskazhova, V. M. Belolipetskii, G. A. Nesterov // Mechanical and Automation Engineering for Industry 4.0. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, Vol. 537, №3. [Электронный ресурс]. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/537/3/032094/pdf.

12. Siemens. [Электронный pecypc]. URL: https://new.siemens.com/ru/ru/produkty/avtomatizacia/ industry-software/automation-software/tia-portal/programmnoe-obespechenie.html (дата обращения: 27.12.2021).

References

1. Sidelnikov S. B., Dovzhenko N. N, Zagirov N. N. *Kombinirovannye i sovmeshchennye metody obrabotki tsvetnykh metallov i splavov: monografiya* [Combined and combined methods of non-ferrous metals and alloys: a monograph]. Moscow, MAKSPress Publ., 2005, 344 p.

2. Piskazhova T. V., Mann V. C. The Use of a Dynamic Aluminum Cell Model // JOM. 2006, Vol. 58, No. 2, P. 48–52.

3. Piskazhova T. V. [Simulator program to support the adoption of technological decisions in the production of aluminum]. *Automation in industry*. 2010, No. 7, P. 41–44 (In Russ.).

4. Fradet C., Bouchard B., Lapointe J., Rivard G. Multimedia for Training Cell Operators. *Light Metals*. 2001. P. 387–391.

5. Voskan'yants A. A. Avtomatizirovannoe upravlenie protsessami prokatki [Automated management processes rolling]. Moscow, MGTU im. N. E. Baumana Publ., 2010, 85 p.

6. Dovzhenko N. N., Belyaev S. V., Sidelnikova S. B. et al. *Pressovanie alyuminievykh splavov: modelirovanie i upravlenie teplovymi protsessami* [Pressing aluminum alloys: modeling and control of thermal processes]. Krasnoyarsk, SibFU Publ., 2009, 256 p.

7. Sidelnikov S. B., Piskazhova T. V., Belolipetskii V. M., Yakiv'yuk P. N. [Development of a mathematical model of the CCRP casting unit, which implements the method of combined casting and rolling-pressing for the production of press products from non-ferrous metals and alloys]. *Metallur-giya: tekhnologii, upravlenie, innovatsii, kachestvo : sbornik trudov 17 Vseross. nauch.-prakt. konf.* [Metallurgy: technology, management, innovation, quality: Proceedings of the 17th All-Russian Scientific and Practical Conference]. Novokuznetsk, 2013, P. 174–178 (In Russ.).

8. Sidelnikov S. B., Piskazhova T. V., Belolipetskii V. M., Yakiv'yuk P. N. [Mathematical model of the process of combined casting and rolling-pressing to control the operation of the unit of CCRP]. *Tsvetnye metally i mineraly : sbornik dokladov VI mezhdunarodnogo kongressa* [Non-ferrous metals and minerals: collection of reports of the VI International Congress]. Krasnoyarsk, 2014, P. 1167–1170 (In Russ.).

9. Sidelnikov S. B., Piskazhova T. V., Belolipetskii V. M., Yakiv'yukand P. N. et al. Virtual CCRP – a mathematical model for controlling the CCRP unit and its visualization using Wince 7.0 and Step 7 software products. *Vestnik SibGAU*. 2015, Vol. 16, No. 2, P. 470–477 (In Russ.).

10. Yakiv'yuk P. N., Piskazhova T. V., Belolipetskii V. M. [Mathematical model for controlling the cooling of a rotary mold]. *VestnikIrGTU*. 2017, Vol. 21, No. 9, P. 104–113 (In Russ.).
11. Yakiv'yuk P. N., Piskazhova T. V., Belolipetskii V. M., Nesterov G. A. Virtual casting and rolling lines development. *Mechanical and Automation Engineering for Industry 4.0 : IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. Vol. 537, No. 3. Available at: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/537/3/032094/pdf (accessed: 27.12.2021).

12. Siemens. Available at: https://new.siemens.com/ru/ru/produkty/avtomatizacia/industry-software/automation-software/tia-portal/programmnoe-obespechenie.html (accessed: 27.12.2021).

П. Н. Якивьюк, Т. В. Пискажова, А. В. Сальников, П. М. Гофман, 2022

Якивьюк Павел Николаевич – старший преподаватель кафедры автоматизации производственных процессов в металлургии; Сибирский федеральный университет. E-mail: pavelyakivyuk@yandex.ru.

Пискажова Татьяна Валериевна – доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации производственных процессов в металлургии; Сибирский федеральный университет. E-mail: piskazhova@yandex.ru.

Сальников Александр Владимирович – начальник отдела опытных конструкторских работ литейного центра; ООО «Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр». E-mail: aleksandr.salnikov3@rusal.com.

Гофман Павел Михайлович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: gofmanpm@sibsau.ru.

Yakivyuk Pavel Nikolaevich – senior lecturer of the department Automation of production processes in metallurgy; Siberian Federal University. E-mail: pavelyakivyuk@yandex.ru.

Piskazhova Tatyana Valerievna – Dr. Sc., Professorof the department Automation of production processes in metallurgy; Siberian Federal University. E-mail: piskazhova@yandex.ru.

Salnikov Alexander Vladimirovich – head of the experimental design department of the foundry center; United Company RUSAL Engineering-Technological Centre LLC. E-mail: aleksandr.salnikov3@rusal.com.

Gofman Pavel Mikhailovich – Cand. Sc., associate professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: gofmanpm@sibsau.ru.