

ISSN 2712-8970



СИБИРСКИЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

SIBERIAN AEROSPACE JOURNAL

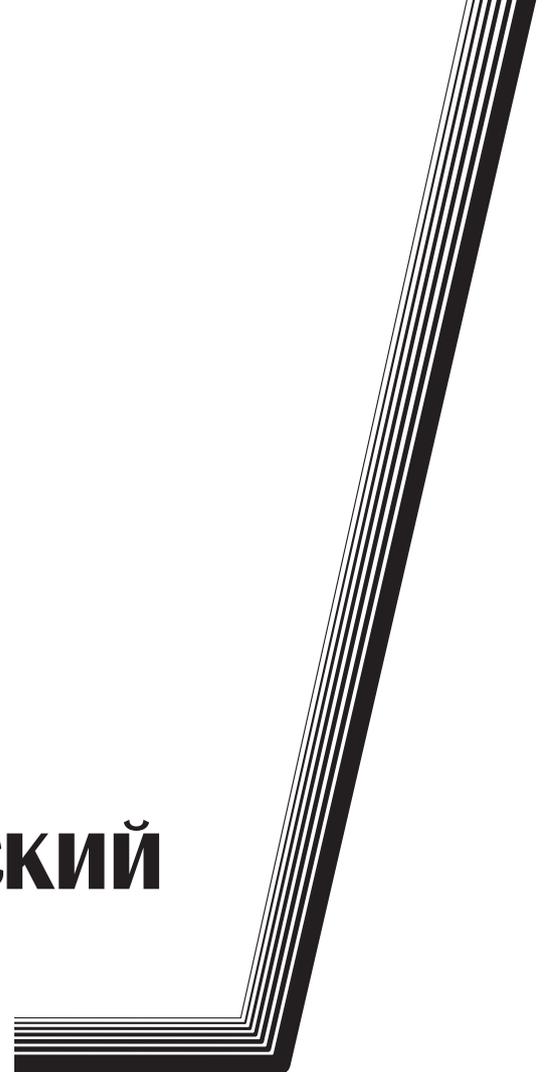
**Том
Vol. 24, № 4**

КРАСНОЯРСК 2023

СИБИРСКИЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том 24, № 4

Красноярск 2023



СИБИРСКИЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том 24, № 4

Главный редактор

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»)

Казаковцев Л. А., доктор технических наук,
профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

Левко В. А., доктор технических наук, доцент
(СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

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

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

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
(ИВМ СО РАН)

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

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

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

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

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

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Васильев С. Н., академик РАН, доктор физико-
математических наук, профессор (Москва)

Дегерменджи А. Г., академик РАН,
доктор физико-математических наук,
профессор (Красноярск)

Дегтерев А. С., доктор технических наук,
профессор (Красноярск)

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 физико-
математических наук, профессор (Красноярск)

Швенкер Ф., доктор наук, профессор
(Институт нейроинформатики Университета Ульма,
Германия)

SIBERIAN AEROSPACE JOURNAL

Vol. 24, No 4

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)

Kazakovtsev L. A., Dr.Sc., Professor

(Reshetnev University)

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)

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)

«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:

1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки);

1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (физико-математические науки);

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);

2.3.7 Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования (физико-математические науки);

2.3.7 Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования (технические науки);

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

2.5.15 Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов (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:

1 раздел. Информатика, вычислительная техника и управление.

2 раздел. Авиационная и ракетно-космическая техника.

3 раздел. Технологические процессы и материалы.

Статьи публикуются бесплатно после обязательного рецензирования и при оформлении их в соответствии с требованиями редакции (www.vestnik.sibsau.ru). Журнал выходит 4 раза в год. Электронная версия журнала представлена на сайте Научной электронной библиотеки (<http://www.elibrary.ru>) и сайте журнала (www.vestnik.sibsau.ru)

При перепечатке или цитировании материалов из журнала «Сибирский аэрокосмический журнал» ссылка обязательна.

Учредитель и издатель

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

АДРЕС РЕДАКЦИИ, УЧРЕДИТЕЛЯ И ИЗДАТЕЛЯ:

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, проспект имени газеты «Красноярский Рабочий», 31.

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

Редактор Н. Н. ГОЛОСКОКОВА
Ответственный редактор английского текста
Н. А. ШУМАКОВА

Оригинал-макет и верстка Л. В. ЗВОНАРЕВОЙ
Подписано в печать 12.12.2023. Формат 70×108/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Усл. печ. л. 17,2.
Уч.-изд. л. 20,0. Тираж 100 экз. Заказ 3395. С 873/23.

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: 20.12.2023. Свободная цена

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:

1.2.2 Mathematical modeling, numerical methods and software packages (technical sciences);

1.2.2 Mathematical modeling, numerical methods and software packages (physical and mathematical sciences);

2.3.1 System analysis, management and information processing (technical sciences);

2.3.5 Mathematical and software support of computer systems, complexes and computer networks (physical and mathematical sciences);

2.3.7 Computer modeling and design automation (physical and mathematical sciences);

2.3.7 Computer modeling and design automation (technical sciences);

2.5.13 Design, construction and production of aircraft (technical sciences);

2.5.15 Thermal, electric rocket engines and power installations of aircraft (technical sciences).

Each issue consists of three parts:

Part 1. Informatics, computer technology and management.

Part 2. Aviation and Spacecraft Engineering.

Part 3. Technological Processes and Material Science.

Papers prepared in accordance with the editorial guidelines (www.vestnik.sibsau.ru) are published free of charge after being peer reviewed.

The journal is published four times a year.

An online version can be viewed at <http://www.elibrary.ru>

Siberian Aerospace Journal should be cited when reprinting or citing materials from the journal.

CONTACTS. Website: www.vestnik.sibsau.ru

Address: Reshetnev Siberian State University of Science and Technology.

31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation.

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

Editor N. N. GOLOSOKOVA
Executive editor (English Language) N. A. SHUMAKOVA
Layout original L. V. ZVONAREVA

Signed (for printing): 12.12.2023. Format 70×108/16.
Offset Paper. Print flat. 17,2. Published sheets 20,0.
100 copies. Order 3395. С 873/23.

Printing and Publication Department
Reshetnev University.

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

31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk,
660037, Russian Federation.

Date of publication: 20.12.2023. Free price

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел 1. ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Вайнштейн В. И., Вайнштейн И. И., Сафонов К. В. Решение интегрального уравнения для средней стоимости восстановлений в теории надежности технических систем	628
Гончаров А. Е., Гончарова Е. А. Интерпретация и обработка данных гидролокатора бокового обзора с целью автоматизации данного процесса	639
Каткова В. П., Вяхирев В. А., Кринталь А. Н. Математическое моделирование автокомпенсационных устройств	652
Кононов Д. Д., Исаев С. В. Анализ киберугроз корпоративной сети на основе параллельной обработки данных NETFLOW	663
Кузнецов А. А., Кузнецова А. С., Кишкан В. В. Алгоритм быстрого умножения элементов в 2-группах на основе полиномов Жегалкина	673

Раздел 2. АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Акбулатов Э. Ш., Назаров В. П., Герасимов Е. В. Исследование характеристик ракетного двигателя малой тяги, изготовленного методом аддитивной SLM-технологии	682
Бакланов А. В. Влияние особенностей конструкции камер сгорания двигателей НК-16СТ, НК-16-18СТ на содержание углекислого газа в продуктах сгорания	697
Гусев Е. В., Заговорчев В. А., Родченко В. В., Садретдинова Э. Р., Шипневская Е. А. Расчёт параметров и характеристик вращающегося лунного реактивного пенетратора	706
Подкопаев И. А., Подкопаев А. В., Должиков В. И. Математическая модель теплофизического нагружения малокалиберного артиллерийского ствола с вариантной дискретизацией полупелых слоев расчетной области	717

Раздел 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

Серегин Ю. Н., Мурыгин А. В., Курашкин С. О. Моделирование технологических параметров электронно-лучевой сварки для изделий ракетно-космической техники	738
Трифонов С. В., Тихомиров А. А., Мурыгин А. В. Автоматизированная система очистки жидких продуктов переработки отходов для замкнутых экосистем космического назначения	751
Шестаков И. Я., Шестаков В. И., Трифанов И. В., Ремизов И. А. Удельные энергозатраты электро-контактно-химической обработки металлов вибрирующим инструментом в электролите	760

CONTENTS

Part 1. INFORMATICS, COMPUTER TECHNOLOGY AND MANAGEMENT

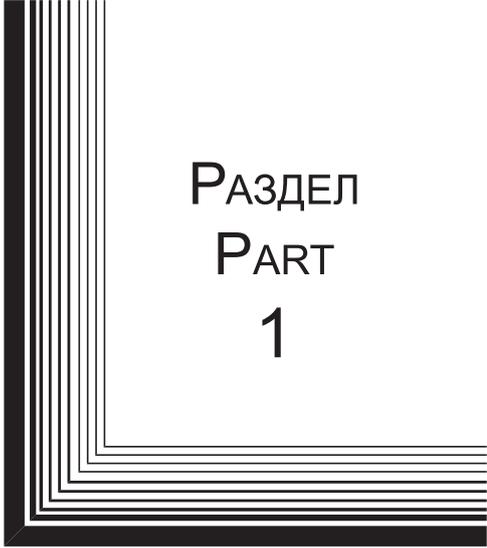
Vainshtein V. I., Vainshtein I. I., Safonov K. V. Solution of the integral equation for the average cost of restoration in the theory of reliability of technical systems	628
Goncharov A. E., Goncharova E. A. Interpreting and processing side-scan sonar data with the objective of further automation	639
Katkova V. P., Vyakhirev V. A., Krintal A. N. Mathematical modeling of autocompensation devices	652
Kononov D. D., Isaev S. V. Analysis of corporate network cyber threats based on parallel processing of Netflow data	663
Kuznetsov A. A., Kuznetsova A. S., Kishkan V. V. An algorithm for fast multiplication of elements in 2-groups based on the Zhegalkin polynomials	673

Part 2. AVIATION AND SPACECRAFT ENGINEERING

Akbulatov E. Sh., Nazarov V. P., Gerasimov E. V. Characteristics research of a low thrust rocket engine manufactured using additive SLM technology	682
Baklanov A. V. Concentration of carbon dioxide in products of combustion of GTE NK-16ST and NK-16-18ST	697
Gusev E. V., Zagovorchev V. A., Rodchenko V. V., Sadretdinova E. R., Shipnevskaya E. A. Calculation of the parameters and characteristics of a rotating lunar jet penetrator	706
Podkopaev I. A., Podkopaev A. V., Dolzhikov V. I. Mathematical model of thermophysical loading of a small-caliber artillery barrel with variant discretization of half-integer layers of the computational domain	717

Part 3. TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIAL SCIENCE

Seregin Yu. N., Murygin A. V., Kurashkin S. O. Modeling of technological parameters of electron beam welding for rocket and space technology products	738
Trifonov S. V., Tikhomirov A. A., Murygin A. V. Automated system for cleaning liquid waste products for closed ecosystems for space purposes	751
Shestakov I. Ya., Shestakov V. I., Trifanov I. V., Remizov I. A. Specific energy consumption of electro-contact-chemical treatment of metals with a vibrating tool in the electrolyte	760



РАЗДЕЛ
PART
1



ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPUTER TECHNOLOGY
AND MANAGEMENT



УДК 519.248

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-628-638

Для цитирования: Вайнштейн В. И., Вайнштейн И. И., Сафонов К. В. Решение интегрального уравнения для средней стоимости восстановлений в теории надежности технических систем // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 4. С. 628–638. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-628-638.

For citation: Vainshtein V. I., Vainshtein I. I., Safonov K. V. [Solution of the integral equation for the average cost of restoration in the theory of reliability of technical systems]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 4, P. 628–638. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-628-638.

Решение интегрального уравнения для средней стоимости восстановлений в теории надежности технических систем

В. И. Вайнштейн^{1*}, И. И. Вайнштейн¹, К. В. Сафонов²

¹Сибирский федеральный университет

660041, Российская Федерация, 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: vvaynshtyayn@sfu-kras.ru

Отказы элементов при работе технических и многих других систем имеют, как правило, случайный характер. Это приводит к различным моделям процесса восстановления, изучаемым в теории вероятностей и математической теории надежности. В процессе восстановления отказавшие элементы восстанавливаются или заменяются на новые, при этом часто происходит изменение стоимостей и качества восстанавливаемых элементов (функций распределения наработок до отказа).

В работе рассматривается функция затрат (средняя стоимость восстановления) в процессе восстановления порядка (k_1, k_2) , в котором по определенному правилу изменяются стоимости каждого восстановления и функции распределения наработок.

Учитывая, что функция восстановления (среднее число отказов) хорошо изучена в теории надежности, получено решение интегрального уравнения для функции затрат через функцию восстановления рассматриваемой модели.

Для процесса восстановления порядка (k_1, k_2) получена формула вычисления функции затрат через функцию восстановления простого процесса, образованного сверткой всех функций распределения периодической части. Для практического применения получены явные формулы функции затрат при процессе восстановления, у которого периодическая часть распределена по экспоненциальному закону или закону Эрланга порядка t с одним и тем же показателем α .

Полученные формулы могут быть использованы для изучения свойств функции затрат и решения оптимизационных задач в стратегиях проведения процесса восстановления в терминах «цена», «качество», «риск», если, например, за качество принимать среднее число отказов, за цену – среднюю стоимость восстановлений, за риск – дисперсию числа отказов или стоимости восстановлений.

Ключевые слова: модели процесса восстановления, функция восстановления, функция затрат, распределение Эрланга.

Solution of the integral equation for the average cost of restoration in the theory of reliability of technical systems

V. I. Vainshtein^{1*}, I. I. Vainshtein¹, K. V. Safonov²

¹Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: vvaynshtyayn@sfu-kras.ru

Failures of elements during the operation of technical and many other systems are, as a rule, random in nature. This leads to various models of the recovery process, studied in probability theory and mathematical reliability theory. During the restoration process, failed elements are restored or replaced with new ones, and there is often a change in the costs and quality of the restored elements (time-to-failure distribution functions).

The work examines the cost function (average cost of restoration) in the process of restoration of order (k_1, k_2) , in which, according to a certain rule, the costs of each restoration and the distribution functions of operating time change.

Considering, that the recovery function (average number of failures) is well studied in reliability theory, a solution to the integral equation for the cost function is obtained through the recovery function of the model under consideration.

For the order restoration process (k_1, k_2) , a formula is obtained for calculating the cost function through the restoration function of a simple process formed by the convolution of all distribution functions of the periodic part. For practical application, explicit formulas are obtained for the cost function during the restoration process, in which the periodic part is distributed according to an exponential law or an Erlang law of order m with the same exponent α .

The resulting formulas can be used to study the properties of the cost function and solve optimization problems in strategies for carrying out the restoration process in terms of price, quality, risk, if, for example, the average number of failures is taken as quality, the average cost of restorations as price, the dispersion of the number of failures as the risk, or cost of restoration.

Keywords: recovery process models, recovery function, cost function, Erlang distribution.

Введение

В математической теории надежности при изучении процессов восстановления в первую очередь рассматриваются числовые характеристики, связанные со случайным числом отказов и случайной стоимостью восстановлений, например, среднее и дисперсия числа отказов и стоимости восстановлений, через которые определяются различные критерии оптимальности проведения стратегий восстановления.

В работе рассматриваются модели процесса восстановления (X_i, c_i) , $i = 0, 1, \dots$ с учетом стоимости восстановлений. Здесь X_i – случайные наработки с функциями распределения $F_i(t)$ элементов от $i-1$ -го до i -го отказа; c_i – стоимости i -х восстановлений; c_0 – стоимость элемента, установленного в начальный момент времени $t = 0$, $F_0(t) = 0$ при $t < 0$, $F_0(t) = 1$ при $t \geq 0$ [1–4].

Пусть $N(t)$ – количество отказов (восстановлений); $C(t)$ – стоимость восстановлений за время от 0 до t :

$$C(t) = \sum_{i=0}^{N(t)} c_i,$$

$$P(N(t) = n) = F^{(n)}(t) - F^{(n+1)}(t),$$

$F^{(n)}(t)$ – n -кратная свертка функций распределения $F_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, n$,

$$F^{(n)}(t) = (F^{(n-1)} * F_n)(t) = \int_0^t F^{(n-1)}(t-x) dF_n(x) \quad F^{(1)}(t) = F_1(t).$$

Для них [1; 2]: $H(t)$ – функция восстановления (среднее число отказов)

$$H(t) = E(N(t)) = \sum_{n=1}^{\infty} F^{(n)}(t),$$

$S(t) = E(C(t))$ – функция затрат (среднее значение стоимости восстановлений)

$$S(t) = E(C(t)) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n F^{(n)}(t).$$

При эксплуатации качества ($F_i(t)$) восстановленных элементов и стоимости (c_i) восстановлений могут отличаться. Это приводит к различным моделям процесса восстановления [1; 3; 5–9].

В работе рассматривается процесс восстановления с учетом стоимости на восстановления порядка (k_1, k_2) , у которого функции распределения и стоимости восстановлений удовлетворяют условию: $F_i(t) = F_j(t)$ и $c_i = c_j$, если индексы $i, j \geq k_1$ при делении на k_2 дают одинаковые остатки [1; 3; 8; 9].

В рассматриваемом процессе после первых $k_1 - 1$ восстановлений начинается периодический процесс порядка k_2 .

Отметим, что в случае $k_1 = 1$ имеем периодический процесс восстановления порядка k_2 , а если $k_2 = 1$, процесс восстановления порядка k_1 .

Если $F_i(t)$ совпадают ($F_i(t) = F_1(t)$, $i \geq 1$), или совпадают, начиная с номера $i = 2$ ($F_i(t) = F_2(t)$, $i \geq 2$), имеем хорошо изученные в теории надежности простой (обычный) и общий (запаздывающий) процессы восстановления.

Отметим, что для рассматриваемой модели функция восстановления $H(t)$ хорошо изучена. Разработаны численные методы ее нахождения, и для многих законов распределения, характерных для теории надежности, имеются ее явные представления [1; 6].

Для нахождения функции затрат $S(t)$ имеются интегральные уравнения [1; 2; 10].

Целью работы является получение решения интегрального уравнения для функции затрат $S(t)$ в виде интегрального представления через функцию восстановления $H(t)$. Такое представление будет удобным для ее изучения и вычисления в различных теоретических и прикладных задачах теории надежности.

Представление функции затрат через функцию восстановления

Запишем интегральное уравнение для функции затрат $S(t)$ [1; 2]

$$S(t) = G(t) + \int_0^t S(t-x) d\Phi^{(k_2)}(x) \tag{1}$$

при $k_1 > 1$,

$$G(t) = c_0 \left(1 - \Phi^{(k_2)}(t) \right) + \sum_{n=1}^{k_1+k_2-1} c_n F^{(n)}(t) - \sum_{n=1}^{k_1-1} c_n \int_0^t F^{(n)}(t-x) d\Phi^{(k_2)}(x),$$

при $k_1 = 1$,

$$G(t) = c_0 \left(1 - \Phi^{(k_2)}(t) \right) + \sum_{n=1}^{k_2} c_n F^{(n)}(t),$$

где $\Phi^{(k_2)}(t) = (\Phi_1 * \Phi_2 * \dots * \Phi_{k_2})(t)$ – свертка всех функций распределения $\Phi_i(t) = F_{k_1-1+i}(t)$, $i = 1, 2, \dots, k_2$. Функции $\Phi_i(t)$ задают периодическую часть процесса восстановления.

Пусть $HF(t)$ – функция восстановления простого процесса, $HFG(t)$ – функция восстановления общего процесса, образованного первой функцией распределения $F(t)$ и следующими $G(t)$.

Далее [1; 6]

$$HFG(t) = F(t) + \int_0^t HFG(t-x) dG(x). \quad (2)$$

В уравнении (1) сделаем замену

$$S(t) = V(t) + c_0 + \sum_{n=1}^{k_1-1} c_n F^{(n)}(t). \quad (3)$$

Получаем

$$\begin{aligned} V(t) + c_0 + \sum_{n=1}^{k_1-1} c_n F^{(n)}(t) &= c_0 \left(1 - \Phi^{(k_2)}(t) \right) + \sum_{n=1}^{k_1-1} c_n F^{(n)}(t) + \sum_{n=k_1}^{k_1+k_2-1} c_n F^{(n)}(t) - \\ &- \sum_{n=1}^{k_1-1} c_n \int_0^t F^{(n)}(t-x) d\Phi^{(k_2)}(x) + \int_0^t \left(V(t-x) + c_0 + \sum_{n=1}^{k_1-1} c_n F^{(n)}(t-x) \right) d\Phi^{(k_2)}(x). \end{aligned}$$

Отсюда, для нахождения функции $V(t)$, получаем интегральное уравнение

$$V(t) = \sum_{n=k_1}^{k_1+k_2-1} c_n F^{(n)}(t) + \int_0^t V(t-x) d\Phi^{(k_2)}(x). \quad (4)$$

Сделаем замену

$$V(t) = \left(\sum_{n=k_1}^{k_1+k_2-1} c_n \right) V_1(t). \quad (5)$$

Уравнение (4) переписется в виде

$$V_1(t) = Q(t) + \int_0^t V_1(t-x) d\Phi^{(k_2)}(x), \quad (6)$$

$$Q(t) = \frac{\sum_{n=k_1}^{k_1+k_2-1} c_n F^{(n)}(t)}{\sum_{n=k_1}^{k_1+k_2-1} c_n}. \quad (7)$$

Заметим, что $\Phi^{(k_2)}(t)$ и $Q(t)$ являются функциями распределения, $\Phi^{(k_2)}(t)$ как свертка функций распределения наработок, а $Q(t)$ – смесь функций распределения.

Сравнивая уравнения (6) и (2), получаем, что уравнение (6) определяет функцию восстановления $HQ\Phi^{(k_2)}(t)$ общего процесса, задаваемого первой функцией распределения $Q(t)$, второй и последующими $\Phi^{(k_2)}(t)$.

Таким образом,

$$V_1(t) = HQ\Phi^{(k_2)}(t), \quad (8)$$

и с учетом (3), (5), (7), (8)

$$S(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{k_1-1} c_n F^{(n)}(t) + \left(\sum_{n=k_1}^{k_1+k_2-1} c_n \right) HQ\Phi^{(k_2)}(t). \quad (9)$$

Учитывая (2),

$$HQ\Phi^{(k_2)}(t) = Q(t) + \int_0^t H\Phi^{(k_2)}(t-x) dQ(x), \quad (10)$$

формула (9) запишется в виде

$$S(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{k_1-1} c_n F^{(n)}(t) + \sum_{n=k_1}^{k_1+k_2-1} c_n \left(Q(t) + \int_0^t H\Phi^{(k_2)}(t-x) dQ(x) \right),$$

или с учетом (10)

$$S(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{k_1+k_2-1} c_n F^{(n)}(t) + \sum_{n=k_1}^{k_1+k_2-1} c_n \int_0^t H\Phi^{(k_2)}(t-x) dF^{(n)}(x). \quad (11)$$

Получили, что вычисление функции затрат сводится к вычислению конечного числа сверток функций распределения и нахождению функции восстановления $H\Phi^{(k_2)}(t)$ простого процесса восстановления, образованного функцией распределения $\Phi^{(k_2)}(t)$, или функции восстановления $HQ\Phi^{(k_2)}(t)$.

При практической реализации полученных формул (9), (10), (11) можно использовать численные и аналитические методы вычисления сверток и функций восстановления, рассмотренные в [1; 11]. Также отметим, что полученные формулы дают возможность изучать свойства функции затрат и рассматривать различные оптимизационные задачи по стратегиям проведения процесса восстановления в терминах «цена», «качество», «риск». Если, например, за качество принимать среднее число отказов, за цену – среднюю стоимость восстановлений, за риск – дисперсии числа отказов или стоимости восстановлений [1; 12–15].

Данная работа является продолжением работы [11]. Можно отметить, что теоремы об асимптотическом поведении функции затрат, полученные в [11], значительно проще получаются с использованием полученной формулы представления функции затрат (9).

Функция затрат при простом процессе восстановления с экспоненциальным распределением

Рассмотрим процесс восстановления, у которого изменяются только стоимости восстановлений c_i по закону $c_i = c_j$, если индексы $i, j \geq k_1$ при делении на k_2 дают одинаковые остатки. Это соответствует распространенному случаю, когда при отказах происходят полные восстановления, но стоимости восстановлений изменяются, например, изменяется только цена элемента.

Пусть наработки элементов распределены по экспоненциальному закону $F(t) = 1 - e^{-\alpha t}$, $t \geq 0$. Для этого случая получим расчетные формулы для вычисления функции затрат.

Учитывая, что n -кратная свертка функций распределения независимых случайных величин является функцией распределения их суммы и распределение Эрланга порядка n является распределением суммы n случайных величин, распределенных по экспоненциальному закону, заключаем, что для рассматриваемого случая

$$F^{(n)}(t) = F_{e,n}(t) = 1 - e^{-\alpha t} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\alpha t)^i}{i!} \quad dF^{(n)}(x) = dF_{e,n}(x) = e^{-\alpha x} \alpha \frac{(\alpha x)^{n-1}}{(n-1)!} dx,$$

$$\Phi^{(k_2)}(t) = F_{e,k_2}(t), H\Phi^{(k_2)}(t) = HF_{e,k_2}(t),$$

$F_{e,n}(t)$ – распределение Эрланга порядка n и [1; 6]

$$HF_{e,k_2}(t) = \frac{1}{k_2} \left(\alpha t + \sum_{k=1}^{k_2-1} \frac{c^k}{1-c^k} \left(-e^{-\alpha(1-c^k)} \right) \right), c = e^{\frac{2\pi i}{k_2}} = \cos\left(\frac{2\pi}{k_2}\right) + i \sin\left(\frac{2\pi}{k_2}\right), \quad (12)$$

$$HF_{e,k_2}(t) = \frac{1}{k_2} \left(\alpha t - \frac{k_2-1}{2} + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{k_2-1} \frac{e^{-\alpha \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi k}{k_2}\right)\right)} \sin\left(\alpha t \sin\left(\frac{2\pi k}{k_2}\right) + \frac{\pi}{k_2} k\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{k_2} k\right)} \right).$$

Теперь, в соответствии с (11)

$$S(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{k_1+k_2-1} c_n F_{e,n}(t) + \sum_{n=k_1}^{k_1+k_2-1} c_n \frac{\alpha^n}{(n-1)!} \int_0^t HF_{e,k_2}(t-x) e^{-\alpha x} x^{n-1} dx. \quad (13)$$

Учитывая (12), интегралы, входящие в формулу (13) при вычислении $S(t)$, вычисляются в явном виде. Так [16]

$$\int (e^{\beta x} x^n dx = \frac{e^{\beta t}}{\beta} \left(t^n + \sum_{j=1}^n (-1)^j \frac{n(n-1)\dots(n-j+1)}{\beta^j} t^{n-j} \right) + C.$$

Подставляя

$$I(\beta, n)(t) = \int_0^t (e^{\beta x} x^n dx = \frac{e^{\beta t}}{\beta} t^n + \sum_{j=1}^n (-1)^j \frac{n(n-1)\dots(n-j+1)}{\beta^j} t^{n-j} \Big) + (-1)^{n+1} \frac{n!}{\beta^{n+1}}$$

в (13), получаем

$$\begin{aligned} S(t) &= c_0 + \sum_{n=1}^{k_1+k_2-1} c_n F_{e,n}(t) + \\ &+ \frac{1}{k_2} \sum_{n=k_1}^{k_1+k_2-1} \left(c_n \frac{\alpha^n}{(n-1)!} (\alpha I(-\alpha, n-1)(t) - \alpha I(-\alpha, n)(t) + \right. \\ &\left. + \sum_{k=1}^{k_2-1} \frac{c^k}{1-c^k} \left(I(-\alpha, n-1)(t) - e^{-\alpha(1-c^k)t} I(-\alpha c^k, n-1)(t) \right) \right). \end{aligned} \quad (14)$$

Выделяем действительную часть в (14):

$$1 - c^k = -2ie^{\frac{\pi k i}{k_2}} \sin\left(\frac{\pi k}{k_2}\right), \sum_{k=1}^{k_2-1} \frac{c^k}{1-c^k} = \frac{i}{2} \sum_{k=1}^{k_2-1} c \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{k_2} k\right) - \frac{k_2-1}{2}$$

$$\operatorname{Re} \sum_{k=1}^{k_2-1} \frac{c^k}{1-c^k} = \operatorname{Re} \sum_{k=1}^{k_2-1} \frac{e^{\frac{2\pi k i}{k_2}} e^{\frac{\pi k i}{k_2}}}{-2i \sin\frac{\pi k}{k_2}} = \frac{1-k_2}{2}$$

$$\sum_{k=1}^{k_2-1} \frac{c^k}{1-c^k} e^{-\alpha(1-c^k)t} I(-\alpha c^k, n-1)(t) =$$

$$\begin{aligned}
 &= \sum_{k=1}^{k_2-1} \left(\frac{c^k}{1-c^k} e^{-\alpha(1-c^k)t} \frac{e^{-\alpha c^k t}}{-\alpha c^k} (t^{n-1} + \right. \\
 &+ \sum_{j=1}^{n-1} 1 \binom{n-1}{j} \frac{(n-1)\dots(n-j)}{(-\alpha)^j c^{kj}} t^{n-1-j} \left. \right) + \left(-1 \right)^n \frac{(n-1)!}{(-\alpha)^n c^{kn}} = \\
 &= -\frac{1}{\alpha} \sum_{k=1}^{k_2-1} \frac{e^{-\alpha t}}{1-c^k} \left(t^{n-1} + \sum_{j=1}^{n-1} \frac{(n-1)\dots(n-j)}{\alpha^j} e^{-\frac{2\pi i}{k_2} kj} t^{n-1-j} \right) + \\
 &+ \frac{(n-1)!}{\alpha^n} \sum_{k=1}^{k_2-1} \frac{c^{-k(n-1)} e^{-\alpha(1-c^k)t}}{1-c^k} = \\
 &= -\frac{i}{2\alpha} \sum_{k=1}^{k_2-1} \frac{e^{-\alpha t} e^{\frac{\pi k}{k_2} i}}{\sin \frac{\pi k}{k_2}} \left(t^{n-1} + \sum_{j=1}^{n-1} \frac{(n-1)\dots(n-j)}{\alpha^j} e^{-\frac{2\pi i}{k_2} kj} t^{n-1-j} \right) + \\
 &+ \frac{(n-1)! i}{2\alpha^n} \sum_{k=1}^{k_2-1} \frac{e^{\frac{\pi k}{k_2} i}}{\sin \frac{\pi k}{k_2}} e^{-\frac{2\pi k(n-1)}{k_2} i} e^{-\alpha t} e^{\alpha t \cos \frac{2\pi k}{k_2}} e^{\alpha t \sin \frac{2\pi k}{k_2} i} = \\
 &= -\frac{i}{2\alpha} \sum_{k=1}^{k_2-1} \frac{e^{-\alpha t} e^{\frac{\pi k}{k_2} i}}{\sin \frac{\pi k}{k_2}} \left(t^{n-1} + \sum_{j=1}^{n-1} \frac{(n-1)\dots(n-j)}{\alpha^j} e^{-\frac{2\pi i}{k_2} kj} t^{n-1-j} \right) + \\
 &+ \frac{(n-1)! i}{2\alpha^n} \sum_{k=1}^{k_2-1} \frac{e^{-\alpha t \left(1 - \cos \frac{2\pi k}{k_2}\right)} e^{\left(\alpha t \sin \frac{2\pi k}{k_2} - \frac{\pi k(2n-1)}{k_2}\right) i}}{\sin \frac{\pi k}{k_2}} .
 \end{aligned}$$

Отсюда

$$\begin{aligned}
 &Re \left(\sum_{k=1}^{k_2-1} \frac{c^k}{1-c^k} e^{-\alpha(1-c^k)t} I(-\alpha c^k, n-1)(t) \right) = \\
 &= -\frac{1}{2\alpha} \sum_{k=1}^{k_2-1} e^{-\alpha t} t^{n-1} - \frac{e^{-\alpha t}}{2\alpha} \sum_{k=1}^{k_2-1} \frac{1}{\sin \left(\frac{\pi k}{k_2} \right)} \sum_{j=1}^{n-1} \frac{(n-1)\dots(n-j)}{\alpha^j} \operatorname{in} \left(\frac{\pi k(2j+1)}{k_2} \right) t^{n-1-j} - \\
 &- \frac{(n-1)!}{2\alpha^n} \sum_{k=1}^{k_2-1} \frac{e^{-\alpha t \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi k}{k_2} \right)\right)} \sin \left(\alpha t \sin \left(\frac{2\pi k}{k_2} \right) - \frac{\pi k(2n-1)}{k_2} \right)}{\sin \left(\frac{\pi k}{k_2} \right)} .
 \end{aligned}$$

Запишем формулу функции затрат

$$S(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{k_1+k_2-1} c_n F_{e,n}(t) +$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{k_2} \sum_{n=k_1}^{k_1+k_2-1} \epsilon_n \frac{\alpha^n}{(n-1)!} \left(\alpha t + \frac{1-k_2}{2} \right) I(-\alpha, n-1)(t) - \alpha I(-\alpha, n)(t) + \\
 & + \frac{1}{2\alpha} \sum_{k=1}^{k_2-1} e^{-\alpha t} t^{n-1} + \frac{e^{-\alpha t}}{2\alpha} \sum_{k=1}^{k_2-1} \frac{1}{\sin\left(\frac{\pi k}{k_2}\right)} \sum_{j=1}^{n-1} \frac{(n-1)\dots(n-j)}{\alpha^j} \sin\left(\frac{\pi k(2j+1)}{k_2}\right) t^{n-1-j} + \\
 & + \frac{(n-1)! \sum_{k=1}^{k_2-1} e^{-\alpha t \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi k}{k_2}\right)\right)} \sin\left(\alpha t \sin\left(\frac{2\pi k}{k_2}\right) + \frac{\pi k(2n-1)}{k_2}\right)}{2\alpha^n \sum_{k=1}^{k_2-1} \sin\left(\frac{\pi k}{k_2}\right)}.
 \end{aligned}$$

Рассмотрим еще функцию затрат при процессе восстановления порядка (k_1, k_2) , когда все наработки периодической части процесса распределены по закону Эрланга порядка m с параметром α .

Пусть $\Phi_j(t) = F_{e,m,\alpha}(t)$. Найдем $H\Phi^{(k_2)}(t)$. Запишем интегральные уравнения для $HF_{e,m,\alpha}(t)$, $H\Phi^{(k_2)}(t)$

$$HF_{e,m,\alpha}(t) = F_{e,m,\alpha}(t) + \int_0^t HF_{e,m,\alpha}(t-x) dF_{e,m,\alpha}(x), \quad (15)$$

$$H\Phi^{(k_2)}(t) = \Phi^{(k_2)}(t) + \int_0^t H\Phi^{(k_2)}(t-x) d\Phi^{(k_2)}(x). \quad (16)$$

Пусть

$$F^*(s) = \int_0^\infty e^{-st} dF(x)$$

Преобразование Лапласа – Стильеса функции $F(x)$ [1; 6]. Учитывая $F_{e,m,\alpha}^*(s) = \left(\frac{\alpha}{s+\alpha}\right)^m$,

$(F_i^* F_j^*)^*(s) = F_i^*(s) F_j^*(s)$, из (15), (16) получаем

$$H^* F_{e,m,\alpha}(s) = \left(\frac{\alpha}{s+\alpha}\right)^m + H^* F_{e,m,\alpha}(s) \left(\frac{\alpha}{s+\alpha}\right)^m, \quad (17)$$

$$H^* \Phi^{(k_2)}(s) = \left(\frac{\alpha}{s+\alpha}\right)^{mk_2} + H^* \Phi^{(k_2)}(s) \left(\frac{\alpha}{s+\alpha}\right)^{mk_2}. \quad (18)$$

Сравнивая (17), (18), заключаем, что

$$H\Phi^{(k_2)}(t) = HF_{e,mk_2,\alpha}(t).$$

Получили, что функция восстановления простого процесса восстановления, образованного k_2 кратной сверткой распределений Эрланга порядка m с параметром α , является функцией восстановления простого процесса восстановления, образованного распределением Эрланга порядка mk_2 с тем же параметром α .

Имеем

$$\begin{aligned}
 HF_{e,mk_2,\alpha}(t) &= \frac{1}{mk_2} \left(\alpha t + \sum_{k=1}^{mk_2-1} \frac{c^k}{1-c^k} \left(-e^{-\alpha t(1-c^k)} \right) \right), \\
 c &= e^{\frac{2\pi}{mk_2} i} = \cos\left(\frac{2\pi}{mk_2}\right) + i \sin\left(\frac{2\pi}{mk_2}\right),
 \end{aligned}$$

$$HF_{e,mk_2,\alpha}(t) = \frac{1}{mk_2} \left(\alpha t - \frac{mk_2 - 1}{2} + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{mk_2-1} \frac{e^{-\alpha t \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi}{mk_2} k\right)\right)} \sin\left(\alpha t \sin\left(\frac{2\pi}{mk_2} k\right) + \frac{\pi}{mk_2} k\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{mk_2} k\right)} \right).$$

Теперь в соответствии с (11)

$$S(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{k_1-1} c_n F^{(n)}(t) + \sum_{n=k_1}^{k_1+k_2-1} c_n \int_0^t F^{(k_1-1)}(t-x) dF_{e,mn,\alpha}(x) + \sum_{n=k_1}^{k_1+k_2-1} c_n \int_0^t HF_{e,mk_2,\alpha}(t-x) e^{-\alpha x} \alpha \frac{(\alpha x)^{mn-1}}{(mn-1)!} dx. \tag{19}$$

Интеграл

$$\int_0^t HF_{e,mk_2,\alpha}(t-x) e^{-\alpha x} \alpha \frac{(\alpha x)^{mn-1}}{(mn-1)!} dx$$

в (19) вычисляется аналогично предыдущему примеру с заменой k_2 на mk_2 и n на mn .

Еще отметим, если дополнительно $F_i(t) = F_{e,l,\beta}(t)$, $i = 1, 2, \dots, k_1 - 1$, то $F^{(n)}(t) = F_{e,nl,\beta}(t)$, $n = 1, 2, \dots, k_1 - 1$, и в соответствии с (19)

$$S(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{k_1-1} c_n F_{e,nl,\beta}(t) + \sum_{n=k_1}^{k_1+k_2-1} c_n \int_0^t F_{e,(k_1-1)l,\beta}(t-x) dF_{e,mn,\alpha}(x) + \sum_{n=k_1}^{k_1+k_2-1} c_n \int_0^t HF_{e,mk_2,\alpha}(t-x) e^{-\alpha x} \alpha \frac{(\alpha x)^{mn-1}}{(mn-1)!} dx.$$

Заключение

Важнейшие показатели работы технических и многих других систем являются случайными величинами [17]. Это, например, время работы восстановленных элементов до отказа, число отказов и стоимость восстановления в процессе восстановления. В математической теории надежности при изучении процессов восстановления в первую очередь рассматриваются числовые характеристики этих величин, например, среднее и дисперсия числа отказов и стоимости восстановлений, через которые определяются различные критерии оптимальности стратегий восстановления.

Учитывая, что функция восстановления для рассматриваемой модели хорошо изучена, в работе получено решение интегрального уравнения для функции затрат через функцию восстановления простого процесса, задаваемого сверткой всех функций распределения периодической части. В качестве практического примера получены явные формулы функции затрат при процессе восстановления, у которого периодическая часть распределена по экспоненциальному закону или закону Эрланга порядка m с одним и тем же показателем α .

Отметим, что полученные формулы дают возможность изучать свойства функции затрат и рассматривать различные оптимизационные задачи в стратегиях проведения процесса восстановления в терминах «цена», «качество», «риск». Если, например, за качество принимать среднее число отказов, за цену – среднюю стоимость восстановлений, за риск – дисперсии числа отказов или стоимости восстановлений.

Еще отметим, что наряду с полученными формулами для вычисления функции затрат будут важны и предельные теоремы для стоимости восстановлений (как случайной величины), аналогичные для числа отказов [3], а также нахождение дисперсии стоимости восстановлений в рассматриваемых моделях.

Библиографические ссылки

1. Вайнштейн И. И. Процессы и стратегии восстановления с изменяющимися функциями распределения в теории надежности. Красноярск : СФУ, 2016. 189 с.
2. Шмидт О. О. Обобщенная модель процесса восстановления в теории надежности использования информационных технологий : дис. ... канд. ф.-м. н. Красноярск. 2008. 125 с.
3. Булинская Е. В., Соколова А. И. Асимптотическое поведение некоторых стохастических систем хранения // Современные проблемы математики и механики. 2015. Т. 10, вып. 3. С. 37–62.
4. Боровков А. А. Обобщенные процессы восстановления. М. : РАН, 2020. 455 с.
5. Кокс Д. Р., Смит В. Л. Теория восстановления. М. : Советское радио. 1967. 300 с.
6. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. М. : Радио и связь, 1988. 189 с.
7. Боровков А. А. Теория вероятностей. М. : Либроком, 2009. 652 с.
8. Bulinskaya E. V. Limit theorems for generalized renewal processes // Theory of Probability and its Applications. 2018. Vol. 62, No. 1. P. 35–54.
9. Вайнштейн И. И., Вайнштейн В. И., Вейсов Е. А. О моделях процессов восстановления в теории надежности // Вопросы математического анализа : сб. науч. тр. Красноярск, 2003. С. 78–84.
10. Вайнштейн В. И., Вайнштейн И. И., Сафонов К. В. Асимптотика поведения средней стоимости восстановлений в моделях процессов восстановления // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, №4. С. 582–592.
11. Вайнштейн В. И. Функция восстановления при распределении элементов технических систем как смесь функций распределения // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 6. С. 48–49.
12. Вайнштейн В. И., Вайнштейн И. И. Дисперсия стоимости восстановлений и оптимизационные задачи в процессах восстановления технических и информационных систем // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2021. Т. 9, № 2 (33) [Электронный ресурс]. URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=931>. DOI: 10.26102/2310-6018/2021.33.2.001.
13. Vainshtein V. I., Vainshtein I. I. Optimization problems in forming a mixture of distribution functions of operating times to failure of elements of technical systems // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2021. Т. 50, № 3. С. 274–279.
14. Каштанов В. А., Медведев А. И. Теория надежности сложных систем. М. : Физматлит, 2010. 608 с.
15. Песчанский А. И. Полумарковские модели профилактики ненадежной одноканальной системы обслуживания с потерями. Сер. Научная мысль, 2022. 267 с.
16. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М., 1963. 1108 с.
17. Надежность технических систем / Е. В. Сугак, Н. В. Василенко, Г. Г. Назаров и др. Красноярск : МГП «Раско», 2001. 608 с.

References

1. Vainshtein I. I. *Protsessy i strategii vosstanovleniia s izmeniaiushchimisia funktsiiami raspredeleniia v teorii nadezhnosti* [Processes and recovery strategies with changing distribution functions in reliability theory]. Krasnoyarsk, 2016, 189 p.
2. Shmidt O. O. *Obobshchennaia model' protsessa vosstanovleniia v teorii nadezhnosti ispol'zovaniia informatsionnykh teznologii. Dis. kand.* [Generalized model of the recovery process in the theory of reliability of using information technologies. Diss. cand.]. Krasnoyarsk. 2008. 125 c.
3. Bulinskaya E. V., Sokolova A. I. [Asymptotic behavior of some stochastic storage systems]. *Sovremennye problemy matematiki i mekhaniki*. 2015, Vol. 10, No. 3, P. 37–62 (In Russ.).
4. Borovkov A. A. *Obobshchennye protsessy vosstanovleniia* [Generalized recovery processes]. Moscow, RAS Publ., 2020, 455 p.

5. Cox D. R., Smith V. L. *Teoriia vosstanovleniia* [Theory of restoration]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1967, 189 p.
6. Baikhel't F., Franken P. *Nadezhnost' i tekhnicheskoe obsluzhivanie. Matematicheskii podkhod* [Reliability and maintenance. Mathematical approach]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1988, 189 p.
7. Borovkov A. A. *Teoriia veroiatnostei* [Theory of Probability]. Moscow, Librocom Publ., 2009, 652 p.
8. Bulinskaya E. V. Limit theorems for generalized renewal processes. *Theory of Probability and its Applications*. 2018, Vol. 62, No. 1, P. 35–54.
9. Vainshtein I. I., Vainshtein V. I., Veysov E. A. [On models of recovery processes in reliability theory]. *Voprosy matematicheskogo analiza. Sbornik nauchnykh trudov*. Krasnoyarsk, 2003, P. 78–84 (In Russ.).
10. Vainshtein V. I., Vainshtein I. I., Safonov K. V. [Asymptotic behavior of the average cost of restoration in models of restoration processes]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 4. P. 582–592 (In Russ.).
11. Vainshtein V. I. [Reconstruction function for the distribution of elements of technical systems as a mixture of distribution functions]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2018, No. 6, P. 48–49 (In Russ.).
12. Vainshtein V. I. [Modeling, optimization and information technologies]. *Modelirovanie, optimizatsiia i informatsionnye tekhnologii*. 2021, Vol. 9, No. 2(33). Available at: <https://moitvivi.ru/journal/pdf?id=931>. DOI: 10.26102/2310-6018/2021.33.2.001 (In Russ.).
13. Vainshtein V. I., Vainshtein I. I. Optimization problems in forming a mixture of distribution functions of operating times to failure of elements of technical systems. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2021, Vol. 50, No. 3, P. 274–279.
14. Kashtanov V. A., Medvedev A. I. *Teoriia nadezhnosti slozhnykh sistem* [Theory of reliability of complex systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010, 608 p.
15. Peschanskii A. I. *Polumarkovskie modeli profilaktiki nenadezhnoi odnokanal'noi sistemy obsluzhivaniia s poteriami* [Semi-Markov models for the prevention of an unreliable single-channel service system with losses]. 2022, 267 p.
16. Gradshteyn I. S., Ryzhik I. M. *Tablitsy integralov, summ, riadov i proizvedenii* [Tables of integrals, sums, series and products]. Moscow, 1963, 1108 p.
17. Sugak E. V. et al. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem* [Reliability of technical systems]. Krasnoyarsk, Rasko Publ., 2001, 608 p.

© Вайнштейн В. И., Вайнштейн И. И., Сафонов К. В., 2023

Вайнштейн Виталий Исаакович – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой информационной безопасности; Сибирский федеральный университет. E-mail: vvaynshtyaun@sfu-kras.ru.

Вайнштейн Исаак Иосифович – кандидат физико-математических наук, доцент, профессор кафедры ПМиКБ; Сибирский федеральный университет. E-mail: isvain@mail.ru.

Сафонов Константин Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: safonovkv@rambler.ru.

Vainshtein Vitaly Isaakovich – Cand. Sc., associate professor, Head of the Department of Information Security; Siberian Federal University. E-mail: vvaynshtyaun@sfu-kras.ru.

Vainshtein Isaak Iosifovich – Cand. Sc., professor, Department of Applied Mathematics and Computer Security; Siberian Federal University. E-mail: isvain@mail.ru.

Safonov Konstantin Vladimirovich – Dr. Sc., Associate Professor, Head of the Department of Applied Mathematics; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: safonovkv@rambler.ru.

УДК 556

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-639-651

Для цитирования: Гончаров А. Е., Гончарова Е. А. Интерпретация и обработка данных гидролокатора бокового обзора с целью автоматизации данного процесса // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 4. С. 639–651. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-639-651.

For citation: Goncharov A. E., Goncharova E. A. [Interpreting and processing side-scan sonar data with the objective of further automation]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 4, P. 639–651. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-639-651.

Интерпретация и обработка данных гидролокатора бокового обзора с целью автоматизации данного процесса

А. Е. Гончаров*, Е. А. Гончарова

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

*E-mail: goncharovae@sibsau.ru

Одним из наиболее эффективных средств дистанционного зондирования и визуализации подводных объектов являются гидроакустические приборы, в частности гидролокатор бокового обзора (ГБО). В последнее время, во многом, благодаря появлению доступных бюджетных образцов, география и сфера применения данного прибора существенно расширилась. Однако, несмотря на достигнутые успехи в части совершенствования и минимизации аппаратной части ГБО, используемые программные средства остаются, в целом, на базовом уровне, обеспечивая, главным образом, простую визуализацию донной среды и ее запись с целью дальнейшей постобработки. Опыт эксплуатации ГБО показывает, что основная проблема интерпретации акустических изображений заключается в самих физических особенностях их получения. Следует признать бесперспективными попытки осуществления автоматизированной интерпретации образов методами, применяемыми для оптических сред. В настоящей работе рассматриваются теоретические и прикладные аспекты процесса интерпретации и обработки данных ГБО с целью дальнейшей автоматизации данного процесса. С учетом условий эксплуатации данного прибора, в частности обширные площади акваторий – поисковых зон, настоящая проблема является одной из ключевых для операторов ГБО. Проблема автоматизации обработки данных напрямую связана с проблемой интерпретации данных дистанционного зондирования, в том числе космоснимков, геометрического искажения образов, вызванного физическими особенностями прибора и среды его эксплуатации, а также привязки полученных данных к системе спутниковых координат.

Ключевые слова: гидролокатор бокового обзора, автоматизация, распознавание образов, спутниковые системы позиционирования, геометрическое искажение.

Interpreting and processing side-scan sonar data with the objective of further automation

A. E. Goncharov*, E. A. Goncharova

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

*E-mail: goncharovae@sibsau.ru

One of the most effective tools of remote sensing and visualization of underwater surfaces and objects are acoustic devices, in particular side-scan sonars (SSS). Recently, largely due to the emergence of affordable devices, the geography and scope of application of this device has been significantly expanded. Meanwhile, despite certain progress achieved in terms of improving and minimizing the SSS hardware, the software used remains, in general, at a basic level, providing the operator mainly with a simple tool for visualizing benthic environments and data recording for further post-processing. Existing experience in SSS exploitation reveals that the key issue of interpreting acoustic images lies in the physical essence of their acquisition. Arguably, attempts to implement methods of automated interpretation of optical images have no perspective. Hence, the objective of this paper is to provide a theoretical and practical background of SSS data interpretation and processing. A layout for the potential automation of this process is provided with the objective of eliminating human operation in the process of conducting survey and search operations. The authors consider the conditions of SSS exploitation including special attention to such issues as the vastness of search areas, which, as argued is the key problem of data and data pattern recognition. SSS image recognition is an issue relevant for a wide range of academic topics such as geometric distortion, image recognition, and navigation satellite system target localization.

Keywords: side-scan sonar, automation, image recognition, patterns, satellite target localization, geometric distortion.

Введение

Гидролокатор бокового обзора (ГБО) является эффективным средством подводного дистанционного зондирования, обеспечивающего высокую степень визуализации донной поверхности различного типа водоемов, существенно превосходя оптические средства. Данный прибор используется для проведения широкого спектра гидрологических исследований, от геоморфологических до археологических, а также для выполнения прикладных задач в области гидрографии, гидротехнического проектирования и строительства, поиска и фиксации подводных объектов. Развитие ГБО технологий и производство компактных и в то же время бюджетных образцов существенно расширило его эксплуатационные характеристики в части увеличения количества пользователей и расширения условий его применения. Миниатюризация ГБО позволила включать его в качестве одного из компонентов любительских эхолотов, доступных на рынке рекреационных приборов: они могут успешно использоваться даже одним оператором с борта маломерного судна (вопросу применения данного подвида ГБО посвящены специальные работы [1–4]).

В научной литературе проблеме разработки программного обеспечения (ПО) ГБО систем уделено существенно меньше внимания, чем их аппаратной части. Так, например, фундаментальный труд британского ученого Филлипа Блонделя [5] почти полностью посвящен физическим особенностям работы и применения ГБО. Это объясняется тем, что именно физические параметры аппарата (чем выше частота, тем детальнее визуализация) отвечают за качество данных. Кроме того, для правильной интерпретации изображений необходимо учитывать особенности распространения звуковых волн в воде, отражающие способности донных объектов и другие явления гидроакустики. Так, тренированный оператор знает, например, что темные участки изображения представляют собой более мягкие, дисперсные поверхности, а светлые – наоборот твердые и плотные, дающие более сильный отражающий сигнал. Таким образом, пользователи аппаратуры зачастую сосредоточены на совершенствовании аппаратной части ГБО, а не его ПО. Следует отметить, что установленное по умолчанию ПО вполне отвечает требованиям основной массы пользователей данного прибора: поиск объектов и изучение местности ведутся главным образом *in situ*, что вполне допустимо при небольших акваториях. Проприетарные программы (Scanline Starfish, Reefmaster, Humminbird и др.) вполне удовлетворяют пользователя возможностями просмотра изображений в реальном времени, записи, а также встроенными функциями постобработки.

При этом следует указать на отсутствие на рынке эффективного и доступного ПО, позволяющего осуществлять автоматизированное определение обнаруженных подводных объектов,

осуществлять их классификацию и каталогизацию, а также в автоматизированном режиме проводить расчет телеметрических данных, поступающих с прибора. Решению этих вопросов уделено внимание настоящей работы.

Проблема визуализации ГБО сонограмм рассмотрена в [2–6], однако в этих работах главное внимание уделено не столько вопросам создания нового ПО, сколько использования существующего. Так, визуализация полевого материала осуществлена по методу, предложенному в [3–5] для сонограмм, полученных рекреационным ГБО.

В силу своих физических особенностей, данные, полученные ГБО, не могут быть разобраны в рамках существующих алгоритмов распознавания образов для оптических изображений. Принцип работы ГБО, как и иных приборов акустической визуализации, заключается в обработке отраженных звуковых лучей от поверхности объектов (рис. 1). Находясь в надире, трансдюсер изучает тонкий направленный акустический луч в сторону дна водоема, затем принимает отраженное эхо. Блок обработки данных обрабатывает принятый сигнал и выводит его в качестве изображения на монитор оператора. При этом физическая идентичность данного принципа работ с ультразвуковыми медицинскими аппаратами, а также аппаратами неразрушающего контроля не должны создавать обманчивое впечатление о возможности использования их методов обработки данных в гидроакустике. Это связано, в первую очередь, с совершенно разными условиями эксплуатации данной технологии. Вышеперечисленные приборы используются в непосредственном контакте с изучаемым объектом, в то время как ГБО могут эксплуатироваться в диапазонах от одного метра до несколько тысяч метров. Особенности и характер изучаемых объектов в рамках проведения диагностики относительно известен, в то время как на дне водоемов могут находиться самые разные, порой непредсказуемые, объекты как природного, так и антропогенного происхождения. Наконец, объем данных, генерируемых ГБО, представляет значительные объемы.

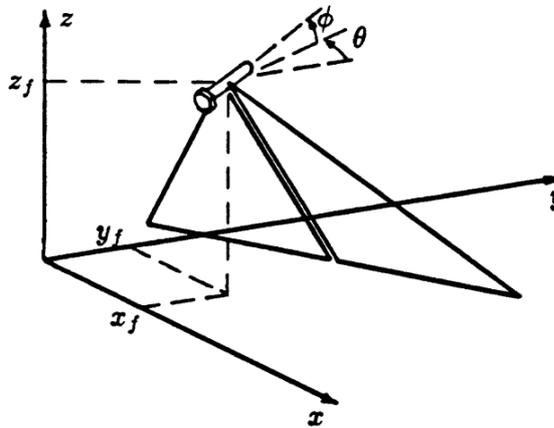


Рис. 1. Принцип формирования ГБО изображения и положение трансдюсера (x_f, y_f, z_f) : ϕ – угол атаки; θ – угол рыскания. Сост. по [7]

Fig. 1. Principles of SSS image formation. The position of transducer is denoted by (x_f, y_f, z_f) : its pitch angle by ϕ , its yaw angle by θ . Based on [7]

Проблема визуализации данных ГБО

Системы ГБО позволяют получать изображение водной среды путем преобразования значительной амплитуды собственного акустического сигнала, отраженного от объектов, в последовательные ряды пикселей, составляющие изображение дна водоема. Таким образом, данная система, измеряя амплитуду сигнала, переводит значения в тон пикселей будущего изображения. Жесткие и плотные объекты отражают больше сигнала гидролокатора, чем мягкие и рыхлые. Следовательно, по тону или цвету пикселя можно строить предположения о залегающем объекте. Существуют и другие факторы, влияющие на тональность пикселей на конечном изо-

бражении: характеристики самого водного объекта (состав воды, ее плотность, температура), параметры проведения сканирования – диапазон сканирования (ширина полосы сканирования) и частота испускаемого звукового сигнала, маршрут съемки, скорость движения трансдюсера и другие источники, возникновение и влияние которых не всегда возможно предвидеть и предотвратить, например, различные скорости водных потоков на поверхности и под водой, термоклины, метеорологические условия (осадки, атмосферное давление) и другие факторы. Учитывая, что устойчивость гидросферы зависит от совокупности фиксированных факторов как естественного, так и антропогенного происхождения [8], накопление сведений о состоянии дна водных объектов является важнейшей задачей не только для выработки стратегии хозяйственной эксплуатации водных ресурсов, но и для создания географических информационных систем с использованием ГБО данных. Таким образом, интерпретация человеком оператором ГБО изображений строится на совокупности знания факторов и их причин, влияющих на работу прибора, персонального опыта, а также параметров и настроек аппаратуры.

Рассмотрим в качестве примера фрагмент обследования нескольких участков реки Енисей в верхнем и нижнем течении (глубины 3–15 м). В ходе работ использовался ГБО Starfish 990F (производитель фирма Tritech), работающий на постоянной частоте 1 МГц и предназначенный для проведения работ на глубинах до 30 м. На рис. 2 отображены подводные объекты, а также характеристики водного пространства.

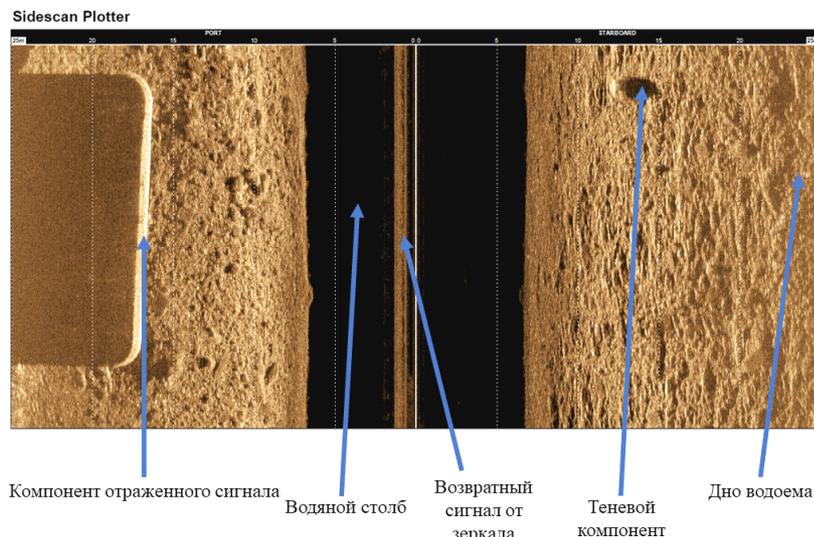


Рис. 2. Фрагмент отснятого прохода ГБО (ширина прохода 50 м) района поиска с элементами снимка

Fig. 2. A fragment of the SSS scanline (overall breadth of 50 m) showing the main elements of the image

На изображении отсутствует береговая линия, поскольку проход совершен на расстоянии более 25 м от берега. В левой половине изображения прослеживается четкая геометрическая форма железобетонного гидротехнического сооружения, причем акустический луч проходит через сооружение, толщина которого составляет около 5 м. Изображение четкое и светлое. Это обеспечено равномерностью прохода (галса), а также наличием каменисто-галечного дна, обеспечивающего наиболее сильный возвратный сигнал. На дне хорошо визуализируются крупные валуны, фрагменты строительных материалов. В середине изображения отчетливо видны следы отраженной звуковой волны от зеркала водоема. Данный эффект возникает при двойном отражении сигнала, сперва от дна водоема, затем от зеркала, что обусловлено выбором острых углов атаки сигнала при малых глубинах водоема. По мере увеличения значений глубины на изображении данные теряют четкость. Хотя ГБО не определяет глубину, ее можно рассчитать по

ширине теневой области в центре изображения, отображающую водяной столб под трансдюсером. Здесь может находиться рыба, плавающий мусор, различные взвеси. Таким образом, можно произвести грубую оценку уровня загрязнения воды крупными частицами. Изменения глубин на всем маршруте съемки значительны – наблюдаются как мелкие участки, глубина которых до 2 м, так и крупные углубления с глубиной более 8 м. По большей части, материал дна однородный, предположительно мелкодисперсный камень. У самого уреза воды каменные образования увеличиваются в размерах.

Исходя из вышесказанного, видно, что при небольшой площади акватории при небольших глубинах (до 10 м), а также при возможности строить правильную равномерную траекторию движения, изображения получают высококачественные, поддающиеся простой интерпретации, а также не нуждающиеся в автоматизации. Однако, в силу своих физических особенностей, сонограммы ГБО подвержены искажениям в любом случае, будь то искажения интенсивности сигнала ГБО (вызвано отклонениями идеального линейного соотношения между интенсивностью изображения и обратным рассеиванием сигнала) или геометрические искажения (вызваны несоответствиями между относительным расположением свойств на изображении и истинным положением объекта на дне) [7].

Геометрические искажения донных объектов

Одной из ключевых проблем является геометрическое искажение подводных объектов. Изображение с ГБО представляет собой монохромное цифровое изображение с нанесенными на него возвратными акустическими сигналами, отраженными от донных объектов. Для математического описания данного преобразования необходимо ввести трехмерную систему прямоугольных координат (x, y, z) донной поверхности и двухмерную прямоугольную координатную систему (m, n) на сонограмме. Основной проблемой формирования изображений является неустойчивость положения трансдюсера, которой может менять направление движения в различных плоскостях. Изменения скорости движения трансдюсера, резкое заглубление или всплытие, колебания углов атаки или рыскания приводят к существенным искажениям снимка. Так, на рис. 3 наблюдаются искривления всех объектов в правую сторону изображения, что вызвано резким изменением движения галса трансдюсера. Антропогенная конструкция по левому борту искажена и приобрела характерную «скрученную» форму.

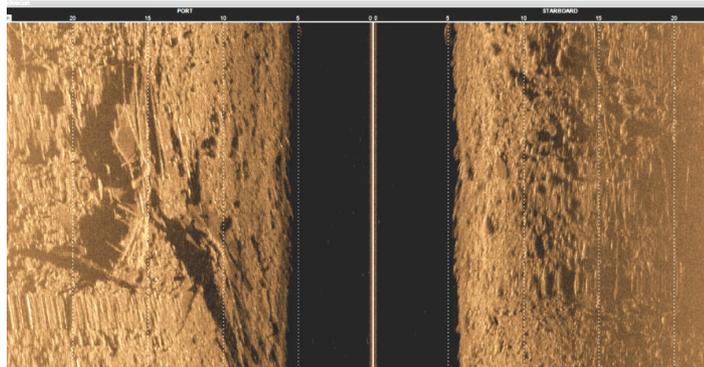


Рис. 3. Пример геометрических искажений донных объектов

Fig. 3. Example of SSS geometric distortion caused by irregularity of vessel movement

Одним из наиболее эффективных способов решения проблемы геометрического искажения является комплекс методов на основе сочетания метода наименьших квадратов (расширенный и рекурсивный идентификатор) и использования эффективного рекурсивного фильтра, например, фильтра Кальмана, представлен в работах [7; 9]. Основной заслугой разработчиков данного подхода является возможность производить автокоррекцию изображений без дополнитель-

ных навигационных или полевых данных. Предложенный метод подходит для изображений с высоким разрешением (частоты 100 КГц и выше), что полностью соответствует нашим примерам. Данный подход не требует навигационной информации и не полагается на коррекцию изображения путем определения наклонной дальности.

Рассмотрим одну из математических моделей геометрических искажений, предложенную в [7]. Представим абсолютное положение точек донной поверхности $(x_s[m, n], y_s[m, n])$ в качестве функции значений параметров положения трансдюсера относительно фиксированных координат (x, y, z) (см. рис. 1). В случае если значения измеряемых параметров можно было бы получать непосредственно с датчиков, установленных на трансдюсере, достаточно было бы их подставить под известный набор уравнений для получения координат донных точек, а затем произвести поправку геометрических искажений для получения правильного изображения. К сожалению, по выше обозначенным причинам, осуществить непосредственную привязку подводных объектов к системе GNSS не представляется возможным. Для оценки изменений в параметрах позиционирования буксируемого трансдюсера необходимо извлечь из сонограммы некоторые значения геометрических искажений.

Оценка геометрических искажений изображений требует выдвижения ряда предположений о нем. Базовое предположение, позволяющее получить размер геометрического искажения, заключается в том, что двухмерная функция обратного рассеивания является произвольным процессом с изотропной автокорреляционной функцией. Предположение о постоянстве функции обратного рассеивания может оказаться ошибочным в случае присутствия значительного разнообразия рельефа донной поверхности, его геоморфологии. Однако данная методика вполне может быть применена для коррекции гидроакустических изображений, если предварительно разбить исследуемую поверхность на однородные районы согласно их морфологии. В этом случае можно предположить определенную степень постоянства. В то же время, предположение об изотропии правомерно в случае отсутствия системного направления донных объектов (направление течения, геология, преобладающее направление волн и др.).

Таким образом, если предположить, что функция обратного рассеивания является постоянной, а функция ее автокорреляции – изотропной, степень геометрического искажения гидроакустического изображения может быть рассчитана путем измерения изменений формы образца автокорреляционной последовательности небольших участков изображения. Оценка локальных геометрических преобразователей может быть выполнена для двух изображений по методу, представленному в [10]. В связи с тем, что исследуемая среда не является изотропической, параметры будут определены на локальном уровне. После выполнения анализа ГБО изображений, происходит автоматическая компенсация скорости сбора данных. Так, фактор скорости (основной фактор искажения) более не нужен для выполнения ходового сканирования. В случае использования данного метода, геометрическое преобразование определенного объекта в шкалярном факторе равно нулю при нулевом значении угла вращения для каждого выявленного объекта.

Корректировки изображения могут быть получены в ходе проведения изысканий. Так, реальное расстояние до донного объекта от трансдюсера может быть посчитано, используя простую формулу

$$x = \sqrt{y^2 - h^2},$$

где x – реальное расстояние до объекта; y – расстояние, указанное на изображении с ГБО; h – высота трансдюсера в надире. Хотя данная проблема более актуальна для буксируемых трансдюсеров, ее следует учитывать и при эксплуатации фиксированных устройств, поскольку каждая точка сонограммы имеет условную привязку к географической системе координат, рассчитываемых в зависимости от удаленности точки от бортового GNSS приемника.

При обработке сонограмм, область акустической тени может быть удалена посредством программ графической редакции, соединив таким образом видимые зоны по оба борта судна

в одно изображение. При этом ширина тени по одному борту представляет условное расстояние от нижней точки трансдюсера до дна водоема.

Немаловажным является выбор траектории движения гидрографического судна. Существует несколько типовых способов покрытия заданной акватории, однако для ГБО подходит тип меандр, выполняемый последовательностью взаимообратных параллельных галсов [11].

Результаты коррекции изображений на основе методов, представленных выше, можно увидеть на рис. 4.

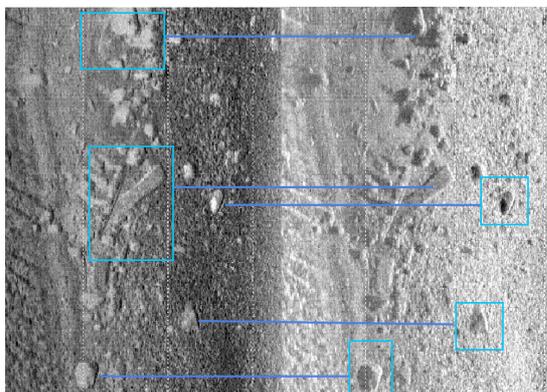


Рис. 4. Результаты коррекции изображения с ГБО

Fig. 4. Results of corrected SSS image

Построение ГБО мозаики и распознавание акустических изображений

Сонограмма и ее описание не является конечным продуктом гидроакустического исследования. Сонограмма может быть использована как основной источник при составлении карт водных объектов или в качестве дополнительного источника информации в случае исследования конкретного объекта, находящегося в толще воды или залегающего на дне водоема. Пример построения мозаики ГБО для снимков представлен в работах [2–4; 6], однако они выполнены с использованием рекреационных эхолотов, для которых существует коммерческое картографическое ПО. Starfish Scanline не обладает функцией построения трека маршрута, равно как и его дальнейшего нанесения на карту. В [12] нами осуществлялась привязка сонограммы ГБО к космоснимку Landsat-8 (рис. 5). Работа была выполнена в программном пакете Quantum GIS.

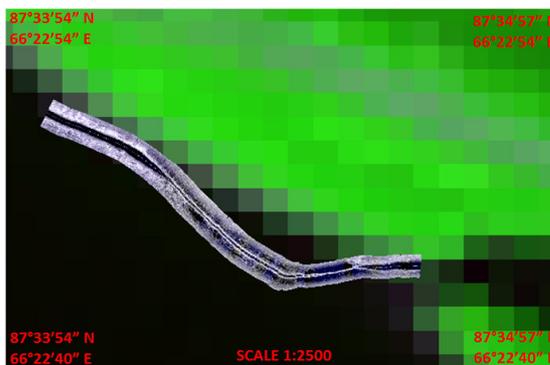


Рис. 5. Построение ГБО мозаики, наложенной на космический снимок Landsat-8

Fig. 5. SSS mosaic transferred to a Landsat-8 satellite image

Сонограмма гидролокатора представляет собой файл с расширением LogDoc – стандартный формат файлов для StarFish, который визуализируется программным обеспечением производителя прибора Starfish Scanline. ПО предлагает несколько способов извлечения данных – непо-

средственно готовая сонограмма и так называемые «сырые данные», представляющие собой таблицу с занесенными в нее параметрами. Мы воспользовались функцией извлечения готовой сонограммы. Таким образом, файл сонограммы был поделен на 43 равномерных фрагмента, представляющих собой детали большой мозаики. Для каждого элемента в таблицу были зафиксированы координаты 15 точек. Это необходимо для проведения процедуры географической привязки каждого элемента, кроме того, этого количества точек достаточно для проведения трансформации отображения сонограмм полиномом второго порядка, что увеличит точность работы. Таким образом, географическая привязка задала данным естественное расположение в пространстве для каждой сонограммы не в виде «прямой линии», а по траектории движения плавсредства со съемочным оборудованием со всеми поворотами на маршруте во время исследовательских работ. По мере географической привязки, элементы один за другим присоединяются друг к другу, составляя единую мозаику.

Проблему при проведении географической привязки составляли так называемые «угловые фрагменты» (фрагменты, находящиеся на участках судна), им уделялось особое внимание. Поскольку не всегда представляется возможным осуществлять съемку прямыми галсами, на снимках видны резкие изгибы, которые могут привести к сильному искажению сонограммы, что, в свою очередь, отрицательно сказывается на четкости изображения и точности привязки. В нашей работе присутствует фрагмент крутого поворота (рис. 6), можно увидеть насколько сильно изменилась форма фрагмента после пространственной привязки и трансформации изображения, также необходимо обратить внимание, что на внешнем углу сонограммы образовался «надрыв» – это отсутствие данных в этом месте вследствие крутого поворота [13].

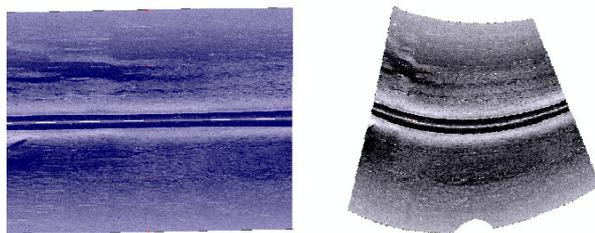


Рис. 6. Изменение угловой сонограммы после географической привязки и трансформирования полиномом второго порядка

Fig. 6. Correction of angular sonogram after georeferencing and transformation (second degree polynomial)

По окончании составления мозаики, добавляем слой космического снимка с Landsat-8. Объединение снимка и данных гидролокатора позволяет точно определить положение объектов в толще воды и на дне водоема относительно береговой линии и в целом для правильного визуального восприятия (рис. 7).



Рис. 7. Построенная ГБО мозаика с точечным слоем обнаруженных объектов и явлений

Fig. 7. SSS mosaic with point layer showing detected objects and artifacts

Обнаруженные явления и объекты можно поделить на несколько групп. Непосредственно сами объекты, выделяющиеся на фоне относительно ровной поверхности речного дна, относительно которых можно предположить, что они являются обломками древесного характера, так как имеют характерную вытянутую прямоугольную форму, а их объемность определяется за счет падающей тени. Также было замечено, что данные объекты обладают средними значениями отраженного звукового сигнала (20–30 дБ). Вторую группу составляют участки с искажения (в том числе геометрическими) и угасанием отраженного звукового сигнала, что приводит в конечном счете к потере данных. Подобные области необходимо определять за счет знаний координат и местоположений таких «темных пятен» на карте для повторного исследования данной области. Отметим, что данную проблему пока удалось решить только частично из-за существенной погрешности привязки спутниковых координат к сонограмме. На участках, где траектория отклоняется от заданного меандра, происходит геометрическое искажение (растяжение) растрового изображения, что впоследствии влияет на работу по распознаванию объектов. Учитывая расположение этих участков, так же можно будет избежать искажений или минимизировать радиус поворота.

Все выявленные объекты, были представлены на карте (рис. 7) путем создания и наложения нового слоя, хранящего информацию о местонахождении, порядке сонограммы (фрагмент мозаики), а также краткую описательную характеристику. Эти данные находятся в атрибутивной таблице слоя.

Такой способ представления информации позволил обнаружить некоторые характеристики объектов, которые были не так очевидны в первоначальном виде данных ГБО. Так, например, на стыке двух сонограмм был обнаружен объект вертикального залегания, обладающий высокой степенью отражения звука и характерной вытянутой звуковой тенью. Это может свидетельствовать о крупном объекте. Также в окрестностях объекта обнаружены и другие источники высокого отражения, имеющие характерную прямоугольную форму и собственную тень (рис. 8–9).

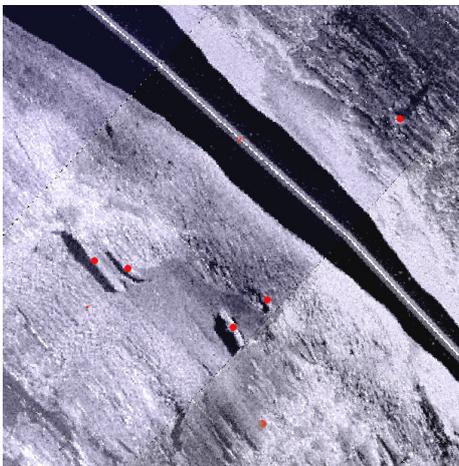


Рис. 8. Фрагмент построенной ГБО мозаики с обнаруженным вытянутым вертикально залегающим объектом на стыке мозаики

Fig. 8. SSS mosaic fragment showing distorted (elongated) object at mosaic join

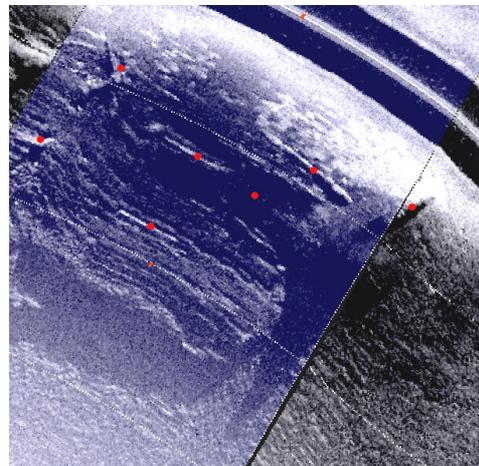


Рис. 9. Фрагмент построенной ГБО мозаики с обнаруженным вытянутым горизонтально залегающим объектом

Fig. 9. SSS mosaic fragment showing horizontal objects distorted by stretching

Проблема автоматизации процесса обработки и интерпретации данных ГБО

Следует отметить, что, несмотря на то что вопрос о создании системы, позволяющей исключить человеческого оператора из процесса обработки данных ГБО, рассматривался целым рядом исследователей, в том числе [5; 14–15], ими были достигнуты весьма скромные результаты. Так, в работе [15] путем построения комплексной нейросети удалось, по мнению авторов, создать систему, позволяющую автоматически идентифицировать валуны (рис. 10).

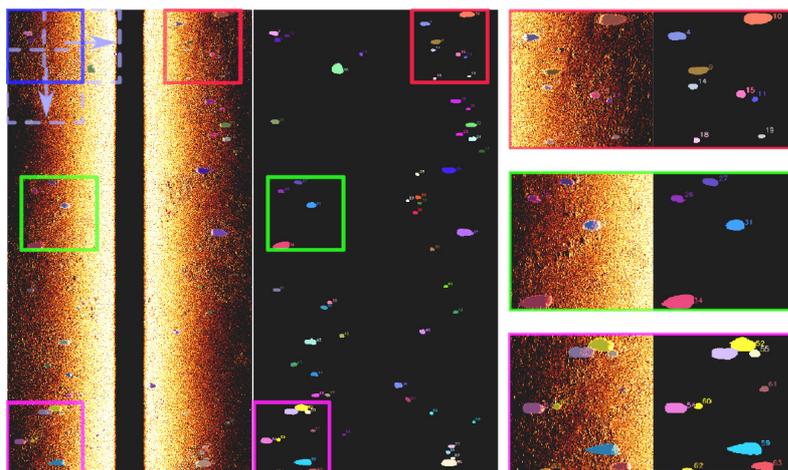


Рис. 10. Результаты работы системы по автоматизированному распознаванию валунов (выделенные объекты) [15]

Fig. 10. The results of a system for automatic identification of boulders (seen as highlighted shapes) [15]

Как видно из изображения, результаты весьма скромные и едва ли могут претендовать на дальнейшее развитие. Необходимо отметить, что объекты типа крупных камней и иных горных пород могут достаточно легко распознаваться по силе возвратного сигнала (более 30 дБ), а не по их графическому виду, что в условиях геометрического искажения может быть весьма обманчивым. Таким образом, применение различных методов обработки информации, ее автоматизации, включая такие методы, как алгоритмы машинного обучения [10], могут быть признаны эффективными (невозможность полной реализации высокоточного определения конечных объектов, а также ограничений моделей временного определения) лишь при условии, что будут учтены проблемы искажения объектов, а также с учетом акустических параметров. Попытки применения данных методов к снимкам ГБО в парадигме распознавания оптических данных не могут иметь практического значения.

В этом смысле выгодно отличается работа [16], в которой авторы описывают процесс классификации снимков ГБО, а также обозначают такие проблемы, как неприменимость большинства программ-экстракторов, поскольку они созданы для оптических изображений.

Процесс распознавания и классификации для снимков ГБО традиционно содержит в себя три основных шага:

- предобработку данных (коррекция серых тонов);
- выделение признаков (сегментация изображения);
- классификацию (выполняется человеческим оператором на основе сегментации).

Авторами работы [16] предложено решить проблему автоматизированного распознавания подводных объектов при помощи алгоритма, построенного на основе нейросети с пространственной пирамидальной сверткой и привязкой к сетевым базам данных гидроакустических изображений. В предложенном методе в процессе предобработки данных были задействованы пять различных нейросетей для распознавания объектов. Затем, в данную систему вводилась пространственная пирамидальная свертка и сетевые базы данных ГБО. Затем проводился сравнительный анализ результатов, полученных сетями до и после включения в них дополнительных компонент. Данный подход во многом идентичен принципу n -версионного программирования, согласно которому осуществляется выбор оптимального ПО или отдельной компоненты на основе алгоритма голосования. Отметим, что процесс предобработки данных в рамках предложенного метода ограничивался улучшением качества изображения.

Заключение

С учетом вышеизложенного можно заключить, что, несмотря на достаточно большое количество исследований в области распознавания, коррекции и автоматизированной интерпретации подводных объектов, визуализированных при помощи ГБО, на сегодняшний день не существуют эффективного способа реализации данного процесса. В этой связи нами впервые было предложено сочетать методы коррекции геометрических искажений подводных объектов с современными методами обработки информации, предложенными в последних научных исследованиях. На наш взгляд, корректировка образов с использованием эффективных рекурсивных фильтров, а также комплекса математических методов, представленных в [7; 9], является перспективной. Использование более точных данных космоснимков, а также корректировка траектории движения (меандр) посредством спутниковых координат позволяет корректировать искажения в плоскостях движения трансдюсера. В качестве методов постобработки эффективными оказались как коррекция изображений предложенными методами, так и фрагментация изображения, что обеспечило возможность детальной проработки каждого фрагмента и осуществление географической привязки по 15 точкам с последующей трансформацией полиномом второго порядка.

Можно утверждать, что математические методы могут вполне эффективно решать задачи геометрического искажения изображений, полученных с ГБО. Данное направление исследования имеет перспективу в части создания новых методов коррекции изображений, а также перенос их на решение схожих задач в области дистанционного зондирования земли (ДЗЗ).

На основании всего вышесказанного, можно сделать вывод, что создание перечня обнаруженных объектов при помощи ГБО является важным этапом в обработке полученных данных. Однако такой анализ данных на сегодняшний день не может проходить без участия человеческого оператора, несмотря на наличие опытных методов автоматизации. Это дает возможности для рационального проведения повторных наблюдений (если потребуется), дальнейшего использования данных для более легкого определения объектов и явлений, выявления закономерностей или общих характеристик исследуемой области.

Автоматизированные системы распознавание образов ГБО должны включать в себя все вышеуказанные элементы искажения изображений, а также опираться на физические особенности самих изображений, полученных путем обработки акустических, а не оптических сигналов. Данному вопросу необходимо уделить внимание при дальнейшей разработке данной темы.

Библиографические ссылки

1. Фирсов Ю. Г. Основы гидроакустики и использование гидрографических сонаров. СПб. : Нестор-История, 2010. 348 с.
2. Hamill D., Wheaton J. M., Buscombe D., Grams P.E., Melis T.S. Bed texture mapping in large rivers using recreational-grade sidescan sonar // River Flow 2016: Eighth International Conference on Fluvial Hydraulics (11–14 July 2016, Iowa City, IL) / Constantinescu, G. & H. (Eds). London: Taylor & Francis Group, 2017. P. 306–312. DOI: 10.1201/9781315644479-51.
3. Halmai Á.; Gradwohl-Valkay A.; Czigány S.; Ficsor J.; Liptay Z.Á.; Kiss K.; Lóczy D.; Pirkhofer E. Applicability of a Recreational-Grade Interferometric Sonar for the Bathymetric Survey and Monitoring of the Drava River // ISPRS Int. J. Geo-Inf., 2020, No. 9(3), P. 149. DOI: 10.3390/ijgi9030149.
4. Hamill D., Buscombe D., Wheaton J.M. Alluvial substrate mapping by automated texture segmentation of recreational-grade side scan sonar imagery // PLoS ONE. 2018. No. 13(3). P. e0194373. DOI: 10.1371/journal.pone.0194373.
5. Blondel P. The handbook of sidescan sonar. Springer – PraxisPublishing, 2009. 316 p.
6. Kaeser A., Litts T. An Illustrated Guide to Low-Cost Sonar Habitat Mapping v1.0. 2014 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fws.gov/panamacity/resources/An%20Illustrated%20Guide%20to%20Low-Cost%20Sonar%20Habitat%20Mapping%20v1.1.pdf> (дата обращения: 22.08.2023).

7. Cobra D. T. Q. Estimation and correction of geometric distortions in side-scan sonar images // RLE Technical Report. 1990. No. 5561990. 142 p.
8. Аузина Л. И. Опыт использования метода конечных разностей при моделировании изменения уровня грунтовых вод в пластах на наклонном водоупоре // Вестник ИрГТУ. 2011. № 8(55). С. 28–33.
9. Cobra D. T., Oppenheim A. V., Jaffe J. S. Geometric distortions in side-scan sonar images: a procedure for their estimation and correction // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1992. Vol. 17, No. 3. P. 252–268. DOI: 10.1109/48.153442.
10. Daniel S., Le Léannec F., Roux C., Solaiman B., Maillard E. P. Side-Scan Sonar Image Matching // IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1998, Vol. 23(3), P. 245–259.
11. Багницкий А. В., Инзарцев А. В. Автоматизация подготовки миссии для автономного необитаемого подводного аппарата в задачах обследования акваторий // Подводные исследования и робототехника. 2010. № 2(10). С. 17–24.
12. Бабий И. А., Галимзянов О. А., Гончаров А. Е. Обработка изображений с гидролокатора бокового обзора на примере одного участка нижнего течения реки Енисей // Российская Арктика. 2020. № 11. С. 16–23.
13. Kaeser A. J., Litts T. L., Tracy T. W. Using low-cost side-scan sonar for benthic mapping throughout the Lower Flint River, Georgia, USA // River Res. Applic., 2013. No. 29. P 634–644. DOI: 10.1002/rra.2556/.
14. Einsidler D., Dhanak M. R. Beaujean P-P. J. A Deep Learning Approach to Target Recognition in Side-Scan Sonar Imagery // OCEANS 2018: MTS/IEEE Charleston (22–25 October 2018, Charleston SC). IEEE, 2018. P. 1–4. DOI: 10.1109/OCEANS.2018.8604879.
15. Christensen J. H., Mogensen L. V., Ravn O. Side-scan sonar imaging: Automatic boulder identification // OCEANS 2021: San Diego–Porto (20–23 September 2021, San Diego, CA). IEEE, 2021. P. 1–6. DOI: 10.23919/OCEANS44145.2021.9705713.
16. Improved neural network with spatial pyramid pooling and online datasets preprocessing for underwater target detection based on side scan sonar imagery / J. Li, L. Chen, J. Shen et al. // Remote Sensing. 2023. No. 15. P. 440. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15020440>.

References

1. Firsov Iu. G. *Osnovy gidroakustiki i ispol'zovanie gidrograficheskikh sonarov* [The Fundamentals of Water Acoustics and Hydrographic Sonar Application]. St. Petersburg, Nestor-Istoriia Publ., 2010, 348 p.
2. Hamill D., Wheaton J. M., Buscombe D., Grams P.E., Melis T.S. Bed texture mapping in large rivers using recreational-grade sidescan sonar. *River Flow 2016: Eighth International Conference on Fluvial Hydraulics* (11–14 July 2016, Iowa City, IL), Constantinescu G. & H. (Eds). London: Taylor & Francis Group, 2017. P. 306–312. DOI: 10.1201/9781315644479-51.
3. Halmai Á.; Gradwohl-Valkay A.; Czigány S.; Ficsor J.; Liptay Z.Á.; Kiss K.; Lóczy D.; Pirkhofer E. Applicability of a Recreational-Grade Interferometric Sonar for the Bathymetric Survey and Monitoring of the Drava River. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 2020, No. 9(3), P. 149. DOI: 10.3390/ijgi9030149.
4. Hamill D., Buscombe D., Wheaton J. M. Alluvial substrate mapping by automated texture segmentation of recreational-grade side scan sonar imagery. *PLoS ONE*. 2018, No. 13(3), P. e0194373. DOI: 10.1371/journal.pone.0194373.
5. Blondel P. The handbook of sidescan sonar. Springer – PraxisPublishing, 2009. 316 p.
6. Kaeser A., Litts T. An Illustrated Guide to Low-Cost Sonar Habitat Mapping v1.0. 2014. Available at URL: <https://www.fws.gov/panamacity/resources/An%20Illustrated%20Guide%20to%20Low-Cost%20Sonar%20Habitat%20Mapping%20v1.1.pdf> (accessed: 22.08.2023).
7. Auzina L. I. [Experience in using the finite difference method in modeling changes in groundwater levels in layers on an inclined aquitard]. *Vestnik IrGTU*. 2011, No. 8(55), P. 28–33 (In Russ.).

8. Cobra D. T. Q. Estimation and correction of geometric distortions in side-scan sonar images. *RLE Technical Report*. 1990, No. 5561990, 142 p.
9. Cobra D. T., Oppenheim A. V., Jaffe J. S. Geometric distortions in side-scan sonar images: a procedure for their estimation and correction. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1992, Vol. 17, No. 3, P. 252–268. DOI: 10.1109/48.153442.
10. Daniel S., Le Léanec F., Roux C., Solaiman B., Maillard E. P. Side-Scan Sonar Image Matching. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1998, Vol. 23 (3), P. 245–259.
11. Bagnitskii A. V., Inzartsev A. V. [Automatizing mission preparation for an ROV for an aquatic study area]. *Podvodnye issledovaniia i robototekhnika*. 2010, No. 2(10), P. 17–24 (In Russ.).
12. Babiy I. A., Galimzyanov O. A., Goncharov A. E. [Visualizing And Processing Side-Scan Sonar Images: a Case of the Lower Reaches of the Enisei River]. *Russian Arctic*. 2020, No. 11, P. 16–23 (In Russ.).
13. Kaeser A. J., Litts T. L., Tracy T. W. Using low-cost side-scan sonar for benthic mapping throughout the Lower Flint River, Georgia, USA. *River Res. Applic.*, 2013, No. 29, P 634–644. DOI:10.1002/rra.2556/.
14. Einsidler D., Dhanak M. R., Beaujean P-P. J. A Deep Learning Approach to Target Recognition in Side-Scan Sonar Imagery. *OCEANS 2018: MTS/IEEE Charleston (22–25 October 2018, Charleston SC)*. IEEE, 2018, P. 1–4. DOI: 10.1109/OCEANS.2018.8604879.
15. Christensen J. H., Mogensen L. V., Ravn O. Side-scan sonar imaging: Automatic boulder identification. *OCEANS 2021: San Diego–Porto (20–23 September 2021, San Diego, CA)*. IEEE, 2021, P. 1–6. DOI: 10.23919/OCEANS44145.2021.9705713.
16. Li J., Chen L., Shen J. et al. Improved neural network with spatial pyramid pooling and online datasets preprocessing for underwater target detection based on side scan sonar imagery. *Remote Sensing*, 2023, No. 15, P. 440. DOI: 10.3390/rs15020440.

© Гончаров А. Е., Гончарова Е. А., 2023

Гончаров Александр Евгеньевич – доцент; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: goncharovae@sibsau.ru.

Гончарова Екатерина Александровна – магистрант; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kate-jane-bande@mail.ru.

Goncharov Alexander Evgen'evich – associate professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: goncharovae@sibsau.ru.

Goncharova Ekaterina Aleksandrovna – graduate student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: kate-jane-bande@mail.ru.

УДК 621.396.962.38

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-652-662

Для цитирования: Каткова В. П., Вяхирев В. А., Кринталь А. Н. Математическое моделирование автокомпенсационных устройств // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 4. С. 652–662. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-652-662.

For citation: Katkova V. P., Vyakhirev V. A., Krintal A. N. [Mathematical modeling of autocompensation devices]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 4, P. 652–662. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-652-662.

Математическое моделирование автокомпенсационных устройств

В. П. Каткова^{1*}, В. А. Вяхирев², А. Н. Кринталь²

¹Войсковая часть 58133-5

Российская Федерация, 659300, Алтайский край, г. Бийск

²Сибирский федеральный университет, Военно-Инженерный институт
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 13а

*E-mail: Lesoedova.2011@mail.ru

Статья посвящена порядку разработки и описанию математических моделей автокомпенсационных устройств радиолокационных станций кругового обзора. Разработка алгоритмов пространственной обработки сигналов в радиолокационных системах с фазированными антенными решетками является важным этапом проектирования радиолокационных станций. В данной статье будет рассмотрен порядок создания математических моделей автокомпенсационных устройств, которые разнятся способами реализации, а именно: количеством компенсационных каналов, положением основного и компенсационных (дополнительных) каналов радиолокационной станции (стационарное или динамическое), амплитудно-фазовым распределением основной и дополнительных антенн, представлением фазированной антенной решетки, алгоритмами нахождения вектора весового коэффициента. Адекватность работы моделей проверена методом вычислительного эксперимента и результатами, сравнимыми с реализованными автокомпенсаторами в радиолокационных станциях. Результаты вычислительного эксперимента, представленные в виде графиков сигнала на выходе автокомпенсационного устройства, а также прохождения согласованного фильтра, показывают, насколько эффективен алгоритм вычисления вектора весового коэффициента, позволяют наглядно, быстро и экономично сравнить эффективность работы автокомпенсационных устройств в зависимости от способа их реализации. В статье рассматривается алгоритм непосредственного формирования вектора весового коэффициента и алгоритм формирования вектора весового коэффициента через обратную корреляционную переоблающую матрицу. Математические модели автокомпенсационных устройств и результаты вычислительного эксперимента могут применяться для обучения будущих специалистов, разрабатывающих и эксплуатирующих радиолокационные станции.

Ключевые слова: математическая модель, активная шумовая помеха, корреляционный автокомпенсатор, вектор весового коэффициента, быстроедействие.

Mathematical modeling of autocompensation devices

V. P. Katkova^{1*}, V. A. Vyakhirev², A. N. Krintal²

¹Military unit 58133-5

Altai Territory, Biysk, 659300, Russian Federation

²Siberian Federal University, Military Engineering Institute
13a, Akademgorodok St., Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

*E-mail: Lesoedova.2011@mail.ru

The article is devoted to the order of development and description of mathematical models of automatic compensation devices of all-round radar stations. The development of algorithms for spatial processing of signals in radar systems with phased antenna arrays is an important stage in the design of radar stations. This article will consider the procedure for creating mathematical models of automatic compensation devices that differ in implementation methods, namely: the number of compensation channels, the position of the main and compensation (additional) channels of the radar station (stationary or dynamic), the amplitude-phase distribution of the main and additional antennas, the representation phased antenna array, algorithms for finding the weight vector. The adequacy of the operation of the models was verified by the method of computational experiment and the results are comparable with the implemented automatic compensation devices in radar stations. The results of the computational experiment, presented in the form of graphs of the signal at the output of the automatic compensation device, as well as the passage of the matched filter, show how effective the algorithm for calculating the weight vector, allow you to visually, quickly and economically compare the efficiency of the automatic compensation devices, depending on the method of their implementation. The article discusses the algorithm for the direct formation of the weight vector and the algorithm for the formation of the weight vector through the inverse correlation whitening matrix. Mathematical models of automatic compensation devices and the results of a computational experiment can be used to train future specialists who develop and operate radar stations.

Keywords: mathematical model, active noise interference, correlation automatic compensation, weight coefficient vector, speed.

Введение

Вопрос обнаружения воздушных объектов и точного определения их характеристик был и остаётся актуальным [1]. Радиолокационные станции (РЛС) кругового обзора, предназначенные для решения этого вопроса, выполняют информационные задачи в условиях воздействия внешних помех. Источники помех маскируют или имитируют сигналы и затрудняют извлечение полезной информации. Существенное влияние на обнаружение и правильность определение плоскостных координат воздушного объекта оказывают ответная импульсная помеха (ОИП) и активная шумовая помеха (АШП) [2].

Влияние на работу РЛС АШП в настоящее время вызвано стремительным развитием методов и средств радиопротиводействия, а также разнообразием видов преднамеренных радиопомех, понижающих эффективность выделения полезных сигналов [3]. ОИП негативно сказывается на качественном приёме полезного сигнала, оказывая воздействие на боковые лепестки диаграммы направленности антенны основного канала. Именно поэтому разработка устройств, предназначенных для компенсации различных шумов и помех при приёме полезного сигнала является одной из важнейших задач радиолокации [4]. Для решения такой задачи в РЛС применяются системы автокомпенсации, реализующие алгоритмы компенсации АШП и подавления ОИП по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны основного канала.

Математическое моделирование – мощный инструмент для исследования сложных технических систем, какими и являются системы автокомпенсации помех, обладающий рядом преимуществ по сравнению с другими методами исследования [5]. Разработка различных математических моделей алгоритмов и систем в настоящее время является актуальной задачей [6].

Целью данной работы является рассмотрение порядка моделирования автокомпенсатора и алгоритма подавления ответа, принятого боковыми лепестками диаграммы направленности антенны основного канала.

Автокомпенсатор (АКП) предназначен для снижения влияния АШП, воздействующих на приемный канал РЛС. Основная идея компенсации АШП по боковым лепесткам заключается в сложении в противофазе сигналов, принятых антенной основного канала с сигналами с дополнительных каналов, умноженными на весовой коэффициент. При точном и быстром вычисленном весовом коэффициенте осуществляется успешное подавление АШП без существенного ослабления полезного сигнала [7]. Для успешного подавления АШП необходимо точное и быстрое вычисление вектора весового коэффициента.

Алгоритм подавления ОИП по боковым лепесткам диаграммы направленности основного канала заключается в вычитании из сигналов основной антенны сигналов, принятых дополнительной антенной. При этом уровень сигналов, принятых дополнительной антенной в направлении боковых лепестков диаграммы направленности антенны основного канала, превышает сигналы, принятые основной антенной в направлении главного лепестка.

Порядок создание математической модели автокомпенсационных устройств

Блок-схема системы автокомпенсации представлена на рис. 1.

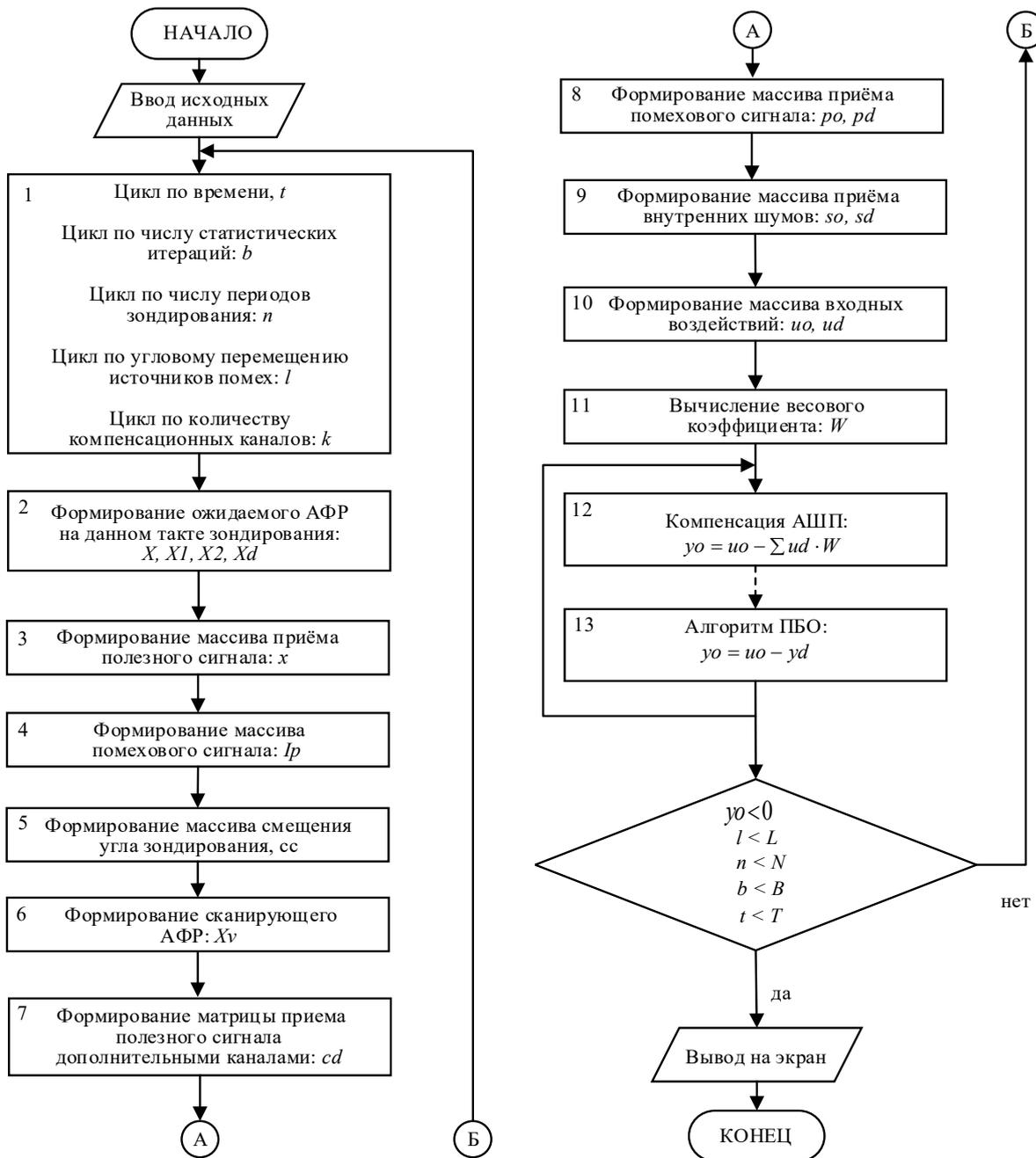


Рис. 1. Блок-схема системы автокомпенсации

Fig. 1. Block diagram of the autocompensation system

Чтобы приступить к процессу моделирования систем автокомпенсации необходимо задать исходные данные, а также циклы, обозначенные блоком 1 на рис. 1.

Моделирование системы автокомпенсации начинается с формирования амплитудно-фазовых распределений антенн основного и компенсационных каналов (блок 2 на рис. 1). Амплитудно-фазовое распределение антенны основного канала, в зависимости от вида антенны основного канала, формируется согласно выражению [8]

$$X(m, l) = e^{-i(2(m+1)-M-1) \cdot L(l) \cdot \frac{\pi}{M}} \cdot d(m), \quad (1)$$

где m – порядковый номер антенного элемента решётки основного канала; M – количество ненаправленных элементов антенной решётки; l – порядковый номер углового параметра источников помех; L – номер отсчёта углового параметра; $d(m)$ – составляющая амплитудно-фазового распределения антенны в зависимости от вида антенны.

Формирование массива амплитудно-фазового распределения компенсационных каналов осуществляется согласно выражению

$$X1(m1, l) = e^{-i(2(m1+1)-M1-1) \cdot L(l) \cdot \frac{\pi}{M1 \cdot p}},$$

где $m1$ – порядковый номер антенного элемента решётки компенсационного канала, $M1$ – количество ненаправленных элементов антенной решётки компенсационного канала, p – коэффициент нормирования диаграммы направленности антенны по азимуту.

Далее происходит формирование массива приёма полезного (x) (блок 3 на рис. 1) [9]

$$x(m, t) = A \cdot e^{-i(2(m+1)-M-1) \cdot a \cdot \frac{\pi}{M \cdot p}} \cdot e^{-i(\omega t + \varphi_0 + \varphi)},$$

где A – амплитуда полезного сигнала; a – направление прихода полезного сигнала; ω – частота сигнала; φ_0 – начальная фаза сигнала; φ – межпериодный набег фаз сигнала.

Амплитуда полезного сигнала может быть постоянная, быстро или медленно флуктуирующая по одному из известных законов [10].

Формирование массива помехового сигнала (Ip) (блок 4 на рис. 1)

$$ap(n, t) = ip \cdot rnorm(1, 0, 1)_0,$$

$$fp(n, t) = rnd(2\pi),$$

$$Ip(n, t) = ap(n, t) \cdot (\cos(fp(n, t)) + i \cdot \sin(fp(n, t))),$$

где ip – интенсивность помехи; n – порядковый номер периода зондирования; t – порядковый номер отсчёта по времени.

Далее происходит моделирование вращения основной антенны, т. е. формирование массива смещения (блок 5 на рис. 1),

$$cc(m, n) = e^{-i(2(m+1)-M-1) \cdot aa(n) \cdot \frac{\pi}{M \cdot p}}, \quad (2)$$

где aa – шаг поворота антенны за период зондирования.

При умножении (1) и (2) получаем результат сканирования (nc).

На основе выражения сканирования формируется массив сканирующего амплитудно-фазового распределения (Xv) (блок 6 на рис. 1)

$$Xv_n^{(l)} = X^{(l)} \cdot \left(nc^{(n)} \right)_i.$$

Обозначение (l) указывает, что берутся значения вектор-столбца матрицы.

Моделирование вращения антенн дополнительных каналов зависит от РЛС. Их положение может быть стационарным, или компенсационные каналы могут вращаться вместе с антенной основного канала. Формирование амплитудно-фазового распределения для каждого компенсационного канала при их вращении (в данной статье приведён пример для двух компенсационных каналов) осуществляется согласно выражениям [11; 12]

$$X1(m1, l) = e^{-i \cdot (2 \cdot (m1+1) - M1-1) \cdot (L(l)+a1) \cdot \frac{\pi}{M1 \cdot p}},$$

$$X2(m1, l) = e^{-i \cdot (2 \cdot (m1+1) - M1-1) \cdot (L(l)-a1) \cdot \frac{\pi}{M1 \cdot p}},$$

где $a1$ – поправка на разнос электрических центров антенн.

На основе полученных амплитудно-фазовых распределений для каждого канала формируется амплитудно-фазовое распределение системы дополнительных антенн:

$$Xd = [X1 \ X2]^T.$$

где T – операция транспонирования.

Далее формируется массив приёма полезного сигнала компенсационными каналами согласно выражению (блок 7 на рис. 1)

$$cd(m1, t) = Yc(m1) \cdot A \cdot e^{-i \cdot (2 \cdot (m1+1) - M1-1) \cdot (a \pm a1) \cdot \frac{\pi}{M1 \cdot p}} \cdot e^{-i \cdot (\omega \cdot t + \varphi_0)}.$$

где Yc – амплитудно-фазовый множитель на принятый полезный сигнал дополнительными каналами; k – порядковый номер дополнительного канала.

С учетом ошибок АФР антенны, вызванных различными составляющими, и перемещения антенны основного канала, в результате чего формируется матрица помех основного и дополнительных каналов (po, pd) (блок 8 на рис. 1),

$$po(m, t) = Ip(n, t) \cdot e^{-1i \cdot (2 \cdot (m+1) - M-1) \cdot np \cdot \frac{\pi}{M \cdot p}},$$

где np – направление прихода помехового сигнала.

$$pd(t, m1) = \left(YN^{(k)} \right)_{m1} \cdot Ip(n, t) \cdot e^{-1i \cdot (2 \cdot (m1+1) - M1-1) \cdot (np \pm a1) \cdot \frac{\pi}{M1 \cdot p}},$$

где $YN^{(k)}$ – амплитудно-фазовый множитель на принятый помеховый сигнал дополнительных каналов.

Матрица внутренних шумов основного канала so формируется согласно выражению (блок 9 на рис. 1)

$$so(m, t) = as(m, t) \cdot (\cos(fs(m, t)) + i \cdot \sin(fs(m, t))), \quad (3)$$

где as и fs – случайные амплитуда и фаза внутренних шумов соответственно, формируются аналогично ap и fp . Матрица шумов $sd(m1, t)$ дополнительного канала формируется аналогично (3).

Из массивов полезного сигнала, помех и собственных шумов формируется аддитивная смесь входных воздействий, поступающих на вход антенн основного и компенсационных каналов (uo, ud) (блок 10 на рис. 1), представляющая собой смесь шумов, пересчитанных на вход антенной решётки, полезного сигнала и помех. В случае вращения компенсационных каналов выражение (4) примет иной вид (5)

$$uo(n) = po(n) + so(n) + x(n),$$

$$ud(n, k) = pd(n, k) + sd(n, k) + cd(n, k), \quad (4)$$

$$ud := [ud1 \ ud2]^T, \quad (5)$$

где $ud1, ud2$ – аддитивная смесь входных воздействий, поступающих на вход антенн двух компенсационных каналов, формирующихся аналогично ud .

При формировании плоской антенной решётки к исходным данным добавится количество элементов решётки в плоскости a ($M1$), количество элементов решётки в плоскости b ($M2$), направление источника полезного сигнала в плоскости a (a), направление источника полезного

сигнала в плоскости b (b), количественный отсчёт параметра в плоскости a (LL), количественный отсчёт параметра в плоскости b (KK), а также погрешности положений элементов в плоскости a, b ($r1, r2$), случайная составляющая к амплитуде полезного сигнала (AA).

Формируется массив погрешности, вызванной запаздыванием прихода полезного сигнала из-за расположения элементов в нормали к антенне ($r3$).

Затем происходит формирование массива полезного сигнала (x)

$$x(m1, m2) = e^{-i(2(m1+1)-M1-1) \cdot a \cdot \frac{\pi}{M1}} \cdot e^{-i(2(m2+1)-M2-1) \cdot a \cdot \frac{\pi}{M2}} \cdot e^{-i(r3(n))_{m1, m2}}.$$

Следом формируется массив случайно составляющей амплитуды сигнала (An).

Далее формируется массив распределения сигнала во временной области с учётом случайной составляющей амплитуды (xt)

$$xt(t, m1, m2) = e^{-i \cdot t \cdot \psi} \cdot An(n) \cdot (x(n))_{m1, m2},$$

где ψ – множитель частоты; An – амплитуда полезного сигнала со случайной составляющей.

Выражения для формирования амплитудно-фазового распределения для каждой из плоскостей примет следующий вид в плоскости a ($X1$):

$$X1(m1, l) = e^{-i(2(m1+r1(n, m1)+1)-M1-1) \cdot L(l) \cdot \frac{\pi}{M1}}. \quad (6)$$

Для плоскости b выражение (6) примет аналогичный вид, за исключением составляющей $M1, r1, L$ которые заменятся аналогичными им $M2, r2, K$.

Затем задаем направление прихода помехового сигнала в плоскости a ($N1$), направление прихода полезного сигнала в плоскости b ($N2$), количество отсчётов по направлению прихода помехового сигнала (r).

На основе $N1$ и $N2$ формируется матрица направлений источников помех для двух плоскостей (np)

$$np(m1, m2) = e^{-i(2(m1+1)-M1-1) \cdot N1(r) \cdot \frac{\pi}{M1}} \cdot e^{-i(2(m2+1)-M2-1) \cdot N2(r) \cdot \frac{\pi}{M2}} \cdot e^{-i(r3(n))_{m1, m2}}.$$

Существует множество методов нахождения вектора весового коэффициента. Рассмотрим некоторые из них, а именно: непосредственное формирование вектора весового коэффициента и формирование вектора весового коэффициента через обратную корреляционную переоблающую матрицу.

На практике, как правило, параметры АШП и пространственная корреляционная матрица неизвестна. И, к тому же, они меняются во времени из-за движения источников ШП и обзора пространства РЛС. Поэтому обеспечить защиту основного канала РЛС заранее выбранными фиксированными параметрами не является возможным [13; 14].

Именно поэтому большое значение для систем автокомпенсации имеет способность адаптироваться к постоянно изменяющейся помеховой обстановке. Важнейшим параметром качества адаптивных систем является их быстродействие [14].

Быстродействие системы автокомпенсации во многом зависит от скорости вычисления вектора весового коэффициента. Аддитивная смесь полезного сигнала и шума умножается на вектор весовых коэффициентов и происходит суммирование сигнала, пришедшего с основного канала и сигналов, принятых дополнительными каналами и умноженных на вектор весовых коэффициентов. На выходе автокомпенсатора получаем сигнал с компенсированными АШП. На основе этого сигнала осуществляется вычисление вектора весовых коэффициентов повторно, что обеспечивает увеличение отношения сигнал/(шум + помеха).

Непосредственное формирование вектора весового коэффициента осуществляется согласно выражению (блок 11 на рис. 1) [15]

$$W_k(n, k) = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \left((y_{o_{n-1}})_t \cdot \left(ud_{n-1, k}^{(t)} \cdot \overline{X1} \right) \right), \quad (7)$$

где $y_{o_{n-1}}$ – коэффициент обратной связи; T – количество отсчётов по времени; $\overline{}$ – операция комплексного сопряжения.

Выражение (7) применимо для случая, когда вращение антенны основного канала не включено. При включённом вращении выражение (7) примет следующий вид:

$$W(n, k) = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \left(\left(\frac{1}{1 + yB_{n-1}} \right)_t \cdot \left(\left((ud_b)_{n-1, k} \right)^{(t)T} \cdot \overline{X1_n^{(k)}} \right) \right),$$

где yB – результат разности сигналов основного и компенсационных каналов.

Алгоритм непосредственного нахождения вектора весового коэффициента (W) заключается в суммировании по времени произведения коэффициента обратной связи на предыдущем периоде зондирования на аддитивную смесь входных воздействий, поступающих на вход антенн дополнительных каналов и ожидаемое комплексно-сопряженное амплитудно-фазовое распределение дополнительных каналов.

Формирование вектора весового коэффициента через обратную корреляционную переоблающую матрицу осуществляется согласно выражению [10]:

$$W_k(n, k) = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \left(\frac{1}{1 + (y_{o_{n-1}})_t} \cdot \left((ud_{n-1, k}^{(t)})^T \cdot \overline{X1^{(Nc)}} \right) \right), \quad (8)$$

где Nc – количественный отсчёт направления прихода полезного сигнала.

При включённом вращении выражение (8) примет следующий вид:

$$W_k(n, k) = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \left(I - \frac{1}{1 + (ud^{(t)})^T \cdot \overline{ud^{(t)}}} \cdot ud^{(t)} \cdot \overline{ud^{(t)}}^T \right), \quad (9)$$

где I – единичная матрица; $ud(k, t) = \left((ud_b)_{n-1, k} \right)^{(t)T} \cdot \overline{X1_{n-1}^{(k)}}$.

На втором и последующих периодах зондирования выражение (9) примет следующий вид:

$$W_k(n) = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \left(W_k(n-1) - \frac{1}{1 + (ud^{(t)})^T \cdot \overline{ud^{(t)}}} \cdot ud^{(t)} \cdot \overline{ud^{(t)}}^T \right).$$

В отличие от алгоритма непосредственного нахождения вектора весового коэффициента, происходит оценка корреляционной матрицы помех.

После вычисления вектора весового коэффициента (W) на нулевом шаге итерации массив входных воздействий умножается на вектор весовых коэффициентов (W), который вычисляется в зависимости от применяемого алгоритма. Вычисляется таким образом, чтобы после суммирования сигналов, пришедших с компенсационных каналов, происходило компенсирование АШП (блок 12 на рис. 1)

$$y_o(n) = u_o(n) \cdot X_v - \sum (ud \cdot X_d \cdot W).$$

Подавление ОИП происходит согласно алгоритму (блок 13 на рис. 1)

$$y_o(n) = |u_o(n) \cdot X_v| - \sum |ud \cdot X_d|.$$

Если сумма значений сигналов, пришедших на антенны компенсационных каналов, больше, чем сигнал, пришедший на основной канал, то принимается, что $y_0(n) = 0$. Таким образом происходит подавление ОИП.

Результаты моделирования

Результаты моделирования представлены в виде графиков. На рис. 2 отображен результат моделирования при выключенном автокомпенсаторе. Наблюдается отсутствие полезного сигнала. Следует учитывать, что на рис. 2 и 3 амплитуда аддитивной смеси полезного сигнала, помехи и собственных шумов нормирована к среднему квадратическому отклонению шума.

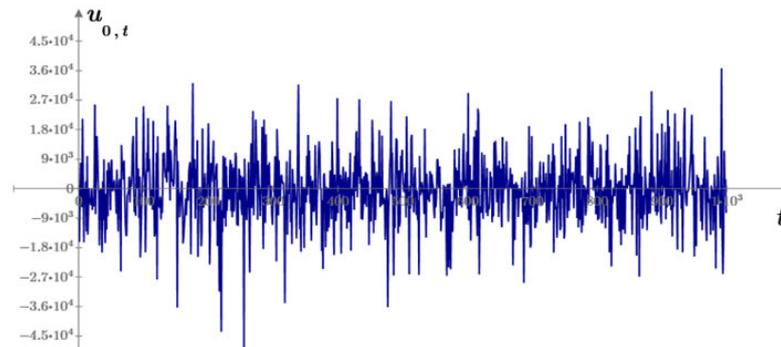


Рис. 2. Сигнал на выходе антенны основного канала при выключенном автокомпенсаторе

Fig. 2. The signal at the output of the antenna of the main channel when the automatic compensation devices is turned off

На рис. 3 представлен график сигнала на выходе автокомпенсатора и после прохождения согласованного фильтра для двух алгоритмов нахождения вектора весового коэффициента. Из результатов вычислительного эксперимента можно сделать заключение, что алгоритм нахождения вектора весового коэффициента через обратную корреляционную переобеляющую матрицу быстрее компенсирует АШП.

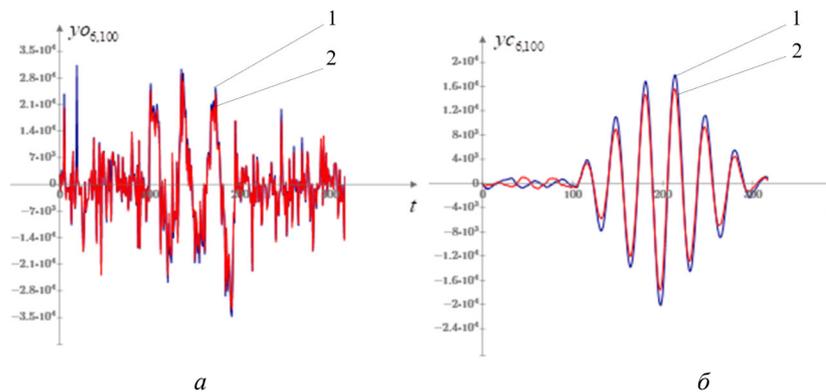


Рис. 3. График сигнала:

а – на выходе автокомпенсатора; *б* – после прохождения согласованного фильтра для двух алгоритмов. 1 – алгоритм непосредственного формирования вектора весового коэффициента; 2 – алгоритм вычисления вектора весового коэффициента через обратную корреляционную переобеляющую матрицу

Fig. 3. The graph of the signal:
a – at the output of the automatic compensation devices; *b* – the graph of the signal after passing the matched filter for two algorithms. In 1 – the algorithm for the direct formation of the vector of the weighting coefficient; in 2 – the algorithm for calculating the vector of the weighting coefficient through the inverse correlation re-whitewashing matrix

Заключение

В статье рассмотрена математическая модель автокомпенсатора и алгоритма подавления ОИП по боковым лепесткам. Результаты вычислительных экспериментов представлены в виде графиков. Разработанная модель позволяет провести вычислительные эксперименты в зависимости:

- от выбранных алгоритмов адаптации к помеховым сигналам по критериям: максимального отношения сигнал/шум и скорости адаптации к помехам;
- работы системы вращения основной антенны: вращение отключено или вращение включено;
- положения компенсационных каналов (динамическое или стационарное);
- реализованного в РЛС алгоритма вычисления вектора весового коэффициента.

Математическая модель автокомпенсатора и алгоритма подавления ОИП по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны основного канала позволяет лучше понять принцип работы автокомпенсационных устройств и поэтому может применяться для обучения будущих специалистов, эксплуатирующих РЛС.

Библиографические ссылки

1. Синтез обобщенного алгоритма обработки и формирования данных по отраженным сигналам от сложных целей / Х. В. Сунг, К. Н. Трунг, Б. Н. Фунг, Х. Д. Куанг // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26. № 1. С. 44–57. Doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-1-44-57.
2. Рябуха В. П., Семеняка А. В., Катюшин Е. А. Математические модели взаимнокоррелированных и некоррелированных гауссовых шумовых помех от внешних источников // Изв. Вузов. Радиоэлектроника. 2021. Т. 64. № 3. С. 172–180. Doi: 10.20535/S0021347021030043.
3. Ширман Я. Д., Манжос В. Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М. : Радио и связь, 1981. 416 с.
4. Чухломин И. Е., Файзулин Н. А., Павлик В. В. Анализ межпериодной обработки при нестационарном влиянии пассивных гауссовских помех // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Серия: компьютерные технологии, автоматическое управление и радиоэлектроника. 2020. № 20. С. 79–88. Doi: 10.14529/ctcr200108.
5. Шеннон Р., Масловский Е. К. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М. : Мир, 1978. 411 с.
6. Дятко А. А. Моделирование пассивных помех в виде отражений от облаков дипольных отражателей // Информационные технологии : материалы 86-й науч.-техн.й конф. профес.-препод. сост., науч. сотrud. и аспирантов. Минск, 31 января – 12 февраля 2022 г. Минск : БГТУ, 2022. С. 115–117.
7. Елагина К. А. Адаптивные алгоритмы обнаружения и разрешения ЧМ сигналов в РЛС обзора при сложном помеховом воздействии: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2017. 157 с.
8. Ботов М. И., Вяхирев В. А. Основы теории радиолокационных систем и комплексов. Красноярск : СФУ, 2013. 530 с.
9. Бородин М. А. Моделирование формы эхосигнала радиовысотомера // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25. № 4. С. 52–62. Doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-4-52-62.
10. Моделирование информационных систем на основе законов распределения случайных величин: Монография / Ю. Ю. Громов, И. Г. Карпов, И. Н. Ищук и др. Тамбов : Нобелистика, 2019. 202 с.
11. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ. РФ. Математическая модель вращения антенны основного канала РЛС / Вяхирев В. А., Лесоедова В. П., Соболева М. А. № 2021665483, заявл. 20.09.2021; опублик. 27.09.2021.
12. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ. РФ. Математическая модель двухканального автокомпенсатора РЛС с разнесённым положением компенсационных каналов / Вяхирев В. А., Каткова В. П., Кринталь А. Н. № 2022661902, заявл. 14.07.2022; опублик. 28.07.2022.

13. Рябуха В. П., Адаптивные системы защиты РЛС от шумовых помех. 1. Корреляционные автокомпенсаторы на основе стохастических градиентных алгоритмов адаптации // Прикладная радиоэлектроника. 2016. Т. 15, № 1. С. 11–25.

14. Защита когерентно-импульсных РЛС от комбинированных помех. 3. Цифровая адаптивная система последовательной защиты РЛС программного обзора от комбинированных помех на основе АРФ / В. П. Рябуха, А. В. Семьяника, Е. А. Катюшин, Д. В. Атаманский // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 65, № 2. С. 84–94. Doi: 10.20535/S0021347022020029.

15. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ. РФ. Математическая модель алгоритма оценки переоблающей корреляционной матрицы помех / Вяхирев В. А., Каткова В. П. № 2022615816, заявл. 16.03.2022; опубл. 04.04.2022.

References

1. Sung Kh. V., Trung K. N., Fung B. N., Kuang Kh. D. [Synthesis of a generalized algorithm for processing and generating data on reflected signals from simple targets]. *Izv. vuzov Rossii. Radioelektronika*. 2023, Vol. 26, No. 1, P. 44–57. Doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-1-44-57 (In Russ.).

2. Ryabukha V. P., Semenyaka A. V., Katyushin E. A. [Mathematical models of cross-correlated and uncorrelated Gaussian noise interference from external sources]. *Izv. Vuzov. Radioelektronika*. 2021, Vol. 64. No. 3, P. 172–180. Doi: 10.20535/S0021347021030043 (In Russ.).

3. Shirman Ya. D, Manzhos V. N. *Teoriya i tekhnika obrabotki radiolokatsionnoy informatsii na fone pomekh* [Theory and technique of processing radar information against the background of interference]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1981, 416 p.

4. Chukhlomin I. E., Fayzulin N. A., Pavlik V. V. [Analysis of interperiod processing under non-stationary influence of passive Gaussian noise]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: komp'yuternye tekhnologii, avtomaticheskoe upravlenie i radioelektronika*. 2020, No. 20, P. 79–88. Doi: 10.14529/ctcr200108 (In Russ.).

5. Shannon R. *Imitatsionnoe modelirovanie sistem – iskusstvo i nauka* [Simulation modeling of systems – art and science]. Moscow, Mir Publ., 1978, 411 p.

6. Dyatko A. A. [Modeling passive interference in the form of reflections from clouds of dipole reflectors]. *Informatsionnye tekhnologii : materialy 86-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professor-sko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov* [Information technologies: materials of the 86th scientific and technical conference of faculty, researchers and graduate students]. Minsk, 2022, P. 115–117 (In Russ.).

7. Elagina K. A. *Adaptivnye algoritmy obnaruzheniya i razresheniya ChM signalov v RLS obzora pri slozhnom pomekhovom vozdeystvii* [Adaptive algorithms for detecting and resolving FM signals in surveillance radar under complex interference]. Krasnoyarsk, 2017, 157 p.

8. Botov M. I., Vyakhirev V.A. *Osnovy teorii radiolokatsionnykh sistem i kompleksov* [Fundamentals of the theory of radar systems and complexes]. Krasnoyarsk, Sibirskiy federal'nyy universitet, 2013, 530 p.

9. Borodin M. A. [Modeling the form of the echo signal of a radio altimeter]. *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika*. 2022, Vol. 25, No. 4, P. 52–62. Doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-4-52-62 (In Russ.).

10. Gromov Yu. Yu., Karpov I. G., Ishchuk I. N., Minin Yu. V., Ivanov O. G., Tyutyunnik V. M. *Modelirovanie informatsionnykh sistem na osnove zakonov raspredeleniya sluchaynykh velichin* [Modeling of information systems based on the laws of distribution of random variables]. Tambov, Nobelistika Publ., 2019, 202 p.

11. Vyakhirev V. A., Lesoedova V. P., Soboleva M. A. *Matematicheskaya model' vrashcheniya anteny osnovnogo kanala RLS* [Mathematical model of rotation of the antenna of the main channel of the radar]. Certificate of state registration of the computer program RF, No. 2021665483, 2021.

12. Vyakhirev V. A., Katkova V. P., Krintal' A.N. *Matematicheskaya model' dvukhkanal'nogo avtokompensatora RLS s raznesennym polozheniem kompensatsionnykh kanalov* [Mathematical model of a two-channel auto-compensator radar with a spaced position of compensation channels]. Certificate of state registration of the computer program RF, No. 2022661902, 2022.

13. Ryabukha V. P. [Adaptive systems for protecting radar from noise interference. 1. Correlation autocompensators based on stochastic gradient adaptation algorithms]. *Prikladnaya radioelektronika*. 2016, Vol. 15, No. 1, P. 11–25 (In Russ.).

14. Ryabukha V. P., Semyanika A. V., Katyushin E. A., Atamanskiy D. V. [Protection of coherent-pulse radars from combined interference. 3. Digital adaptive system for sequential protection of the radar of a program review from combined interference based on an active notch filter]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika*. 2022, Vol. 65, No. 2, P. 84–94. Doi: 10.20535/S0021347022020029 (In Russ.).

15. Vyakhirev V. A., Katkova V. P. *Matematicheskaya model' algoritma otsenki pereobelyayushchey korrelyatsionnoy matritsy pomekh* [Mathematical model of the algorithm for estimating the whitening correlation matrix of interference]. Certificate of state registration of the computer program RF, No. 2022615816, 2022.

© Каткова В. П., Вяхирев В. А., Кринталь А. Н., 2023

Каткова Вера Павловна – инженер, войсковая часть 58133-5. E-mail: Lesoedova.2011@mail.ru.

Вяхирев Виктор Александрович – кандидат технических наук, доцент, профессор Военного учебного центра; Сибирский федеральный университет. E-mail: vyakhirev@yandex.ru.

Кринталь Андрей Николаевич – студент; Сибирский федеральный университет. E-mail: Andrey-krintal@yandex.ru.

Katkova Vera Pavlovna – engineer, military unit 58133-5. E-mail: Lesoedova.2011@mail.ru.

Vyakhirev Viktor Aleksandrovich – Cand. Sc., associate professor, professor of the Military Training Center; Siberian Federal University. E-mail: vyakhirev@yandex.ru.

Krintal Andrey Nikolaevich – student; Siberian Federal University. E-mail: Andrey-krintal@yandex.ru.

УДК 004.056

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-663-672

Для цитирования: Кононов Д. Д., Исаев С. В. Анализ киберугроз корпоративной сети на основе параллельной обработки данных Netflow // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 4. С. 663–672. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-663-672.

For citation: Kononov D. D., Isaev S. V. [Analysis of corporate network cyber threats based on parallel processing of Netflow data]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 4, P. 663–672. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-663-672.

Анализ киберугроз корпоративной сети на основе параллельной обработки данных Netflow

Д. Д. Кононов^{*}, С. В. Исаев

Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50/44
^{*}E-mail: ddk@icm.krasn.ru

Публичные сервисы различных организаций подвергаются постоянным кибератакам, что повышает риски информационной безопасности. Анализ сетевого трафика является важной задачей для обеспечения безопасного функционирования сетевой инфраструктуры, в том числе корпоративных сетей. В данной работе представлен обзор основных подходов для анализа сетевого трафика, приведены смежные работы, указаны недостатки существующих работ. Одним из методов является анализ данных сетевого трафика с использованием протокола Netflow, который позволяет сохранять данные о трафике на уровне L3 модели OSI. Особенностью исследования является использование длительных периодов наблюдения. При сохранении данных на длительных временных интервалах журналы имеют большой объем, что требует распараллеливания для первичной обработки данных. Авторами разработан кросс-платформенный программный комплекс распределенной обработки журналов сетевой активности, который использовался для анализа сетевой активности корпоративной сети Красноярского научного центра за 2021–2022 гг. Показана схема программного комплекса, описаны его возможности и особенности функционирования. Приведены источники данных для анализа и методика обработки. В работе были сформулированы и формализованы эвристические критерии аномальности сетевого трафика, которые сигнализируют о наличии возможных атак на сеть, также выделены датасеты по сетевой активности различных протоколов прикладного уровня. Для полученных наборов данных были рассчитаны статистические показатели, на основе которых получена информация об аномальной сетевой активности в течение двух лет. В работе проверен предложенный ранее авторами метод сравнения рисков киберугроз для различных временных интервалов, показавший существенное увеличение рисков для 50 % показателей в 2022 г. Сравнение месячных интервалов за различные годы показало аналогичное увеличение риска. Таким образом, метод доказал свою работоспособность и может применяться в других областях, в которых существуют группы критериев независимых показателей. Авторы привели планы по дальнейшему развитию методики анализа сетевой активности.

Ключевые слова: интернет, сетевая безопасность, анализ сетевого трафика, киберугрозы, корпоративная сеть.

Analysis of corporate network cyber threats based on parallel processing of Netflow data

D. D. Kononov^{*}, S. V. Isaev

Institute of Computational Modelling of SB RAS
50/44, Akademgorodok St., Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
^{*}E-mail: ddk@icm.krasn.ru

Public services of various organizations are subject to constant cyber attacks, which increases information security risks. Network traffic analysis is an important task to ensure the safe operation of network infrastructure, including corporate networks. This paper provides an overview of the main approaches for analyzing network traffic, provides related works, and points out the shortcomings of existing works. One method is to analyze network traffic data using the Netflow protocol, which allows traffic data to be stored at the L3 layer of the OSI model. A feature of the study is the use of long observation periods. When storing data over long time intervals, the logs become large, which requires parallelization for primary data processing. The authors developed a cross-platform software package for distributed processing of network activity logs, which was used to analyze the network activity of the corporate network of the Krasnoyarsk Scientific Center for 2021–2022. A diagram of the software package is shown, its capabilities and operating features are described. Data sources for analysis and processing methods are provided. In this paper the authors formulated and formalized heuristic criteria for the anomaly of network traffic, which identify the presence of possible network attacks, and extracted datasets on the network activity of various application-level protocols. For the obtained data sets, statistical indicators were calculated, information about anomalous network activity was obtained for two years. In this work we tested the previously proposed method for comparing the cyber threats risks for different time intervals, which showed a significant increase in risks for 50% of indicators in 2022. Comparisons of monthly intervals over different years showed similar increases in risk. Thus, the method has shown its efficiency and can be used in other areas in which there are groups of criteria for independent indicators. The authors proposed plans for further development of methods for analyzing network activity.

Keywords: Internet, network security, network traffic analysis, risk assessment, cyber threats, corporate network.

Введение

В настоящее время информационные технологии используются повсеместно для организации работы различных сервисов, в том числе корпоративных. Доступные публично сервисы подвержены рискам информационной безопасности, что требует организации комплексных мер по защите информации. Одним из важных частей обеспечения информационной безопасности является мониторинг и анализ сетевой активности (НТА – Network traffic analysis), который позволяет обнаружить аномалии в работе сети, идентифицировать причину (внешнюю или внутреннюю) и принять соответствующие меры. Анализ сетевой активности является актуальной задачей и применяется в различных областях. Например, анализ сетевой активности устройств IoT позволяет идентифицировать их тип [1] и выявлять проблемы безопасности [2]. Часто разрозненность стандартов и методик сбора и анализа сетевого трафика не позволяют воспроизвести результаты. Некоторые авторы предпринимают попытки создания универсальных форматов и программного обеспечения для анализа трафика [3]. Несмотря на то, что автоматизация процессов обработки и анализа трафика позволяет снизить количество рутинных операций, выявление аномалий с помощью человека-оператора представляет проблему из-за большого объема данных. Представляют интерес методики машинного обучения для выявления аномалий сетевой активности [4; 5]. Применение различных методик анализа и выявления особенностей трафика используется для мобильных устройств [6], в частности, анализ зашифрованного трафика позволяет с высокой

точностью определять используемые мобильные приложения [7]. Таким образом, анализ сетевой активности позволяет получить множество полезной информации, которая может быть использована для улучшения производительности и защищенности информационных систем, в том числе сервисов корпоративных сетей.

Важной частью обеспечения информационной безопасности является оценка рисков киберугроз. Применение различных методик анализа сетевого трафика позволяет выявлять аномалии сетевой активности, что дает возможность оценить риски киберугроз, которым подвержена сетевая инфраструктура. Оценка рисков может проводиться на различных временных интервалах, поэтому необходимо иметь возможность оценить динамику изменения рисков киберугроз.

Смежные работы

Анализ сетевого трафика позволяет выявлять аномалии в работе сетевой инфраструктуры. Методы выявления аномалий сетевого трафика можно разделить на три категории: неконтролируемые, контролируемые, частично контролируемые. Неконтролируемые методы достаточно распространены и не требуют предварительной подготовки данных. Предполагается, что нормальные данные встречаются в датасетах чаще аномальных [8]. Контролируемые методы предполагают построение моделей с разделением данных на две категории: нормальные и аномальные. Анализируемые данные сравниваются с помощью двух моделей, делается вывод о принадлежности данных к определенной категории [9]. Частично контролируемые методы предполагают построение модели только для нормальных данных [10] и являются более простыми и распространенными, чем контролируемые модели.

Одними из самых часто используемых методов анализа является кластерный анализ и методы классификации. Кластерный анализ предполагает разбиение свойств и атрибутов данных на кластеры, из которых выделяют нормальное и аномальное поведение [11]. Как правило, большие кластеры являются нормой, а малые аномалией. Методы классификации используются для разделения данных на заранее известные категории, их можно разделить на следующие виды: метод опорных векторов (SVM), нейросети, дерево решений, статистические методы. Одним из видов классификации с использованием контролируемого обучения является метод опорных векторов (SVM – support vector machine), который используется для обучения и тестирования большого объема данных. В работе [12] метод SVM применен для анализа трафика, достигнута высокая точность сопоставления. Нейросетевые методы используют модель нейронов со связями, которые преобразуют входной сигнал в выходной. Метод является распространенным и используется, например, для выявления злонамеренного трафика [13] и построения систем обнаружения вторжения (IDS – intrusion detections systems) [14]. Методы дерева решений позволяют построить дерево, состоящее из листьев, узлов и ребер, которое может быть использовано для многоступенчатой классификации данных. В работе [15] показана его высокая эффективность при анализе вредоносного трафика устройств IoT. Статистические методы основаны на теореме Байеса: если известен класс, возможно предсказать атрибуты; если класс неизвестен, правила могут определить класс на основе имеющихся атрибутов. В работе [16] байесовская сеть используется для анализа трафика и обеспечения безопасности облачных сервисов.

Важным компонентом при защите информационных систем и сетей передачи данных является оценка рисков киберугроз. Методы оценки рисков бывают количественные и качественные [17]. Количественные методы оперируют числовыми показателями, в то время как качественные методы – фиксированными категориями «высокий риск», «средний риск», «низкий риск». Как правило, качественные методы являются субъективными и полагаются на экспертные оценки, в то время как количественные являются объективными и позволяют воспроизвести результат. Существуют различные методы оценки риска киберугроз [18]. В работе [19] авторы используют различные модели количественного метода оценки рисков кибербезопасности облачных вычислений. Также применяются гибридные модели оценки рисков, комбинируют различные подходы [20]. Оценка рисков информационной безопасности применяется в различных областях:

индустриальные сети [21], системы управления Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) [22], устройства «интернета вещей» (IoT) [23]. Некоторые исследователи рассматривают оценку рисков как комплексную задачу, которая включает функциональную безопасность, физическую безопасность и кибербезопасность [24].

Существующие работы используют различных подходы к анализу трафика и оценке рисков киберугроз. Например, авторы разрабатывают новую методику и используют стандартные тестовые датасеты, что не позволяет оценить эффективность метода на реальной сетевой инфраструктуре. Другие авторы используют реальные данные с короткими временными интервалами, что не позволяет сделать глубокий анализ и выявить динамику происходящих процессов. В данной работе проводится исследование безопасности корпоративной сети Красноярского научного центра (ФИЦ КНЦ СО РАН) на основе анализа сетевого трафика Netflow. В работе описано применение предложенного ранее авторами статистического метода сравнения рисков киберугроз [25]. В отличие от существующих работ, метод использует длительные временные интервалы при анализе реального сетевого трафика и позволяет сравнить риски киберугроз на произвольных интервалах.

Источник данных и методика обработки

Источником данных для анализа являются данные сетевой активности Netflow пограничного маршрутизатора и прокси-сервера корпоративной сети Красноярского научного центра за 2021–2022 гг. (объем 680 Гб, 19,5 млрд записей). Обработка данных производится в несколько этапов: 1) сбор статистики сетевых интерфейсов с помощью агентов nfcapd; 2) извлечение данных с помощью утилиты nfdump; 3) фильтрация и агрегирование необходимых полей на основе заданных правил; 4) сохранение полученных данных для анализа; 5) применение статистического анализа.

Обработка данных выполняется с помощью разработанного авторами программного комплекса распределенной обработки сетевой активности GNetProc на языке Go. Программный комплекс состоит из нескольких частей: клиент, брокер сообщений, вычислительный кластер (рис. 1).

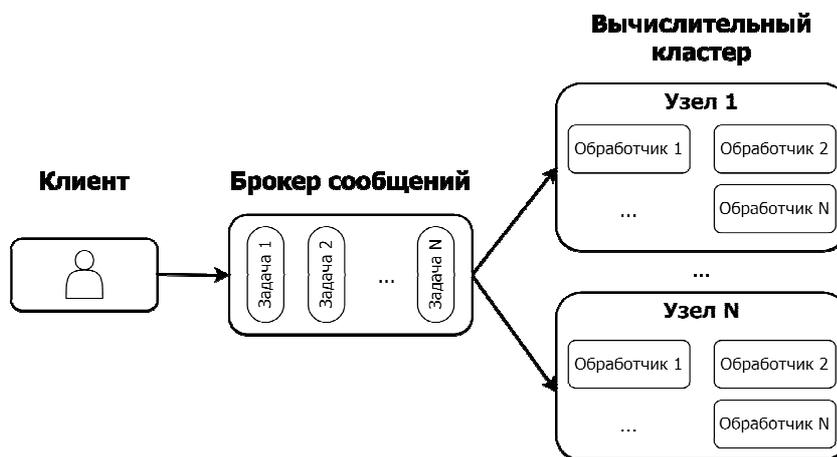


Рис. 1. Архитектура GNetProc

Fig. 1. GNetProc software architecture

Клиентская часть взаимодействует с брокером сообщений и позволяет отправлять задания на обработку в общую очередь заданий, серверная часть извлекает задание из очереди и запускает обработку с помощью обработчиков (workers). Серверная часть состоит из множества узлов вычислительного кластера, каждый узел может запускать несколько обработчиков (workers) параллельно, что обеспечивает параллельную обработку данных и позволяет умень-

шить время выполнения заданий. Обработчик обращается к брокеру сообщений, получает новое задание, запускает его на выполнение, сохраняет результаты обработки, затем получает новое задание. Задание состоит из списка элементов <имя, значение>, которые включают источник данных, приемник данных, тип задания, параметры агрегации, начало и окончание временных интервалов, фильтр и селектор данных. Фильтр посредством специального языка позволяет задавать набор правил для фильтрации данных. Селектор задает список полей, которые после фильтрации и агрегации будут извлечены и записаны как результат выполнения задания. Брокер сообщений использует СУБД Redis для обработки очереди заданий. Для описания заданий используется язык YAML. Программный комплекс является кросс-платформенным и поддерживает работу в гетерогенных конфигурациях с операционными системами Linux, *BSD, Windows.

Анализ данных

Для оценки уровня риска киберугроз на основании принципов нормального функционирования различных протоколов были сформулированы эвристические критерии аномальности трафика:

1. Входящие потоки TCP, имеющие менее 4-х пакетов, свидетельствует о том, что TCP-соединение не было завершено регламентированным способом. Подозрение на DoS-атаку.
2. Входящие потоки TCP длительностью 0 свидетельствует о том, что TCP-соединение не было установлено. Подозрение на DoS-атаку.
3. Большое количество входящих UDP потоков – подозрение на DDoS атаку.
4. Превышение количества входящих UDP потоков над исходящими – подозрение на DoS-атаку.
5. Превышение количества входящих TCP потоков над исходящими – подозрение на DoS-атаку.
6. Входящие потоки TCP и UDP на неиспользуемые, но маршрутизируемые адреса, – подозрение на сканирование уязвимостей (Unused).
7. Входящие потоки TCP на распространенные сервисы (MSSQL, MySQL, RDP, SMB, SMTP, SSH, Telnet) – попытки несанкционированного входа.

Эти критерии были формализованы в виде правил системы обработки первичного трафика согласно заданному синтаксису. После обработки первичных данных с помощью созданного ПО были получены агрегированные данные для дальнейшего анализа. Каждый набор данных представляет собой совокупность пар <метка времени, интегральная характеристика>. Типичный набор данных за год состоит из 105 тыс. записей (количество пятиминутных интервалов в году) и может быть обработан средствами настольных систем, таких как MS Excel. На рис. 2 представлена диаграмма количества потоков нулевой длительности за 2022 г. Аномальные значения не имеют выраженной периодичности, на несколько порядков превышают среднее значение (35256), за счет чего можно автоматизировать их выявление.

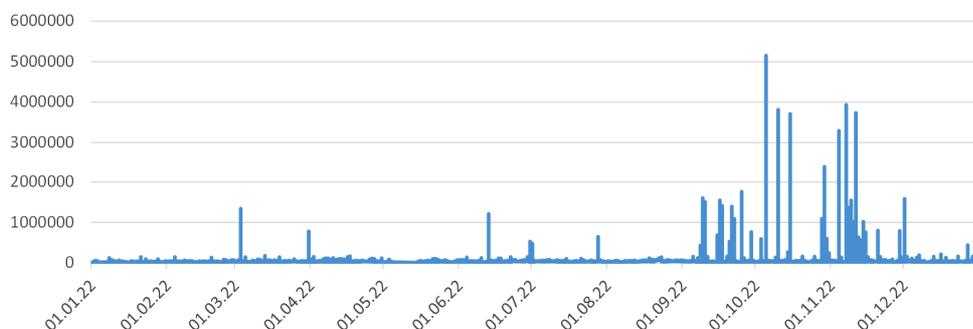


Рис. 2. Количество TCP-потоков нулевой длительностью

Fig. 2. Number of TCP flows with zero duration

Полученное распределение имеет явно выраженную правую асимметрию, удовлетворяется следующее условие:

$$Mode < Median < Mean.$$

На рис. 3 представлена гистограмма распределения частот ТСР-потоков длительностью 0 с. Более 99 % выборки содержится в интервале $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$, что позволяет идентифицировать киберугрозы на основе данных выбросов.

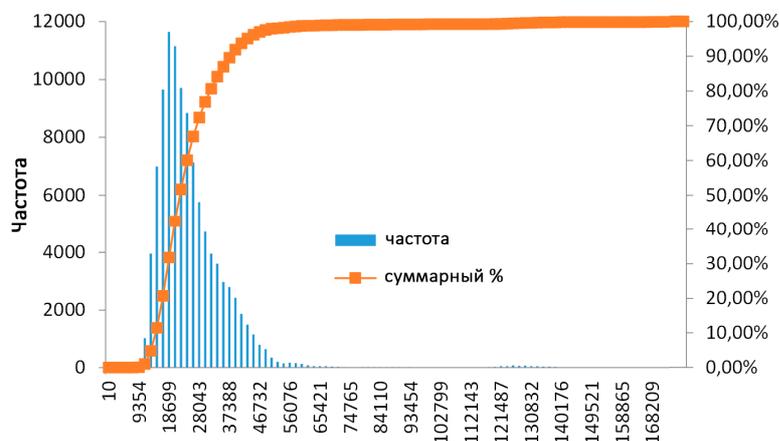


Рис. 3. Гистограмма распределения частот ТСР-потоков длительностью 0

Fig. 3. Histogram of frequency distribution of TCP flows with zero duration

Для всех полученных наборов данных были рассчитаны показатели: среднее, мода, медианы, стандартное отклонение и процент выбросов со значениями больше 3 стандартных отклонений от среднего. Дополнительно было рассчитано относительное увеличение стандартного отклонения показателей в 2022 г. по сравнению с 2021 г. Результаты представлены в таблице: Mean – среднее по выборке μ ; S – стандартное отклонение σ ; Me – медиана выборки; Mo – мода выборки; P – процент данных, лежащих за пределами диапазона $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$; ΔS – относительный прирост S в 2022 г. относительно 2021 г.

Результаты показателей, рассчитанные по критериям аномальности трафика

Название	2021 г.					2022 г.					$\Delta S, \%$
	Mean	S	Me	Mo	P, %	Mean	S	Me	Mo	P, %	
ТСР-потоки длит. 0	25205	8343	22079	18975	2,15	35257	14301	29059	22951	1,13	71
ТСР-потоки < 4 пакетов	34906	11608	30188	27535	2,35	45287	17732	37461	35331	1,02	53
UDP-потоки	15071	5809	13541	13217	2,62	17221	6069	15589	13965	2,95	4
UDP (вход-выход)	1878	2114	1678	1532	2,08	3511	2428	3175	1325	1,90	15
TCP (вход-выход)	16759	8751	14846	12540	2,06	26087	11707	21363	16602	1,42	34
Неисп. TCP	20615	6357	18662	15287	2,30	22035	6736	20457	15148	0,98	6
Неисп. UDP	965	500	762	376	1,82	1519	1184	862	454	4,24	137
MSSQL	128	63	93	87	7,01	96	30	82	82	3,93	-52
MySQL	21	19	10	3	2,93	32	31	13	5	4,25	63
RDP	105	66	78	39	3,97	120	80	84	40	4,27	21
SMB	367	267	190	128	3,33	224	128	154	129	7,84	-52
SMTP	190	80	166	139	3,88	195	95	162	104	2,98	19
SSH	281	160	197	141	4,19	494	389	270	226	4,02	143
Telnet	405	70	384	363	4,10	922	259	953	1151	0,17	270

Все распределения, кроме Telnet 2022, обладают правосторонней асимметрией. Набор данных Telnet 2022 имеет два максимума гистограммы, что связано с перенастройкой оборудования сбора данных. На рис. 4 показаны гистограммы за 2021 и 2022 гг.

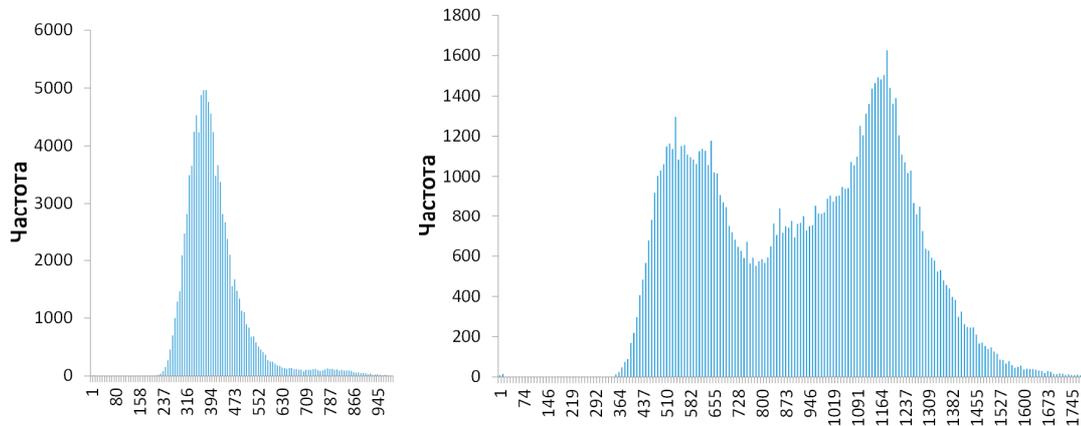


Рис. 4. Гистограмма наборов Telnet за 2021 и 2022 гг.

Fig. 4. Histogram of Telnet datasets for 2021 and 2022

Среднеквадратическое отклонение для большинства наборов данных за 2022 г. имеет существенное увеличение по сравнению с 2021 г., что свидетельствует об увеличении меры неопределенности появления различных компьютерных атак. Применяя метод сравнения рисков, описанный в [25] для выборок 2021 (V_1) и 2022 (V_2) гг., вычислим функцию R оценки изменения рисков:

$$R(V_1, V_2) = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N K_i,$$

$$\text{где } K_i = \begin{cases} 1, & \text{если } \mu_{2i} > \mu_{1i} + 0,6745 * \sigma_{1i}, \\ 0, & \text{если } \mu_{1i} - 0,6745 * \sigma_{1i} \leq \mu_{2i} \leq \mu_{1i} + 0,6745 * \sigma_{1i}, \quad \mu_{ji} - \text{среднее значение выборки } i\text{-го} \\ -1, & \text{если } \mu_{2i} < \mu_{1i} - 0,6745 * \sigma_{1i}; \end{cases}$$

признака выборки V_j ; σ_{ji} – среднеквадратическое отклонение выборки i -го признака выборки V_j .

Половина из исследуемых показателей дает 1 в сумму, остальные дают 0, в результате $R(2021, 2022) = 0,5$. Это можно проинтерпретировать таким образом: риск в рамках исследуемых критериев в целом в 2022 г. по сравнению с 2021 г. существенно вырос – на 50 % показателей. При сравнении интервалов за март 2021 г. и март 2022 г. мы получаем значение $R = 0,43$. Таким образом, предложенный метод позволяет сравнивать риски как на больших временных интервалах (год), так и на средних, при условии наличия достаточной выборки.

Заключение

В работе исследованы риски кибератак на основе данных интернет-трафика сети Красноярского научного центра СО РАН за 2021 и 2022 гг. Разработано кросс-платформенное программное обеспечение для обработки больших объемов данных, которое обладает возможностями масштабирования с помощью параллельной обработки и может выполнять анализ данных в режиме реального времени. Сформулированы и формализованы эвристические критерии аномальности интернет-трафика, сигнализирующие о возможных атаках на сеть. Рассчитаны статистические показатели для полученных наборов данных, на основе которых сделаны выводы о форме распределений и динамике атак. Проверен предложенный авторами метод сравнения рисков киберугроз для годовых и месячных интервалов, который показал схожее увеличение

рисков. Так как метод не зависит от сравниваемых временных интервалов и объема выборок, он может использоваться в других областях, в которых существуют группы критериев независимых показателей. Следующей задачей является расширение критериев анализа с учётом флагов ТСП-соединения и протоколов прикладного уровня с учётом логики их функционирования. Планируется использование разработанного программного обеспечения при создании наборов данных для методов машинного обучения при решении задач идентификации киберугроз.

Библиографические ссылки

1. Shahid M. R., Blanc G., Zhang Z., and Debar H. IoT Devices Recognition Through Network Traffic Analysis // 2018 IEEE International Conference on Big Data (Big Data). 2018. P. 5187–5192.
2. Sairam R., Bhunia S. S., Thangavelu V., Gurusamy M. NETRA: Enhancing IoT security using NFV-based edge traffic analysis // IEEE Sensors Journal. 2019. No. 19(12). P. 4660–4671.
3. Towards Reproducible Network Traffic Analysis / J. Holland, P. Schmitt, P. Mittal, N. Feamster // arXiv preprint arXiv:2203.12410 p.
4. Alqudah N., Yaseen Q. Machine learning for traffic analysis: a review // Procedia Computer Science. 2020. Vol. 170. P. 911–916.
5. Abbasi M., Shahraki A., Taherkordi A. Deep learning for network traffic monitoring and analysis (NTMA): A survey // Computer Communications. 2021. Vol. 170. P. 19–41.
6. The dark side (-channel) of mobile devices: A survey on network traffic analysis / M. Conti, Q. Q. Li, A. Maragno, R. Spolaor // IEEE communications surveys & tutorials. 2018. No. 20(4). P. 2658–2713.
7. Robust smartphone app identification via encrypted network traffic analysis / V. F. Taylor, R. Spolaor, M. Conti, I. Martinovic // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. 2017. Vol. 13(1). P. 63–78.
8. Goldstein M., Uchida S. A comparative evaluation of unsupervised anomaly detection algorithms for multivariate data // PloS one. 2016. Vol. 11(4). P.e0152173.
9. Garg R., Mukherjee S. A comparative study using supervised learning for anomaly detection in network traffic // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2161, No. 1. P. 012030.
10. Comparison of supervised, semi-supervised and unsupervised learning methods in network intrusion detection system (NIDS) application / N. S. Arunraj, R. Hable, M. Fernandes et al. // Anwendungen und Konzepte der Wirtschaftsinformatik. 2017. No. 6. P. 10–19.
11. Zhang P., Ma W., Qian S. Cluster analysis of day-to-day traffic data in networks // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2022. Vol. 144. P. 103882.
12. Retracted: Traffic identification and traffic analysis based on support vector machine / W. Zhongsheng, W. Jianguo, Y. Sen, G. Jiaqiong // Concurrency and Computation: Practice and Experience. 2020. Vol. 32(2). P. e5292.
13. Malicious network traffic detection based on deep neural networks and association analysis / M. Gao, L. Ma, H. Liu et al. // Sensors. 2020. Vol. 20(5). P. 1452.
14. Vinayakumar R., Soman K. P., Poornachandran P. Evaluation of recurrent neural network and its variants for intrusion detection system (IDS) // International Journal of Information System Modeling and Design (IJISMD). 2017. Vol. 8(3). P. 43–63.
15. Comparing Malware Attack Detection using Machine Learning Techniques in IoT Network Traffic / Y. Z. Wei, M. Md-Arshad, A. A. Samad, N. Ithnin // International Journal of Innovative Computing. 2023. Vol. 13(1). P. 21–27.
16. Nie L., Jiang D., Lv Z. Modeling network traffic for traffic matrix estimation and anomaly detection based on Bayesian network in cloud computing networks // Annals of Telecommunications. 2017. Vol. 72. P. 297–305.
17. Landoll D. The security risk assessment handbook: A complete guide for performing security risk assessments // CRC Press. 2021.

18. Macek D., Magdalenic I., Redep N. B. A systematic literature review on the application of multicriteria decision making methods for information security risk assessment // *International Journal of Safety and Security Engineering*. 2020. Vol. 10, No. 2. P. 161–174.
19. Jouini M., Rabai L. B. A. Comparative study of information security risk assessment models for cloud computing systems // *Procedia Computer Science*. 2016. Vol. 83. P. 1084–1089.
20. Haji S., Tan Q., Costa R. S. A hybrid model for information security risk assessment // *Int. j. adv. trends comput. sci. eng.* 2019. ART-2019-111611.
21. Summary of research on IT network and industrial control network security assessment / L. Hu, H. Li, Z. Wei et al. // 2019 IEEE 3rd information technology, networking, electronic and automation control conference (ITNEC). 2019. P. 1203–1210.
22. A review of cyber security risk assessment methods for SCADA systems / Y. Cherdantseva, P. Burnap, A. Blyth et al. // *Computers & security*. 2016. Vol. 56. P. 1–27.
23. Mahak M., Singh Y. Threat modelling and risk assessment in internet of things: A review // *Proceedings of Second International Conference on Computing, Communications, and Cyber-Security: IC4S 2020, 2021*. Springer Singapore. P. 293–305.
24. Lyu X., Ding Y., Yang S. H. Safety and security risk assessment in cyber-physical systems // *IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications*, 2019. Vol. 4(3). P. 221–232.
25. Исаев С. В., Кононов Д. Д. Исследование динамики и классификация атак на веб-сервисы корпоративной сети // *Сибирский аэрокосмический журнал*. 2022. Т. 23, № 4. С. 593–600.

References

1. Shahid M. R., Blanc G., Zhang Z., Debar H. IoT Devices Recognition Through Network Traffic Analysis. *2018 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*. 2018, P. 5187–5192.
2. Sairam R., Bhunia S. S., Thangavelu V., Gurusamy M. NETRA: Enhancing IoT security using NFV-based edge traffic analysis. *IEEE Sensors Journal*. 2019, Vol. 19(12), P. 4660–4671.
3. Holland J., Schmitt P., Mittal P., Feamster N. Towards Reproducible Network Traffic Analysis. *arXiv preprint arXiv:2203.2022*, P. 12410.
4. Alqudah N., Yaseen Q. Machine learning for traffic analysis: a review. *Procedia Computer Science*. 2020, Vol. 170, P. 911–916.
5. Abbasi M., Shahraki A., and Taherkordi A. Deep learning for network traffic monitoring and analysis (NTMA): A survey. *Computer Communications*. 2021, Vol. 170, P. 19–41.
6. Conti M., Li Q. Q., Maragno A., Spolaor R. The dark side (-channel) of mobile devices: A survey on network traffic analysis. *IEEE communications surveys & tutorials*. 2018, Vol. 20(4), P. 2658–2713.
7. Taylor V. F., Spolaor R., Conti M., Martinovic I. Robust smartphone app identification via encrypted network traffic analysis. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*. 2017, Vol. 13(1), P. 63–78.
8. Goldstein M., and Uchida S. A comparative evaluation of unsupervised anomaly detection algorithms for multivariate data. *PloS one*. 2016, Vol. 11(4), P. e0152173.
9. Garg R., Mukherjee S. A comparative study using supervised learning for anomaly detection in network traffic. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022, Vol. 2161, No. 1, P. 012030.
10. Arunraj N. S., Hable R., Fernandes M., Leidl K., Heigl M. Comparison of supervised, semi-supervised and unsupervised learning methods in network intrusion detection system (NIDS) application. *Anwendungen und Konzepte der Wirtschaftsinformatik*. 2017, No. 6, P. 10–19.
11. Zhang P., Ma W., Qian S. Cluster analysis of day-to-day traffic data in networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2022, Vol. 144, P. 103882.
12. Zhongsheng W., Jianguo W., Sen Y., Jiaqiong G. Retracted: Traffic identification and traffic analysis based on support vector machine. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*. 2020, Vol. 32(2), P. e5292.

13. Gao M., Ma L., Liu H., Zhang Z., Ning Z., Xu J. Malicious network traffic detection based on deep neural networks and association analysis. *Sensors*. 2020, Vol. 20(5), P. 1452.
14. Vinayakumar R., Soman K. P., Poornachandran P. Evaluation of recurrent neural network and its variants for intrusion detection system (IDS). *International Journal of Information System Modeling and Design (IJISMD)*. 2017, Vol. 8(3), P. 43–63.
15. Wei Y. Z., Md-Arshad M., Samad A. A., Ithnin N. Comparing Malware Attack Detection using Machine Learning Techniques in IoT Network Traffic. *International Journal of Innovative Computing*. 2023, Vol. 13(1), P. 21–27.
16. Nie L., Jiang D., Lv Z. Modeling network traffic for traffic matrix estimation and anomaly detection based on Bayesian network in cloud computing networks. *Annals of Telecommunications*. 2017, Vol. 72, P. 297–305.
17. Landoll D. The security risk assessment handbook: A complete guide for performing security risk assessments. *CRC Press*, 2021.
18. Macek D., Magdalenic I., Redep N. B. A systematic literature review on the application of multicriteria decision making methods for information security risk assessment. *International Journal of Safety and Security Engineering*. 2020, Vol. 10, No. 2, P. 161–174.
19. Jouini M., Rabai L. B. A. Comparative study of information security risk assessment models for cloud computing systems. *Procedia Computer Science*. 2016, 83, P. 1084–1089.
20. Haji S., Tan Q., Costa R.S. A hybrid model for information security risk assessment. *Int. j. adv. trends comput. sci. eng.* 2019, ART-2019-111611.
21. Hu L., Li H., Wei Z., Dong S., Zhang Z. Summary of research on IT network and industrial control network security assessment. *2019 IEEE 3rd information technology, networking, electronic and automation control conference (ITNEC)*. 2019, P. 1203–1210.
22. Cherdantseva Y., Burnap P., Blyth A., Eden P., Jones K., Soulsby H., Stoddart K. A review of cyber security risk assessment methods for SCADA systems. *Computers & security*. 2016, Vol. 56, P. 1–27.
23. Mahak M., Singh Y. Threat modelling and risk assessment in internet of things: A review. *Proceedings of Second International Conference on Computing, Communications, and Cyber-Security: IC4S 2020*. 2021, Springer Singapore, P. 293–305.
24. Lyu X., Ding Y., Yang S. H. Safety and security risk assessment in cyber-physical systems. *IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications*. 2019, Vol. 4(3), P. 221–232.
25. Isaev S. V., Kononov D. D. A study of dynamics and classification of attacks on corporate network web services. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 4, P. 593–601.

© Кононов Д. Д., Исаев С. В., 2023

Кононов Дмитрий Дмитриевич – научный сотрудник; Институт вычислительного моделирования СО РАН. E-mail: ddk@icm.krasn.ru.

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

Kononov Dmitry Dmitrievich – scientific researcher; Institute of Computational Modelling SB RAS. E-mail: ddk@icm.krasn.ru.

Isaev Sergey Vladislavovich – Cand. Sc., associate professor, head of the Department of Information and Telecommunication Technologies; Institute of Computational Modelling SB RAS. E-mail: si@icm.krasn.ru.

УДК 519.6

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-673-680

Для цитирования: Кузнецов А. А., Кузнецова А. С., Кишкан В. В. Алгоритм быстрого умножения элементов в 2-группах на основе полиномов Жегалкина // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 4. С. 673–680. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-673-680.

For citation: Kuznetsov A. A., Kuznetsova A. S., Kishkan V. V. [An algorithm for fast multiplication of elements in 2-groups based on the Zhegalkin polynomials]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 4, P. 673–680. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-673-680.

Алгоритм быстрого умножения элементов в 2-группах на основе полиномов Жегалкина

А. А. Кузнецов*, А. С. Кузнецова, В. В. Кишкан

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

*E-mail: alex_kuznetsov80@mail.ru

Проектирование сети многопроцессорной вычислительной системы или дата-центра представляет собой важную проблему, в рамках которой осуществляется поиск моделей графов, обладающих привлекательными топологическими свойствами и позволяющих применять эффективные алгоритмы маршрутизации. Указанными свойствами, в частности такими, как высокая симметрия, иерархическая структура, рекурсивная конструкция, высокая связность и отказоустойчивость, обладают графы Кэли. Например, такие базовые топологии сети, как «кольцо», «гиперкуб» и «тор», являются графами Кэли.

Определение графа Кэли подразумевает, что вершины графа являются элементами некоторой алгебраической группы. Выбор группы и ее порождающих элементов позволяет получить граф, отвечающий необходимым требованиям по диаметру, степени вершин, количеству узлов и т. д. Решению данной задачи посвящено большое количество научных статей и монографий.

Для исследования графов Кэли, в первую очередь, необходимо разработать быстрые алгоритмы умножения элементов в данных группах. Такие алгоритмы помогают осуществлять эффективную маршрутизацию на соответствующих графах Кэли.

Цель настоящей работы – создать алгоритм быстрого умножения элементов в конечных 2-группах, т. е. в группах периода 2^n .

В первом разделе статьи дано теоретическое обоснование алгоритма. Показано, что элементы данных групп могут быть представлены в виде битовых строк, а их умножение осуществляется на основе полиномов Жегалкина.

Во втором разделе представлен псевдокод алгоритма, на основе которого вычисляются полиномы Жегалкина. На первом этапе алгоритма вычисляется rs -представление группы, на основе которого получают полиномы Холла. На заключительном этапе полиномы Холла преобразуются в полиномы Жегалкина.

В третьем разделе продемонстрирован пример получения полиномов Жегалкина для двупорожденной группы периода 4.

В заключении рассматриваются перспективы применения алгоритма на реальных вычислительных устройствах. Отмечается, что предложенное представление элементов группы в форме битовых векторов позволяет применять их даже на самых примитивных микроконтроллерах.

Ключевые слова: 2-группа, граф Кэли, полином Жегалкина.

An algorithm for fast multiplication of elements in 2-groups based on the Zhegalkin polynomials

A. A. Kuznetsov*, A. S. Kuznetsova, V. V. Kishkan

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

*E-mail: alex_kuznetsov80@mail.ru

Network design for a multiprocessor computing system or data center is an important problem where the search for graph models that have attractive topological properties and allow the use of efficient routing algorithms is carried out. Cayley graphs have the indicated properties, in particular such as high symmetry, hierarchical structure, recursive design, high connectivity and fault tolerance.

The definition of the Cayley graph implies that the vertices of the graph are elements of some algebraic group. Selecting a group and its generating elements allows us to obtain a graph that meets the necessary requirements for diameter, degree of vertices, number of nodes, etc. A large number of scientific articles and monographs are devoted to solving this problem.

The goal of this work is to create an algorithm for fast multiplication of elements in finite 2-groups whose exponent is 2^n .

The first section of the article provides a theoretical justification for the algorithm for fast multiplication in finite 2-groups. It is shown that elements of these groups can be represented in the form of bit strings, and their multiplication is carried out based on the Zhegalkin polynomials.

The second section presents the pseudocode of the algorithm on the basis of which the Zhegalkin polynomials are calculated.

The third section demonstrates an example of obtaining the Zhegalkin polynomials for a two-generated group of exponent 4.

In conclusion, the prospects for using the algorithm on the real hardware are discussed.

Keywords: 2-group, the Cayley graph, the Zhegalkin polynomial.

Введение

Проектирование сети многопроцессорной вычислительной системы (МВС) или дата-центра представляет собой важную проблему, в рамках которой осуществляется поиск моделей графов, обладающих привлекательными топологическими свойствами и позволяющих применять эффективные алгоритмы маршрутизации. Указанными свойствами, в частности такими, как высокая симметрия, иерархическая структура, рекурсивная конструкция, высокая связность и отказоустойчивость, обладают графы Кэли [1]. Например, такие базовые топологии сети, как «кольцо», «гиперкуб» и «тор», являются графами Кэли.

Определение графа Кэли подразумевает, что вершины графа являются элементами некоторой алгебраической группы. Выбор группы и ее порождающих элементов позволяет получить граф [2], отвечающий необходимым требованиям по диаметру, степени вершин, количеству узлов и т. д. Решению данной задачи посвящено большое количество научных статей и монографий, среди которых выделим работы [3–15].

Как было сказано, одной из широко применяемых топологий МВС является k -мерный гиперкуб. Данный граф задается k -порожденной бернсайдовой группой периода 2. Данная группа имеет простую структуру и равна прямому произведению k экземпляров циклической группы порядка 2. Обобщением гиперкуба является n -мерный тор, который порождается прямым произведением n экземпляров циклических подгрупп, порядка которых могут не совпадать. В статьях [16–19] изучаются графы Кэли бернсайдовых групп периода 3, 4, 5 и 7.

Для исследования графов Кэли, порожденных группами больших периодов, в первую очередь необходимо разработать быстрые алгоритмы умножения элементов в данных группах.

Такие алгоритмы помогают осуществлять эффективную маршрутизацию на соответствующих графах Кэли.

Цель настоящей работы – создать алгоритм быстрого умножения элементов в конечных 2-группах, т. е. в группах периода 2^n .

В первом разделе статьи дано теоретическое обоснование алгоритма быстрого умножения в конечных 2-группах. Показано, что элементы данных групп могут быть представлены в виде битовых строк, а их умножение осуществляется на основе полиномов Жегалкина.

Во втором разделе представлен псевдокод алгоритма, на основе которого вычисляются полиномы Жегалкина.

В третьем разделе продемонстрирован пример получения полиномов Жегалкина для двупорожденной группы периода 4.

В заключении рассматриваются перспективы применения алгоритма на реальных вычислительных устройствах.

1. Доказательство основного результата

Теорема. Пусть G – произвольная конечная группа 2-группа, порядок которой равен 2^n . Тогда будут верны следующие утверждения:

1. $\forall x \in G \Rightarrow x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{Z}_2^n$.
2. $\forall x, y, z \in G: x \cdot y = z \Rightarrow z_i = f_i(x, y) \in \mathbb{Z}_2$, где $f_i(x, y)$ – некоторые полиномы Жегалкина.

Доказательство. Любая конечная 2-группа G имеет рс-представление (power commutator presentation [3; 4]):

$$G = \{a_1, \dots, a_n \mid a_i^2 = v_{ii}, 1 \leq i \leq n, [a_k, a_j] = v_{jk}, 1 \leq j < k \leq n\},$$

где слово v_{jk} при $1 \leq j < k \leq n$ выражается через a_{k+1}, \dots, a_n следующим образом:

$$v_{jk} = a_{k+1}^{x_{k+1}} \dots a_n^{x_n}, x_i \in \mathbb{Z}_2.$$

В этом случае

$$\forall x \in G \Rightarrow x = a_1^{x_1} \dots a_n^{x_n}, x_i \in \mathbb{Z}_2.$$

Каждый элемент группы x единственным образом задается через степени x_1, \dots, x_n , поэтому мы можем записывать элементы группы следующим образом:

$$\forall x \in G \Rightarrow x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{Z}_2^n.$$

Таким образом, мы можем естественным образом представлять элементы группы в виде булевых (битовых) векторов размерности n .

Пусть $x = (x_1, \dots, x_n)$ и $y = (y_1, \dots, y_n)$ – два произвольных элемента группы G , рассмотрим их произведение $x \cdot y = z = (z_1, \dots, z_n)$.

Вычисление степеней z_i традиционно осуществляется на основе собирательного процесса Холла [3; 4]. Однако существует более эффективный способ умножения элементов, основанный на полиномах Холла [20]. В этом случае

$$z_i = x_i + y_i + p_i(x_1, \dots, x_{i-1}, y_1, \dots, y_{i-1}), x_i, y_i, z_i \in \mathbb{Z}_2.$$

Заметим, что операции умножения и сложения в поле \mathbb{Z}_2 тождественны булевым операциям «и», а также исключаящему «или» соответственно. Произведя указанную замену операций в полиномах Холла, мы получим полиномы Жегалкина [21]. Таким образом,

$$\forall x, y, z \in G: x \cdot y = z \Rightarrow z_i = f_i(x, y) \in \mathbb{Z}_2,$$

где $f_i(x, y)$ – некоторые полиномы Жегалкина. ■

2. Алгоритм вычисления полиномов Жегалкина

В данном разделе рассмотрен алгоритм вычисления полиномов Жегалкина для конечной 2-группы G . Алгоритму на входе известны такие параметры группы, как число порождающих элементов, порядок G и её период. Также в качестве входного аргумента может фигурировать степень нильпотентности группы.

Ниже приведен псевдокод алгоритма.

Вход: G – конечная группа 2-группа G

Выход: полиномы Жегалкина для группы G

1. $pc = \text{rq}(G)$ – вычисляем pc -представление группы при помощи p -quotient алгоритма [3, 4]. Заметим, что данный алгоритм уже реализован в таких системах компьютерной алгебры, как GAP и Magma.

2. $H = \text{Hall}(pc)$ – на основе pc -представления вычисляем полиномы Холла при помощи алгоритма из [22].

3. $F = \text{Zhegalkin}(H)$ – получаем полиномы Жегалкина из полиномов Холла путем замены операции умножения и сложения в поле \mathbb{Z}_2 тождественными булевыми операциям «и», а также исключающему «или» соответственно.

3. Пример

В качестве примера рассмотрим максимальную двупорожденную конечную группу $G = \langle a_1, a_2 \rangle$ периода $2^2 = 4$, которую обычно обозначают $B(2, 4)$ или $B_2(4)$. Порядок данной группы равен 2^{12} , и для каждого элемента из G существует уникальное pc -представление вида $a_1^{x_1} \dots a_{12}^{x_{12}}$, где $x_i \in \mathbb{Z}_2$, $i = 1, 2, \dots, 12$. Здесь a_1 и a_2 – порождающие элементы G , a_3, \dots, a_{12} вычисляются рекурсивно через a_1 и a_2 .

Получим в системе компьютерной алгебры GAP pc -представление данной группы.

Для краткости тривиальные коммутаторные соотношения не приводятся (например, такое, как $[a_4, a_1] = 1$ и др.).

$$\begin{aligned} a_1^2 &= a_4, & a_2^2 &= a_5, & a_3^2 &= a_8 a_9 a_{10} a_{11} a_{12}, & a_4^2 &= 1, & a_5^2 &= 1, & a_6^2 &= a_{11}, & a_7^2 &= a_{11} a_{12}, & a_i^2 &= 1 \quad (8 \leq i \leq 12), \\ [a_3, a_1] &= a_6, & [a_3, a_2] &= a_7, & [a_4, a_2] &= a_6 a_8 a_9 a_{10} a_{12}, & [a_4, a_3] &= a_8 a_{11}, & [a_5, a_1] &= a_7 a_8 a_9 a_{10}, \\ [a_5, a_3] &= a_{10} a_{11} a_{12}, & [a_5, a_4] &= a_9 a_{11}, & [a_6, a_1] &= a_8, & [a_6, a_2] &= a_9, & [a_6, a_3] &= a_{11}, & [a_6, a_4] &= a_{11}, \\ [a_6, a_5] &= a_{11}, & [a_7, a_1] &= a_9 a_{12}, & [a_7, a_2] &= a_{10}, & [a_7, a_3] &= a_{11} a_{12}, & [a_7, a_4] &= a_{11} a_{12}, & [a_7, a_5] &= a_{11} a_{12}, \\ [a_8, a_1] &= a_{11}, & [a_8, a_2] &= a_{12}, & [a_9, a_1] &= a_{11} a_{12}, & [a_9, a_2] &= a_{11}, & [a_{10}, a_1] &= a_{12}, & [a_{10}, a_2] &= a_{11} a_{12}. \end{aligned}$$

Вычислим полиномы Холла группы G для порождающих элементов a_1 и a_2 на основе алгоритма из [22]:

$$1) a_1 \cdot a_1^{y_1} \dots a_{12}^{y_{12}} = a_1^{z_1} \dots a_{12}^{z_{12}}, \text{ где}$$

$$z_1 = y_1 + 1,$$

$$z_2 = y_2,$$

$$z_3 = y_3,$$

$$z_4 = y_1 + y_4,$$

$$z_5 = y_5,$$

$$z_6 = y_6 + y_1 y_2,$$

$$z_7 = y_7,$$

$$z_8 = y_8 + y_1 y_2 + y_1 y_3,$$

$$\begin{aligned} z_9 &= y_9 + y_1 y_2, \\ z_{10} &= y_{10} + y_1 y_2, \\ z_{11} &= y_{11} + y_1 y_3 + y_1 y_2 y_3 + y_1 y_2 y_4 + y_1 y_2 y_5 + y_1 y_2 y_6, \\ z_{12} &= y_{12} + y_1 y_2; \end{aligned}$$

$$2) a_2 \cdot a_1^{y_1} \dots a_{12}^{y_{12}} = a_1^{z_1} \dots a_{12}^{z_{12}}, \text{ где}$$

$$\begin{aligned} z_1 &= y_1, \\ z_2 &= y_2 + 1, \\ z_3 &= y_1 + y_3, \\ z_4 &= y_4, \\ z_5 &= y_2 + y_5, \\ z_6 &= y_6, \\ z_7 &= y_7 + y_1 y_2, \\ z_8 &= y_8 + y_1 y_3, \\ z_9 &= y_9 + y_1 y_3 + y_2 y_4, \\ z_{10} &= y_{10} + y_1 y_2 + y_1 y_3 + y_2 y_3, \\ z_{11} &= y_{11} + y_1 y_2 + y_1 y_3 + y_2 y_3 + y_2 y_4 + y_1 y_2 y_3 + y_1 y_2 y_4 + y_1 y_2 y_5 + y_1 y_2 y_7, \\ z_{12} &= y_{12} + y_1 y_2 + y_1 y_3 + y_2 y_3 + y_1 y_2 y_3 + y_1 y_2 y_4 + y_1 y_2 y_5 + y_1 y_2 y_7. \end{aligned}$$

Заменим операции умножения и сложения булевыми операциями «и», а также исключающему «или» соответственно. В результате получим полиномы Жегалкина.

Каждый элемент группы представляет собой битовую строку $(z_1, z_2, \dots, z_{12})$. Таким образом, для кодирования одного элемента в $B(2, 4)$ потребуется 12 бит. В общем случае, если порядок группы равен 2^n , то для хранения одного элемента потребуется n бит.

Заключение

В заключение скажем, что в задачах, требующих вычисления большого количества произведений элементов группы, описанный в работе метод позволит кардинально уменьшить время работы компьютерных программ. Например, одной из таких проблем является задача поиска кратчайших маршрутов на графах Кэли, которые часто применяются при проектировании топологий для сетей межпроцессорного соединения в суперкомпьютерах, а также дата-центрах.

Кроме того, следует отметить, что предложенное представление элементов группы в форме битовых векторов позволяет применять их даже на самых примитивных микроконтроллерах.

Библиографические ссылки

1. Heydemann M. Cayley graphs and interconnection networks, in Graph symmetry: algebraic methods and applications (Editors: Hahnand Sabidussi) // Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 1997. P. 167–226.
2. Loz E. New record graphs in the degree-diameter problem // Australasian Journal of Combinatorics. 2008. Vol. 41. P. 63–80.
3. Sims C. Computation with Finitely Presented Groups. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 628 p.
4. Holt D., Eick B., O'Brien E. Handbook of computational group theory. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC Press, 2005. 514 p.

5. Schibell S., Stafford R. Processor interconnection networks and Cayley graphs // *Discrete Applied Mathematics*. 1992. Vol. 40. P. 337–357.
6. Stamoulis G., Tsitsiklis J. Efficient routing Scheme for Multiple Broadcasts in Hypercubes // *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*. 1993. Vol. 4(7). P. 725–739.
7. Stamoulis G., Tsitsiklis J. The Efficiency of Greedy Routing in Hypercubes and Butterflies // *IEEE Transaction on Communication*. 1994. Vol. 42(11). P. 3051–3061.
8. Kiasari A., Sarbazi-Azad H. Analytic performance comparison of hypercubes and star graphs with implementation constraints // *Journal of Computer and System Sciences*. 2008. No. 6. P. 1000–1012.
9. Akers S., Krishnamurthy B. A group theoretic model for symmetric interconnection networks // *Proceedings of the International Conference on Parallel Processing*. 1986. P. 216–223.
10. Tang K., Arden B. Vertex-transitivity and routing for Cayley graphs in GCR representations // *Proceedings of ACM Symposium on Applied Computing SAC*. 1992. P. 1180–1187.
11. Wang L., Tang K. Topology-Based Routing for Xmesh in Wireless Sensor Networks // *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2009. Vol. 44. P. 229–239.
12. Ryu J., Noel E., Tang K. Fault-tolerant Routing on Borel Cayley Graph // *IEEE ICC Next Generation Networking Symposium*. 2012. P. 2872–2877.
13. On the feasibility of completely wireless datacenters / J. Shin, E. Sirer, H. Weatherspoon, D. Kirovski // *IEEE/ACM Transaction On Networking*. 2013. Vol. 21(5). P. 1666–1679.
14. Кузнецов А. А., Кузнецова А. С. Параллельный алгоритм для исследования графов Кэли групп подстановок // *Вестник СибГАУ*. 2014. № 1(53). С. 34–39.
15. Efficient Routing in Data Center with Underlying Cayley Graph / M. Camelo, D. Papadimitriou, L. Fabrega, P. Vila // *Proceedings of the 5th Workshop on Complex Networks CompleNet*. 2014. P. 189–197.
16. Кузнецов А. А. Графы Кэли бернсайдовых групп периода 3 // *Сибирские электронные математические известия*. 2015. Т. 12. С. 248–254.
17. Кузнецов А. А., Кузнецова А. С. Перспективные топологии многопроцессорных вычислительных систем, основанные на графах Кэли, заданных группами периода 4 // *Вестник СибГАУ*. 2016. № 3(17). С. 575–578.
18. Кузнецов А. А. Об одном алгоритме вычисления функций роста в конечных двупорожденных группах периода пять // *Прикладная дискретная математика*. 2016. № 3(33). С. 116–125.
19. Kuznetsov A. A., Kishkan V. V. The Cayley graphs of finite two-generator burnside groups of exponent 7 // *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018. № 2. P. 217–222.
20. Hall P. Nilpotent groups, Notes of lectures given at the Canadian Mathematical Congress 1957 Summer Seminar, in *The collected works of Philip Hall*. Oxford: Clarendon Press, 1988. P. 415–462.
21. Яблонский С. В. Введение в дискретную математику. М. : Наука, 1986. 384 с.
22. Кузнецов А. А., Кузнецова А. С. Быстрое умножение элементов в конечных двупорожденных группах периода пять // *Прикладная дискретная математика*. 2013. № 1 (18). С. 110–116.

References

1. Heydemann M. Cayley graphs and interconnection networks, in *Graph symmetry: algebraic methods and applications* (Editors: Hahnand Sabidussi). *Dordrecht: Kluwer Academic Publishers*. 1997, P. 167–226.
2. Loz E. New record graphs in the degree-diameter problem. *Australasian Journal of Combinatorics*. 2008, Vol. 41, P.63–80.
3. Sims C. *Computation with Finitely Presented Groups*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994, 628 p.
4. Holt D., Eick B., O'Brien E. *Handbook of computational group theory*. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC Press, 2005, 514 p.

5. Schibell S., Stafford R. Processor interconnection networks and Cayley graphs. *Discrete Applied Mathematics*. 1992, Vol. 40, P. 337–357.
6. Stamoulis G., Tsitsiklis J. Efficient routing Scheme for Multiple Broadcasts in Hypercubes. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*. 1993, Vol. 4(7), P. 725–739.
7. Stamoulis G., Tsitsiklis J. The Efficiency of Greedy Routing in Hypercubes and Butterflies. *IEEE Transaction on Communication*. 1994, Vol. 42(11), P. 3051–3061.
8. Kiasari A., Sarbazi-Azad H. Analytic performance comparison of hypercubes and star graphs with implementation constraints. *Journal of Computer and System Sciences*. 2008, No. 6, P. 1000–1012.
9. Akers S., Krishnamurthy B. A group theoretic model for symmetric interconnection networks. *Proceedings of the International Conference on Parallel Processing*. 1986, P. 216–223.
10. Tang K., Arden B. Vertex-transitivity and routing for Cayley graphs in GCR representations. *Proceedings of ACM Symposium on Applied Computing SAC*. 1992, P. 1180–1187.
11. Wang L., Tang K. Topology-Based Routing for Xmesh in Wireless Sensor Networks. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2009. Vol.44. P. 229–239.
12. Ryu J., Noel E., and Tang K. Fault-tolerant Routing on Borel Cayley Graph // *IEEE ICC Next Generation Networking Symposium*. 2012, P. 2872–2877.
13. Shin J., Siner E., Weatherspoon H., Kirovski D. On the feasibility of completely wireless data-centers. *EEE/ACM Transaction On Networking*. 2013, Vol. 21(5), P. 1666–1679.
14. Kuznetsov A. A., Kuznetsova A. S. [A parallel algorithm for study of the Cayley graphs of permutation groups]. *Vestnik SibGAU*. 2014, No. 1(53), P. 34–39 (In Russ.).
15. Camelo M., Papadimitriou D., Fabrega L., Vila P. Efficient Routing in Data Center with Underlying Cayley Graph. *Proceedings of the 5th Workshop on Complex Networks CompleNet*. 2014. P. 189–197.
16. Kuznetsov A. A. [The Cayley graphs of Burnside groups of exponent 3]. *Siberian Electronic Mathematical Reports*. 2015, Vol. 12, P. 248–254 (In Russ.).
17. Kuznetsov A. A., Kuznetsova A. S. [Perspective topologies of multiprocessor computing systems based on the Cayley graphs of groups of period 4]. *Vestnik SibGAU*. 2016, No. 3 (17), P. 575–578 (In Russ.).
18. Kuznetsov A. A. [An algorithm of computation of the growth functions in finite two-generated groups of exponent five]. *Prikladnaya Diskretnaya Matematika*. 2016, No. 3 (33), P. 116–125 (In Russ.).
19. Kuznetsov A. A., Kishkan V. V. The Cayley graphs of finite two-generator burnside groups of exponent 7. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018. No. 2, P. 217–222 (In Russ.).
20. Hall P. Nilpotent groups, Notes of lectures given at the Canadian Mathematical Congress 1957 Summer Seminar, in The collected works of Philip Hall. Oxford: Clarendon Press, 1988. P. 415–462.
21. Yablonsky S. V. *Vvedeniye v diskretnuyu matematiku* [Introduction to discrete mathematics]. Moscow, Nauka Publ., 1989, 384 p.
22. Kuznetsov A. A., Kuznetsova A. S. [Fast multiplication in finite two-generated groups of exponent five]. *Prikladnaya Diskretnaya Matematika*. 2013, No. 1 (18), P. 110–1116 (In Russ.).

© Кузнецов А. А., Кузнецова А. С., Кишкан В. В., 2023

Кузнецов Александр Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор, директор НОЦ «Институт космических исследований и высоких технологий»; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: alex_kuznetsov80@mail.ru.

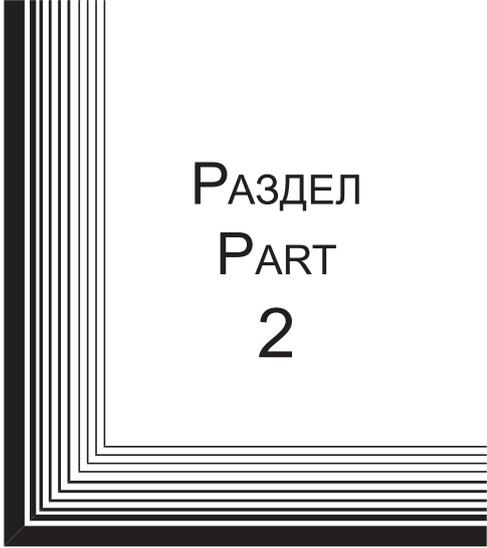
Кузнецова Александра Сергеевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: alexakuznetsova85@gmail.com.

Кишкан Владимир Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информатики и вычислительной техники; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kishkan@mail.ru.

Kuznetsov Alexander Alexeevich – Dr. Sc., Professor, Head of Institute of Space Research and High Technologies; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: alex_kuznetsov80@mail.ru.

Kuznetsova Alexandra Sergeevna – Cand. Sc., Associate Professor of the Department of Applied Mathematics; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: alexakuznetsova85@gmail.com.

Kishkan Vladimir Vladimirovich – Cand. Sc., Associate Professor of the Department of Informatics and Computer Science; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: kishkan@mail.ru.



РАЗДЕЛ
PART
2



АВИАЦИОННАЯ
И РАКЕТНО-
КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

AVIATION
AND SPACECRAFT
ENGINEERING



УДК 621.454

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-682-696

Для цитирования: Акбулатов Э. Ш., Назаров В. П., Герасимов Е. В. Исследование характеристик ракетного двигателя малой тяги, изготовленного методом аддитивной SLM-технологии // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 4. С. 682–696. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-682-696.

For citation: Akbulatov E. Sh., Nazarov V. P., Gerasimov E. V. [Characteristics research of a low thrust rocket engine manufactured using additive SLM technology]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 4, P. 682–696. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-682-696.

Исследование характеристик ракетного двигателя малой тяги, изготовленного методом аддитивной SLM-технологии

Э. Ш. Акбулатов¹, В. П. Назаров^{1*}, Е. В. Герасимов²

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

²ООО «Полихром»

Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, ул. Дубровинского, 58

*E-mail: nazarov@sibsau.ru

Развитие и совершенствование ракетно-космической техники в значительной степени обусловлено применением производственных технологий, обеспечивающих изготовление изделий с высокими характеристиками надежности и энергетической эффективности при одновременном снижении показателей материалоемкости и уменьшении длительности производственного цикла. К таким прогрессивным технологиям следует отнести аддитивные технологии, физическая сущность которых заключается в получении деталей методом послойного плавления материала на основе компьютерной 3D-модели изделия в камере специального 3D-принтера, оснащенного лазерным устройством. Применение аддитивных технологий в ракетном двигателестроении требует проведения большого объема научно-исследовательских и экспериментальных работ для подтверждения соответствия нормативным критериям и правилам, установленным в отрасли, а также обязательной сертификации на государственном уровне. В соответствии с программой приоритетных научно-исследовательских работ, в СибГУ им. М. Ф. Решетнева совместно с промышленным партнером ООО «Полихром» проводится комплекс экспериментальных работ по апробации и отработке режимов 3D-печати образца камеры-демонстратора ракетного двигателя малой тяги (РДМТ).

Разработана конструкция РДМТ, работающего на экологически безопасных газообразных компонентах топлива, адаптированная для 3D-печати на принтере ASTRA 420. Рассмотрены параметры и характеристики принтера. Приведена последовательность экспериментальных работ по подбору режимов печати корпуса камеры и смесительной головки. Установлена принципиальная возможность корректировки режимов лазерного плавления материала и формообразования детали.

Представлены основные технологические этапы послепечатной обработки деталей камеры РДМТ. Дано описание оборудования для термообработки и электрохимического полирования деталей. Изложена последовательность исследования структуры материала, приведены результаты металлографического и рентгенографического анализа внутреннего состояния металла.

Показано значение стендовых испытаний ракетных двигателей при разработке инновационных конструктивных решений и внедрении инновационных технологий производства. Представлено описание и состав систем испытательного стенда СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Результаты стендовых огневых испытаний свидетельствуют о принципиальной возможности изготовления РДМТ методом аддитивных технологий селективного лазерного плавления из жаростойких легированных сплавов.

Ключевые слова: аддитивные технологии, ракетный двигатель малой тяги, Инконель 718, послепечатная обработка, виброиспытания, испытания на прочность и герметичность, стендовые огневые испытания.

Characteristics research of a low thrust rocket engine manufactured using additive SLM technology

E. Sh. Akbulatov¹, V. P. Nazarov^{1*}, E. V. Gerasimov²

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

²LLC "Polychrome"
58, Dubrovinskogo, Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation
E-mail: nazarov@sibsau.ru

The development and improvement of rocket and space technology are largely determined by the application of manufacturing technologies that enable the production of high-reliability products with energy efficiency, while simultaneously reducing material intensity and shortening the production cycle. Among these progressive technologies, additive technologies should be mentioned. The essence of these technologies lies in obtaining parts through layer-by-layer melting of material based on a computer 3D model of the product in a chamber of a specialized 3D printer equipped with a laser device.

The application of additive technologies in rocket engine construction requires extensive scientific research and experimental work to confirm compliance with industry standards, rules, and mandatory certification at the state level. In accordance with the program of priority research at SibSU, in collaboration with the industrial partner "Polychrome" LLC a complex of experimental work is being carried out to test and refine the 3D printing modes of a demonstrator model of a low thrust rocket engine (LTRE).

The design of the LTRE, operating on environmentally friendly gaseous fuel components, has been developed and adapted for 3D printing on the ASTRA 420 printer. The parameters and characteristics of the printer are considered, and the sequence of experimental work on selecting printing modes for the engine chamber housing and mixing head is outlined. The fundamental possibility of adjusting the modes of laser material melting and forming of the part has been established.

The main technological stages of post-printing processing of LTRE chamber parts are presented. A description of the equipment for heat treatment and electrochemical polishing of parts is provided. The sequence of material structure research is outlined, and the results of metallographic and X-ray analysis of the internal state of the metal are presented.

The importance of stand tests of rocket engines in the development of innovative design solutions and the implementation of innovative production technologies is demonstrated. A description and composition of the testing stand system at SibSU are presented. The results of stand firing tests indicate the fundamental possibility of manufacturing LTRE using selective laser melting of heat-resistant alloy.

Keywords: additive technologies, low thrust rocket engine, Inconel 718, post-printing processing, vibration testing, strength and tightness tests, bench fire tests.

Введение

Аэрокосмическая промышленность России обладает высоким инновационным потенциалом и является одним из основных приоритетов стратегии экономического развития страны. Ее значение определяется в настоящее время особыми задачами укрепления обороноспособности государства и возможностями по обеспечению ускоренных темпов модернизации технологической базы промышленного производства. Практические результаты космической деятельности должны использоваться для реального улучшения качества жизни людей и развития всех сфер экономики. В аэрокосмической отрасли ведется широкое техническое перевооружение производства, реконструкция промышленных объектов, освоение передовых технологий мирового уровня.

К их числу следует отнести аддитивные технологии (AF – Additive Fabrication от термина аддитивность – прибавляемость) [1–3], которые представляют собой последовательное послойное наращивание материала и синтез объекта производства с применением компонентных

3D прикладных программ. Соединение слоев исходного материала может осуществляться различными способами: сплавлением, спеканием, склеиванием, полимеризацией в зависимости от физико-химических свойств материала, характеристик технологического оборудования и целевого назначения изделия.

Наиболее перспективным видом аддитивных технологий для применения в ракетно-космической промышленности рассматривается SLM-технология 3D-печати [4]. SLM (Selective laser melting) – инновационная технология производства сложных изделий посредством лазерного плавления металлического порошка по математическим CAD-моделям (3D-печать металлом). Этот процесс заключается в последовательном послойном расплавлении порошкового материала посредством мощного лазерного излучения. С помощью SLM-технологии создают как точные металлические детали для работы в составе узлов и агрегатов, так и неразборные конструкции, обеспечивающие повышенную надежность изделий.

По сравнению с традиционными технологиями, используемыми в настоящее время, технология селективного лазерного сплавления имеет ряд преимуществ [5]:

- решение сложных технологических задач;
- сокращение цикла научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, построение сложнопрофильных деталей без использования оснастки;
- снижение конечной массы изделия за счет оптимизации конструкции с учетом распределения усилий на внутренние перегородки и ребра жесткости изделия;
- меньший расход конечного материала путем проведения топологической оптимизации на этапе проектирования изделия.

Вместе с тем применение SLM-технологии должно сопровождаться определенным объемом послепечатной обработки, так как изготовленные детали имеют повышенные параметры шероховатости, следы технологических поддержек, неровности на поверхностях, сопрягаемых с поверхностями других деталей сборочной единицы. Пористость на торцевых поверхностях деталей не всегда обеспечивает высококачественное герметичное соединение металлов сваркой.

Цель исследования

На предприятиях и в научно-исследовательских организациях ракетно-космической промышленности проводится работа по формированию системы внедрения, практической отработки аддитивных технологий с последующей сертификацией их на уровне отрасли. В связи с этим для Сибирского государственного университета науки и технологии имени академика М. Ф. Решетнева (СибГУ им. М. Ф. Решетнева) на новом этапе его развития как опорного вуза региона определенную актуальность представляет вопрос организации опережающей подготовки специалистов в области аддитивных технологий с учетом перспективной заинтересованности и потребности предприятий индустриальных партнеров и ракетно-космического машиностроения в целом.

В рамках программы «Приоритет 2030» в СибГУ им. М. Ф. Решетнева реализуется научно-образовательный проект «Разработка, изготовление методом селективного (аддитивного) лазерного сплавления и испытания ракетного двигателя малой тяги-демонстратора, работающего на экологически чистом топливе».

В качестве предмета и объекта исследования выбран ракетный двигатель малой тяги (РДМТ). Поскольку функциональное назначение данного двигателя-демонстратора заключается в проведении модельных стендовых испытаний без имитации условий космического пространства, предусмотрено использование экологически безопасных компонентой топлива: газообразного кислорода O_2 (окислителя) и газообразного метана CH_4 (горючего).

В настоящее время РДМТ являются основными исполнительными органами в системе управления космических летательных аппаратов. Они служат для ориентации, стабилизации и коррекции летательного аппарата в пространстве. Назначение РДМТ и условия их эксплуатации предъявляют к ним целый ряд специфических требований, в частности, следующие:

- многорежимность, обусловленную работой в непрерывном (длительность до $\tau_v > 10^3$ с) и различных импульсных режимах с минимальным временем включения 0,03 с и менее;
- большой ресурс по суммарному времени работы – до 50 000 с и более;
- большой ресурс по суммарному количеству включений – до 10^6 .

Обеспечение вышеперечисленных требований вызывает значительные трудности при проектировании РДМТ, организации смесеобразования и рабочего процесса в его камере сгорания, обусловленные следующими факторами:

- малым расходом топлива;
- малым числом элементов форсуночной головки;
- невозможностью создания регенеративного охлаждения;
- трудностью обеспечения равномерного распределения смешанного топлива по объему камеры сгорания.

Характеристика объекта исследования

Известно, что создание РДМТ во многом базируется на результатах экспериментальной отработки опытных образцов двигателей и эмпирической интерпретации теоретических закономерностей гидрогазодинамики и химической кинетики.

Проектирование, термодинамические и газодинамические расчеты камеры двигателя-демонстратора выполнялись по учебным методикам кафедры двигателей летательных аппаратов (ДЛА) СибГУ им М. Ф. Решетнева и рекомендациям АО «КБхиммаш им. А. М. Исаева» с применением прикладных программ SolidWorks, Mathcad.

Разработанный двигатель-демонстратор имеет следующие технические характеристики:

- тяга $P = 200$ Н;
- окислитель O_2 (кислород – газ, $T = 298$ К);
- горючее CH_4 (метан – газ, $T = 298$ К);
- массовый расход окислителя $\dot{m}_o = 0,04316$ кг/с;
- массовый расход горючего $\dot{m}_r = 0,02439$ кг/с;
- давление в камере сгорания $p_k = 1$ МПа;
- давление на срезе сопла $p_a = 0,00085$ МПа;
- удельный импульс двигателя $J_y = 2960$ м/с.

Конструкция камеры двигателя выполнена в виде двух моноблоков – смесительной головки и корпуса камеры (рис. 1), соединяемых между собой аргонодуговой сваркой. Возможности SLM-технологии позволили выполнить сложную конструкцию смесительной головки без выполнения сборочных единиц – форсунок, топологическая оптимизация которых обеспечила возможность их аддитивной печати в форме отверстий со струйным и тангенциальным (центрбежным) подводом компонентов в зону распыливания и смесеобразования.



Рис. 1. 3D-модели корпуса камеры и смесительной головки

Fig. 1. 3D models of the chamber body and mixing unit

Оборудование для 3D-печати

Изготовление двигателя по технологии 3D-печати выполнялось промышленным партнером вуза ООО «Полихром» на принтере ASTRA 420, который был разработан и изготовлен на данном предприятии (рис. 2).

Особенностью принтера ASTRA 420 стала реализация инновационных решений в динамической модуляции лазерного пятна с возможностью корректировки мощности лазера, что позволяет достичь высоких скоростей построения деталей. 3D-принтер ASTRA 420 может быть использован для решения сложных производственных задач, при изготовлении 3D-деталей и проведении научно-исследовательских работ [6; 7].

3D-принтер ASTRA 420 имеет следующие технические характеристики.

Параметры камеры построения:

- размер камеры построения – 420×420×280 мм;
- рабочий ход стола вертикального перемещения – 280 мм;
- шаг перемещения стола – 1 мкм;
- повторяемость на рабочий ход стола – ±5 мкм;
- нанесение слоя порошка на столе построения – от 20 мкм (с шагом 1 мкм).

Параметры лазера и оптической системы:

- лазер ИК непрерывный, длина волны – 1080 нм;
- мощность лазерного излучения – 500 Вт;
- точность позиционирования гальваносканера (по краям) – не более 10 мкм;
- скорость экспонирования – 20–2000 м/с;
- модуляция лазерного пятна – от 40 мкм до 2 мм;
- скорость модуляции лазерного пятна – менее 0,2 с.

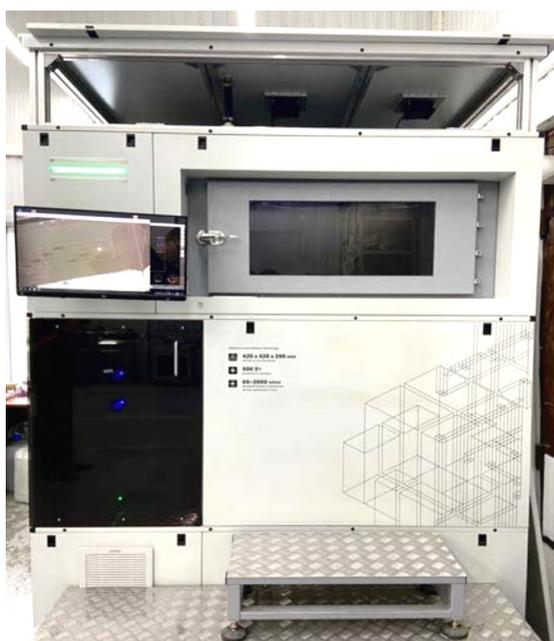


Рис. 2. 3D-принтер ASTRA 420. Внешний вид

Fig. 2. 3D printer ASTRA 420. Appearance

Программное обеспечение (ПО) включает управляющую программу и программу подготовки задания. Первая позволяет устанавливать технологические параметры выполнения задания, контролировать все процессы, связанные с работой принтера, задавать траектории движения лазерного пятна, его модуляцию, контролировать выполняемое задание и вести видеорегистрацию процесса построения детали. Вторая включает в себя ПО для отработки STL-файлов (оптимизацию геометрии, построение опорных элементов, разрезание на слои).

Технические возможности принтера позволяют выполнять качественную печать 3D CAD-моделей методом послойного селективного лазерного сплавления из порошков цветных металлов, всех видов сталей, титана, никелевых, кобальт-хромовых сплавов и других металлических материалов [8].

Разработка технологии 3D-печати

С целью повышения практической ориентации научно-образовательного проекта, приближения его к требованиям реального производства, основные проектно-конструкторские и производственно-технологические мероприятия проекта выполнялись с учетом рекомендаций «Системы технологического обеспечения разработки и постановки на производство изделий», которая принята в аэрокосмической отрасли. В частности, использовалась общая методология технологической подготовки производства, изложенная в ОСТ 92-4718-86 «Организация технологической отработки и постановки на производство новых изделий» и ОСТ 92-4928-90 «Основные положения по организации и управлению процессом технологической подготовки производства».

Процесс SLM принадлежит к классу порошковых технологий [9]. Основным принцип SLM-технологии заключается в нанесении тонкого слоя порошка (20–80 мкм) на стол построения с последующим плавлением пятном лазерного луча программно выделенной части слоя строящейся детали. Далее стол построения опускается на заданную высоту и на него наносится следующий слой порошка. Затем процесс выборочного плавления повторяется. Процесс построения деталей больших размеров SLM-технологией в автоматическом непрерывном режиме работы принтера может занимать по времени до 300 ч в зависимости от размеров и конфигурации деталей.

На первом этапе реализации проекта, в соответствии с логикой научных исследований, проведен комплекс экспериментальных работ по апробации и отработке режимов изготовления на 3D-принтере ASTRA 420 камеры РДМТ из модельного порошкового материала Силумин РС-300. Выбор данного материала объясняется его пластичностью, низкой температурой плавления и невысокой стоимостью. Изготовленные экземпляры камеры-демонстратора подвергались различным видам исследований и испытаний в лабораторных и производственных условиях.

В результате установлено, что технические характеристики принтера обеспечивают реализацию инновационных решений и динамической модуляции лазерного пятна с возможностью корректировки мощности лазера, что позволяет достичь высоких скоростей построения деталей и, следовательно, приступить к печати камеры из жаростойкого аустенитного сплава Инконель 718.

Для изготовления корпуса камеры и смесительной головки РДМТ был выбран порошок Инконель 718 (Inconel 718). Известно, что данный материал разработан и запатентован в США автором Айзелштайном (Eiselstein) в 1962 г. [10] и в настоящее время широко используется в аэрокосмической и машиностроительной промышленности зарубежных стран. В отечественной промышленности для аддитивных технологий применяется порошок ПР-08ХН53БМТЮ ТУ 1479-704-5689-2016, который по своему химическому составу является аналогом сплава Инконель 718. Порошок изготавливают методом распыления расплава инертным газом – азотом высокого давления. Форма частиц порошка преимущественно сферическая. Изготовитель ООО «Гранком».

Предварительно была проведена исследовательская работа по изучению характеристик плавления данного порошка и подбору режимов печати. Подбирались режимы печати одиночных треков и сплошной печати образцов.

Подбор режимов начался с серии печати 48 образцов пустотелых клеток одиночными треками для определения оптимального сочетания диаметра пятна лазерного луча, скорости сканирования и мощности лазерного излучения. В первой партии из 12 образцов диаметр пятна и скорость сканирования оставались статичными, в то время как мощность лазерного излучения менялась с шагом в 15 Вт. Во второй партии изменялась скорость, в третьей – диаметр пятна. В заключительной партии пропорционально изменялись все три параметра с небольшим шагом с целью определения оптимального режима печати. Результаты исследовались с помощью микроскопа Insein Li Fung с увеличением $\times 10-300$. Визуально оценивались толщина трека, его целостность, стабильность и прочность.

Следующим этапом экспериментов была печать объёмных образцов. К установленным на прошлых опытах параметрам добавились паттерн (география заполнения) лазерного пучка,

скорость холостого хода (далее – JS), внутренний отступ от контура и шаг между треками. Немаловажным также является и ориентация образца в пространстве, но при работе с маленькими образцами этим можно пренебречь. Результаты фиксировались с помощью микроскопа, прочность и пористость оценивались визуально. Эксперименты показали, что шаг между слоями равный 150 мкм обеспечивает наилучшее заполнение и низкий уровень пористости.

Баланс всех вышеописанных параметров является первостепенной задачей при SLM-печати. Отклонение режима в любую сторону приведёт к недостаточному количеству энергии, которая поступает на рабочую поверхность и, следовательно, к непролаву и повышенной пористости. Параметры можно подбирать, основываясь на объёме детали: тонкие участки, с небольшой площадью сканирования на слой, возможно печатать относительно быстро без риска образования пористости, а для участков большого скопления материала подбирается подходящий паттерн, который не вызовет перегрева при той же скорости. Вне зависимости от геометрии детали, во избежание накопления внутреннего остаточного напряжения направление сканирования на каждом слое изменяется на 90° относительно предыдущего.

Смесительная головка отличается от корпуса камеры сгорания массивностью и большим скоплением материала по всему объёму. Для печати подобного изделия было принято решение вручную сегментировать её на компоненты, которые будут печататься последовательно в установленном порядке. Такой метод не допускает перегрева на поверхности с сохранением скорости печати. Камера сгорания РДМТ также была подвержена сегментации – верхняя и нижняя части камеры сгорания представляли собой тонкостенные цилиндр и конус, которые печатались в обычном режиме. Участком, который требует изменения параметров, является критическое сечение, находящееся на стыке двух зон камеры. Этот участок печатался с использованием альтернативного паттерна печати, как описывалось выше, во избежание перегрева. Было решено установить обе модели вертикально, так как подобная ориентация обеспечивала наименьшее количество внутренних отвесных поверхностей. От стола к нижней поверхности деталей были установлены поддержки в сочетании с теплоотводами для надёжной фиксации.

Таким образом, были получены параметры для печати первого образца РДМТ и смесительной головки, представленные в таблице.

Рабочие режимы печати камеры сгорания РДМТ и смесительной головки

Камера сгорания						
Сегмент	P, Вт	V, мм/с	D, мкм	Шаг, мкм	JS, мм/с	Паттерн
До критического сечения	300	600	190	150	600	Двунаправленная оптимизированная
Критическое сечение						Однонаправленная
После критического сечения						Двунаправленная оптимизированная
Смесительная головка						
Сегмент	P, Вт	V, мм/с	D, мкм	Шаг, мкм	JS, мм/с	Паттерн
Внешний слой (1,5 мм)	300	600	190	150	600	Однонаправленная оптимизированная
Внутренний слой						Клетками

Испытание первого образца выявило наличие пористости и негерметичности в области критического сечения. Перед печатью второго образца была предпринята серия дополнительных опытов по подбору оптимального режима печати критического сечения в отдельности. В результате этот сегмент был ещё раз поделен на две равные части, которые печатались с двумя разными паттернами. Применение этого подхода при печати рабочего образца показало положительный результат. Пористость значительно уменьшилась по всему объёму образца.

Вышеописанная методика была применена для печати смесительной головки. Сегментация и расслоение модели показали положительный результат, образец имел малую пористость.

На данном этапе работы оптимизация времени печати не производилась. Время печати корпуса камеры – 3 суток, смесительной головки – 2 суток.

Технология послепечатной обработки

Формообразование деталей камеры представляет собой начальный и вместе с тем наиболее ответственный этап общего технологического процесса изготовления РДМТ. По некоторым сведениям, основанным на опыте производства экспериментальных изделий ракетно-космической техники, в том числе опыте авторов настоящей статьи, расходы на послепечатную обработку могут составлять более одной трети общей суммы трудозатрат на изготовление 3D-печатных деталей и сборочных единиц.

Технология послепечатной обработки разрабатывается с учетом физико-химических, механических, технологических и других свойств исходного материала Инконель 718.

Изготовителем порошкообразного материала рекомендована термическая обработка деталей, изготовленных методом 3D-печати, – закалка в вакууме с последующим охлаждением в печи с сохранением вакуумной среды и дальнейшей обдувкой аргоном. Термообработке подвергались отпечатанные корпуса камер, смесительные головки и пластинчатые образцы.

Термообработка проводилась в вакуумной печи SECO/WARWICK 10 VPT-4050/48 HV (рис. 3) предприятия-партнера АО «Красмаш». Вакуумная печь сертифицирована и аттестована на выполнение аналогичных видов термообработки.

Режимы термообработки следующие:

- остаточное давление (вакуум) в печи $P = 10^{-2}$ кг/см²;
- скорость нагрева – 20 град/мин (~50 мин);
- температура термообработки $t = 1060$ °С;
- выдержка – 60 мин.



Рис. 3. Вакуумная печь SECO/WARWICK 10 VPT-4050/48 HV

Fig. 3. Vacuum furnace SECO/WARWICK 10 VPT-4050/48 HV

После охлаждения деталей до стандартной комнатной температуры $t = 20$ °С, они были подвергнуты абразивной обработке (пескоструйная обработка) с использованием искусственного абразива – электрокорунда F-120 при давлении воздушно-абразивной смеси $P = 4$ кг/см² в течение 5–8 мин.

Проведено исследование влияния процесса 3D-печати на химический состав исходного материала. Исследованию подвергались нетермообработанные и прошедшие термообработку печатные образцы. Исследование проводилось в масс-спектрометрической лаборатории АО «Красмаш» на спектрометре 67A1053 HITACHI PMI-MASTER UVR. В результате исследований уста-

новлено, что химический состав образцов соответствует требованиям, заявленным изготовителем в сертификате материала Инконель 718, а также соответствует требованиям зарубежного стандарта AMS 5663M. Таким образом, можно сделать вывод, что процесс селективного лазерного плавления и последующая высокотемпературная термообработка не оказывают влияния на химический состав материала, не приводят к изменению баланса легирующих элементов сплава.

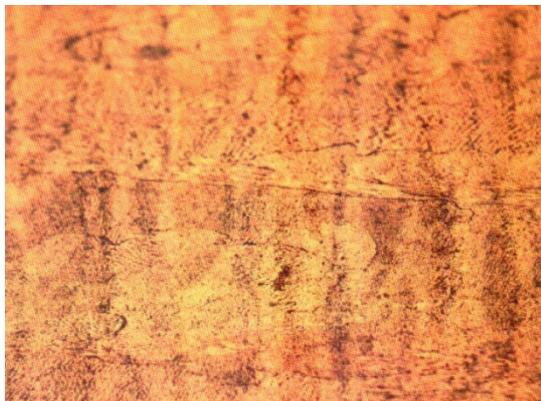


Рис. 4. Микроструктура материала без термообработки

Fig. 4. Material microstructure without heat treatment

Металлографический анализ проводился методом просмотра микрошлифов термообработанных и нетермообработанных образцов после травления в специальном реактиве на микроскопе NICON ECLIPSE MA200 при увеличении от 50 до 1000 крат в лабораторно-исследовательском центре АО «Красмаш».

Установлено, что строение микроструктуры материала без термообработки на отдельных участках имеет структурную полосчатость (рис. 4), обусловленную способом изготовления путем послойного лазерного сплавления.

Микроструктура образцов представляет собой аустенит с выделениями интерметаллидов (типа γ' -фазы). В микроструктуре образцов без термообработки границы зерен не выявляются. Размер зерен образцов с термообработкой соответствует

размерам для легированных аустенитных сталей и сплавов. В нетермообработанном материале наблюдаются единичные локальные несплошности со сферическими частицами, имеются дефекты в виде окисных пленок протяженностью 0,06–0,35 мм и участки скопления пор размером 0,015–0,085 мм. В термообработанных образцах подобные дефекты в явной форме не просматриваются, однако микропористость сохраняется (в меньших размерах). Результаты металлографического анализа в достаточной степени согласуются с исследованиями других авторов [11–13].

С целью более точной идентификации пространственных дефектов материала отпечатанных изделий проведен рентгенографический контроль корпусов камер двигателя. Исследования проводились на участках, доступных для контроля на рентгеновском аппарате YXLON MG-103. При этом в зоне сопла выявлены несплошности в виде отдельных точечных пустот размерами 0,3–1 мм и вытянутых вдоль слоев печати кольцевых несплошностей интенсивностью 0,1–0,2 мм с ухудшением качества печати в зоне критического сечения сопла и увеличением пористости на участках размерами 0,5–2 мм [14].

Контроль шероховатости внутренних и наружных поверхностей корпуса камеры проводился на приборе SurfTest SJ-201, имеющем свидетельство о поверке от государственного регионального центра стандартизации, метрологии и испытаний. В связи с отсутствием стандартной методики и специальных приспособлений для измерения фактических значений шероховатости были выделены наиболее характерные участки на внутренних поверхностях сверхзвуковой части сопла и цилиндрической части камеры сгорания. Всего выделено 7 участков, доступных для контроля универсальными средствами, входящими в комплектацию прибора. В результате измерений получены фактические значения шероховатости в диапазоне $Ra = 14,4\text{--}23,84$ мкм, которые значительно превышают принятые в ракетном двигателестроении параметры шероховатости внутренних поверхностей камер жидкостных ракетных двигателей ($Ra = 2,5\text{--}3,6$ мкм). Таким образом, следующей задачей разработки оптимальной технологии послепечатной обработки камеры РДМТ становится выбор метода повышения качества поверхностей изделия.

Одним из эффективных и апробированных методов в серийном производстве оболочек камер ракетных двигателей является электрохимическое полирование (далее – электрополирова-

ние), которое основано на интенсивном растворении микровыступов шероховатостей поверхности и замедленном растворении впадин [15; 16]. Процесс обработки производился в катодно-анодной ванне с раствором серной кислоты (H_2SO_4), фосфорной кислоты (H_3PO_4) и хромового ангидрида (CrO_3) в определенной концентрации каждого вещества. Для корпусов камер и смесительных головок опытным путем подобраны режимы обработки:

- напряжение тока $V = 8,8$ В;
- величина тока $I = 90-40$ А;
- время обработки $t = 4-6$ мин.

Далее проводились операции промывки в каскадных ваннах холодной и горячей водой, осветление в растворе азотной кислоты (HNO_3), нейтрализация в растворе карбоната кальция (Na_2CO_3). Контроль шероховатости осуществлялся методом сравнения с эталоном (образцом шероховатости) и показал приемлемую сходимость фактических параметров шероховатости требованиям чертежа.

В соответствии с программой исследований проведено определение физико-механических параметров и характеристик отпечатанных изделий (предел прочности σ_b , предел текучести $\sigma_{0,2}$, модуль упругости E и др.), замер твердости на образцах, виброиспытания, испытания на прочность и герметичность. Описание методик и анализ результатов данных исследований в настоящей статье не приводится. Отдельно следует отметить, что при испытаниях на герметичность первого из отпечатанных образцов корпуса камеры обнаружена негерметичность в зоне критического сечения. Это подтверждает выводы о развитой пористости материала данного образца при рентгенографическом контроле. Как показано в одном из предыдущих разделов статьи, проведена корректировка режимов печати, обеспечивающая герметичность изделий, печатавшихся далее.

В завершении технологического процесса послепечатной обработки проведена механическая подготовка стыковочных поверхностей и ручная аргодуговая сварка корпуса камеры и смесительной головки. Сварка выполнялась неплавящимся вольфрамовым электродом с присадочной проволокой диаметром $\varnothing 1,5$ мм, отпечатанной из порошка Inconel 718 на 3D-принтере. В связи с отсутствием рекомендаций в нормативно-технологической документации отрасли по сварке печатных деталей из данного материала, режимы сварки отрабатывались на печатных плоских и цилиндрических образцах-имитаторах.

На рис. 5 представлена камера РДМТ в сборе: на смесительную головку устанавливаются и привариваются резьбовые штуцеры для подачи компонентов топлива. Качество сварных соединений проверяется испытаниями на герметичность методом «аквариума». На нижнем цилиндрическом участке камеры сгорания устанавливается гнездо для закрепления термоэлектрического датчика. В центральное отверстие смесительной головки устанавливается посредством резьбового соединения с металлическим уплотнителем свеча зажигания.



Рис. 5. Камера РДМТ в сборе

Fig. 5. LTRE chamber assembly

Стендовые испытания РДМТ

При создании новых конструкций ракетных двигателей, разработке и внедрении инновационных технологий их промышленного производства проводятся стендовые огневые испытания, которые являются основным средством проверки обоснованности принятых конструкторских и технологических решений, контроля заданных проектных параметров и характеристик рабочего процесса, оценки работоспособности и надежности изделий [17; 18].

С этой целью при реализации проекта разработан и изготовлен испытательный стендовый комплекс на территории загородного полигона «Установо» (рис. 6). В состав испытательного стенда входят следующие системы:

– система подачи компонентов топлива. Состоит из двух частей: системы подачи окислителя и системы подачи горючего. Конструктивно данные системы выполнены отдельно в отсеках окислителя и горючего. К отсекам предъявляются требования по герметичности систем, применению материалов, не вступающих в реакцию с компонентами топлива и исключающих искрообразование в ходе работы стенда. В систему входят два баллона высокого давления с газообразным кислородом и газообразным метаном, магистрали для подвода компонентов топлива, выполненные из нержавеющей стали, и газовые редукторы;

– система зажигания компонентов топлива в камере сгорания. Состоит из блока электропитания и свечи зажигания 6213 NGK SILMAR9A9S;

– система измерений. Данная система является важнейшей при проведении стендовых испытаний, так как именно от результатов измерения широкой номенклатуры параметров двигательной установки определяются как условия проведения стендовых испытаний, так и работа двигателя. В неё входят тягоизмерительное устройство, датчики давления и расхода компонентов. В связи с этим система измерений должна выполнять функцию визуального контроля основных параметров двигателя и стенда, дистанционное измерение по заданной программе, сохранения информации на носителях, а также обеспечивать высокую точность и сохранность средств измерения и иметь высокую помехозащищённость средств её измерения;

– система управления. Предназначена для автоматического запуска, изменения режимов работы и останова, автоматического контроля за некоторыми основными параметрами двигателя. При достижении критических значений подаёт сигнал, а также обеспечивает, в случае необходимости, аварийный останов, автоматическое управление клапанами магистралей и поддержание заданных давлений. При выполнении подготовительных и заключительных операций используется ручное управление элементами стенда;

– система безопасности. Взрыво- и пожаробезопасность стенда заключается в разделении стенда на отсеки камеры, баллонов с кислородом, баллонов с метаном, магистралей управления, оборудования пожаротушения, а также управления экстренным остановом.



Рис. 6. Общий вид рабочей зоны стендового испытательного комплекса

Fig. 6. General view of the bench testing complex working area

Первые огневые стендовые испытания изготовленного методом аддитивных технологий ракетного двигателя малой тяги (условное название – РДМТ «Факел-1») состоялись 15 сентября 2023 г. (рис. 7). В соответствии с разработанной и утвержденной циклограммой испытаний

проведено пять включений продолжительностью рабочего цикла 1,5 с с последующей продувкой магистралей воздухом в течение 180–300 с. Зафиксировано устойчивое возникновение факела на срезе сопла, стабильная отсечка подачи компонентов топлива и прекращение горения смеси компонентов в камере сгорания. Тягоизмерительным устройством проведено измерение тяги двигателя, которая приблизительно соответствует расчетному значению $P = 200 \text{ Н}$ (20 кг). С целью гарантированного обеспечения безопасности персонала и стендового оборудования давление подачи газообразных компонентов на входе в двигатель было снижено на 35–40 % по сравнению с расчетным давлением в камере сгорания ($p_k = 1 \text{ МПа}$). При этом достигнутое значение тяги при пониженном давлении следует объяснить работой сопла в режиме перерасширения, так как барометрическое давление окружающей среды (условно $p_n = 0,1 \text{ МПа}$) значительно превышает расчетное давление газового потока на срезе сопла ($p_a = 0,00085 \text{ МПа}$).



Рис. 7. Огневые испытания РДМТ

Fig. 7. LTRE fire test

После демонтажа был проведен визуальный контроль состояния поверхностей двигателя (визуальная дефектация изделия – по отраслевой терминологии). При внешнем осмотре наружных и внутренних поверхностей двигателя (в доступных местах) с использованием локальной подсветки и стандартной технической лупы четырехкратного увеличения не обнаружено повреждений поверхностей, препятствующих повторному проведению испытаний.

Заключение

В процессе реализации научно-образовательного проекта «Разработка, изготовление методом селективного (аддитивного) лазерного сплавления и испытания ракетного двигателя малой тяги-демонстратора, работающего на экологически чистом топливе» выполнен значительный объем научно-исследовательских, опытно-конструкторских и учебно-лабораторных работ по изучению и практическому применению инновационных аддитивных технологий, обладающих большим потенциалом для ускоренного развития ракетно-космической промышленности.

Участники проекта, в том числе студенты СибГУ им. М. Ф. Решетева, получили новые знания и навыки проведения практических работ в области машиностроительного и металлургического производства, метрологии, сборочно-монтажных операций, лазерных, электрохимических и других технологий, используемых в ракетном двигателестроении. Получены новые профессиональные компетенции, способствующие интеллектуальному развитию студентов СибГУ им. М. Ф. Решетева – будущих специалистов предприятий аэрокосмической отрасли.

Вместе с тем следует сделать вывод, что применение аддитивных технологий 3D-печати при изготовлении сложных и высоконагруженных изделий ракетно-космической техники требует проведения большого комплекса научных исследований и производственно-технологических испытаний для подтверждения стабильности характеристик и показателей надежности с после-

дующей сертификацией инновационной технологии на соответствие требованиям государственных и отраслевых стандартов.

Благодарности

Реализация научно-исследовательского проекта осуществляется при поддержке благотворительного фонда известного государственного и общественного деятеля, предпринимателя, почетного гражданина Красноярского края Х. М. Совмена.

Поддержку проекту оказывали также промышленные партнеры СибГУ им. М. Ф. Решетева: ООО «Полихром», АО «Красмаш», АО «КБхиммаш им. А. М. Исаева», ООО «Вариант 999», АО «ОКБ Зенит».

Acknowledgements

The implementation of the research project is carried out with the support of the charitable foundation of the famous statesman and public figure, entrepreneur, honorary citizen of the Krasnoyarsk Territory Kh. M. Sovmen.

The project was also supported by industrial partners of Siberian State University: “Polychrome” LLC, “Kras mash” JSC, “KBkhimmash named after A.M. Isaev” JSC, “Variant 999” LLC, “OKB Zenith” JSC.

Библиографические ссылки

1. Логачева А. И. Аддитивные технологии изделий ракетно-космической техники : перспективы и проблемы применения // Технология легких сплавов. 2015, № 3. С. 39–44.
2. NASA tests limits of 3D-printing with powerfull rocket engine check [Электронный ресурс]. URL: <http://nasa.gov> (дата обращения: 15.11.2023).
3. Перспективы применения аддитивных технологии в производстве сложных деталей газотурбинных двигателей из металлических материалов / С. В. Белов, С. А. Волков, Л. А. Магеррамова [и др.] // Аддитивные технологии в российской промышленности : сб. науч. тр. М. : ВИАМ, 2015. С. 101–102.
4. Аддитивные технологии / Терехов М. В., Филиппова Л. Б., Мартыненко А. А. [и др.]. М. : ФЛИНТА, 2018. 74 с.
5. ГОСТ Р 59036–2020. Аддитивные технологии. Производство на основе селективного лазерного сплавления металлических порошков. Общие положения. М. : Стандартинформ, 2020. 22 с.
6. ГОСТ Р 59184–2020. Аддитивные технологии. Оборудование для лазерного сплавления. Общие требования. М. : Стандартинформ, 2020. 18 с.
7. Преображенская Е. В., Боровик Т. Н., Баранова Н. С. Технологии, материалы и оборудование аддитивных производств. М. : РТУ МИРЭА, 2021. 173 с.
8. Gu D. D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms // International Materials Reviews, 2012. No. 57 (3). P. 133–164.
9. Additive Manufacturing. With Amperprint for 3D-Printing you Have the Powder to Create [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hoganas.com/en/powder-technologies/additive-manufacturing/3d-printingpowders/> (дата обращения: 15.11.2023).
10. Пат. 3046108А US. Age-hardenable nickel alloy / Eiselstein H. L. № US773702А ; заявл. 13.11.1958 ; опубл. 24.07.1962. 10 с.
11. Металлографический анализ камеры, изготовленной методом 3D-печати / Е. Е. Жигурова, К. Е. Мумбер, Р. А. Казаков [и др.] // Решетневские чтения : материалы XXVI Международной научно-практической конференции (Красноярск, 09–11 ноября 2022 года) ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2022. Ч. 1. С. 175–177.

12. Назаров Е. Г., Масленков С. Б. Термическая обработка аустенитных жаропрочных сталей и сплавов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1970, № 3. С. 63–72.
13. Педаш А. А., Лысенко Н. А. [и др.]. Структура и свойства образцов из сплава Inconel 718 полученных по технологии селективного лазерного плавления // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2017. № 8. С. 46–54.
14. Анализ результатов рентгенографических исследований изделий РКТ изготовленных методом SLM-печати / Э. С. Манохина, М. А. Шикарев, А. П. Рубайло [и др.] // *Решетневские чтения : материалы XXVI Международной научно-практической конференции*. Красноярск, 2022. С. 186–187.
15. Краснова Е. В., Саушкин Б. П., Слюсарь И. А., Смян С. В. Электрохимическая обработка изделий аддитивного производства из металлов и сплавов // *Аддитивные технологии*. 2023, № 2. С. 49–57.
16. Zhao C., Qu N., Tang X. Removal of adhesive powders from additive manufactured internal surface via electrochemical machining with flexible cathode // *Precision Engineering*, 2021. Vol. 67, P. 438–452. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2020.11.003.
17. Яцуненко В. Г., Назаров В. П., Коломенцев А. И. Стендовые испытания жидкостных ракетных двигателей ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. 248 с.
18. Имитационное моделирование условий стендовых испытаний жидкостных ракетных двигателей малой тяги / В. П. Назаров, В. Ю. Пиунов, К. Ф. Голиковская, Л. П. Назарова // *Решетневские чтения : материалы XXVI Международной научно-практической конференции*. Красноярск, 2022. С. 191–192.

References

1. Logacheva A. I. [Additive technologies for rocket and space technology products: prospects and problems of application]. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2015, No. 3, P. 39–44 (In Russ.).
2. NASA tests limits of 3D-printing with powerfull rocket engine check. Available at: <http://nasa.gov> (accessed: 15.11.2023).
3. Belov S. V., Volkov S. A., Magerramova L. A., et. al. [Prospects for the use of additive technologies in the production of complex parts of gas turbine engines from metal materials]. *Sbornik nauchnykh trudov nauchn. konf. "Additivnye tekhnologii v rossiyskoy promyshlennosti"* [Collection of scientific papers Scientific. Conf. "Additive technologies in Russian industry"]. Moscow, 2015, P. 101–102 (In Russ.).
4. Terekhov M. V., Filippova L. B., Martynenko A. A., et. al. *Additivnye tekhnologii* [Additive technologies]. Moscow, FLINTA Publ., 2018, 74 p.
5. *GOST R 59036–2020. Additivnye tekhnologii. Proizvodstvo na osnove selektivnogo lazernogo splavleniya metallicheskih poroshkov. Obshchie polozheniya* [State Standard R 59036-2020. Additive technologies. Production based on selective laser melting of metal powders. General provisions]. Moscow, Standartinform Publ., 2020. 22 p.
6. *GOST R 59184–2020. Additivnye tekhnologii. Oborudovanie dlya lazernogo splavleniya. Obshchie trebovaniya* [State Standard R 59184-2020. Additive technologies. Equipment for laser melting. General requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2020. 18 p.
7. Preobrazhenskaya E. V., Borovik T. N., Baranova N. S. *Tekhnologii, materialy i oborudovanie additivnykh proizvodstv* [Technologies, materials and equipment for additive manufacturing]. Moscow, RTU MIREA Publ., 2021, 173 p.
8. Gu D. D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews*, 2012, No. 57 (3), P. 133–164.
9. Additive Manufacturing. With Amperprint for 3D-Printing you Have the Powder to Create. Available at: <https://www.hoganas.com/en/powder-technologies/additive-manufacturing/3d-printingpowders/> (accessed: 15.11.2023).

10. Eiselstein H. L. Age-hardenable nickel alloy. Patent US, no. 3046108A, 1962.
11. Zhigurova E. E., Mumber K. E., Kazakov R. A., et. al. [Metallographic analysis of a 3D printed chamber]. *Materialy XXVI Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XXVI Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2022, P. 175–177 (In Russ.).
12. Nazarov E. G., Maslenkov S. B. [Heat treatment of austenitic heat-resistant steels and alloys]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 1970, No. 3, P. 63–72 (In Russ.).
13. Pedash A. A., Lysenko N. A., et. al. [Structure and properties of samples from Inconel 718 alloy obtained using selective laser melting technology]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2017, No. 8, P. 46–54 (In Russ.).
14. Manokhina E. S., Shikarev M. A., Rubaylo A. P., et. al. [Analysis of the results of x-ray studies of RCT products manufactured by SLM printing]. *Materialy XXVI Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XXVI Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2022, P. 186–187 (In Russ.).
15. Krasnova E. V., Saushkin B. P., Slyusar' I. A., Smeyan S. V. [Electrochemical processing of additive manufacturing products from metals and alloys]. *Additivnye tekhnologii*. 2023, No. 2, P. 49–57 (In Russ.).
16. Zhao C., Qu N., Tang X. Removal of adhesive powders from additive manufactured internal surface via electrochemical machining with flexible cathode. *Precision Engineering*, 2021, Vol. 67, P. 438–452. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2020.11.003.
17. Yatsunenkov V. G., Nazarov V. P., Kolomentsev A. I. *Stendovye ispytaniya zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Bench testing of liquid-propellant rocket engines]. Krasnoyarsk, Sib. St. Univ. Publ., 2016, 248 p.
18. Nazarov V. P., Piunov V. Yu., Golikovskaya K. F., Nazarova L. P. [Simulation modeling of bench test conditions of liquid rocket engines of low-thrust]. *Materialy XXVI Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XXVI Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2022, P. 191–192 (In Russ.).

© Акбулатов Э. Ш., Назаров В. П., Герасимов Е. В., 2023

Акбулатов Эдхам Шукриевич – кандидат технических наук, доцент, ректор; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: rector@sibsau.ru.

Назаров Владимир Павлович – кандидат технических наук, профессор кафедры двигателей летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: nazarov@sibsau.ru.

Герасимов Евгений Витальевич – инженер-конструктор ООО «Полихром». E-mail: gerasimov24rus@mail.ru.

Akbulatov Edkham Shukrievich – Cand. Sc., associate professor, rector; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: rector@sibsau.ru.

Nazarov Vladimir Pavlovich – Cand. Sc., Professor of the Department of Aircraft Engines; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: nazarov@sibsau.ru.

Gerasimov Evgeny Vitalievich – design engineer at "Polychrome" LLC. E-mail: gerasimov24rus@mail.ru.

УДК 621.43.056

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-697-705

Для цитирования: Бакланов А. В. Влияние особенностей конструкции камер сгорания двигателей НК-16СТ, НК-16-18СТ на содержание углекислого газа в продуктах сгорания // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 4. С. 697–705. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-697-705.

For citation: Baklanov A. V. [Concentration of carbon dioxide in products of combustion of GTE NK-16ST and NK-16-18ST]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 4, P. 697–705. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-697-705.

Влияние особенностей конструкции камер сгорания двигателей НК-16СТ, НК-16-18СТ на содержание углекислого газа в продуктах сгорания

А. В. Бакланов

АО «Казанское моторостроительное производственное объединение»
Российская Федерация, 420036, г. Казань, ул. Дементьева, 1
E-mail: andreymbaklanov@bk.ru

В данной работе рассмотрена конструкция двух камер сгорания газотурбинного двигателя, работающего на природном газе. В одной камере сгорания имеется 32 горелки, в другой – 136 форсунок, расположенных в два яруса во фронтальном устройстве.

Основным фактором, влияющим на глобальное потепление, считаются значительные объемы выбросов парниковых газов, в первую очередь углекислого (CO_2), выделяющихся в том числе при работе газотурбинных двигателей и энергетических установок. Снижение уровня CO_2 путем формирования набора конструктивных мероприятий в камере сгорания – одна из актуальных задач двигателестроения, которую необходимо решить для удовлетворения современных экологических требований, предъявляемых к газотурбинным двигателям, служащим приводами нагнетателей газоперекачивающих агрегатов. Представленное исследование посвящено анализу влияния изменения конструкции камеры сгорания на снижение уровня CO_2 в выхлопных газах газотурбинного двигателя НК-16СТ. Рассмотрено две модификации. Первый вариант – серийная камера сгорания с организацией диффузионного горения, второй – модернизированная с измененным фронтальным устройством. Каждая из рассмотренных камер была испытана в составе двигателя. Во время исследования непосредственно в шахте выхлопа производился отбор продуктов сгорания и определялись их концентрации, в том числе содержание CO_2 . В результате проведенных работ была подтверждена возможность уменьшения уровня концентрации CO_2 в продуктах сгорания двигателя до 20 % без ухудшения его параметров. Такого эффекта удалось достигнуть за счет снижения полноты сгорания топлива в камере сгорания. Полученные данные по изменению концентрации CO_2 могут быть полезны при выборе наиболее подходящего режима работы двигателя во время его эксплуатации, а представленные подходы к организации процессов горения – использованы разработчиками при проектировании камер сгорания газотурбинных двигателей на природном газе.

Ключевые слова: выброс углекислого газа, камера сгорания, газотурбинный двигатель, продукт сгорания, газоперекачивающий агрегат.

Concentration of carbon dioxide in products of combustion of GTE NK-16ST and NK-16-18ST

A. V. Baklanov

JSC “Kazan motor production association”
1, Dementieva St., Kazan, 420036, Russian Federation
E-mail: andreybaklanov@bk.ru

This paper considers the design of two combustion chambers of a gas turbine engine running on natural gas. One combustion chamber has 32 burners, and the other has 136 nozzles located in two rows in the flame tube head.

A major contributor to global warming is considered to be the significant emissions of greenhouse gases, primarily CO₂, including those emitted by gas turbine engines and power plants. The reduction of carbon dioxide levels by developing a set of structural measures in the combustion chamber is one of the urgent tasks of engine construction which requires a solution in order to meet modern environmental requirements for gas turbine engines serving as blower drives for gas compressor units. The presented research is dedicated to the analysis of influence of changes in combustion chamber design on reduction of CO₂ level in exhaust gases of gas turbine engine NK-16ST. Two modifications of the combustion chamber are considered. The first one was a serial combustion chamber with diffusion combustion, the second one was a modernized combustion chamber with a modified front device. Each of the chambers considered was tested as part of the engine. During the study, combustion products were sampled directly in the exhaust shaft and their concentrations, including the CO₂ content, were determined. As a result of this work, it was confirmed that there is a possibility to reduce the concentration of CO₂ in the engine combustion products up to 20 % without affecting the engine parameters. This reduction in carbon dioxide content was made possible by reducing the completeness of fuel combustion in the combustion chamber. The obtained data on changes in CO₂ concentration can be useful in selecting the most suitable mode of engine operation, and the presented approaches to combustion processes organization can be used by developers in designing combustion chambers of natural gas-fired gas turbine engines.

Keywords: carbon dioxide emission, combustion chamber, gas turbine engine, combustion product, gas compressor unit.

Введение

Камера сгорания – один из основных элементов, определяющих надежность и эффективность работы газотурбинных двигателей (ГТД). Рабочий процесс камеры сгорания ГТД очень сложен и определяется множеством факторов: аэродинамикой потоков воздуха и газа, характером подачи топлива и его смешения с воздухом и испарения, воспламенением, стабилизацией пламени, условиями массо- и теплообмена, закономерностями горения по длине камеры сгорания. Несмотря на существенные различия в общей компоновке и большое разнообразие в конструкторском оформлении отдельных элементов камер сгорания различных двигателей, они в своей основе имеют общие принципы организации рабочего процесса [1].

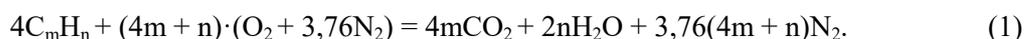
Особенностью процесса сгорания в газотурбинном двигателе является то, что суммарный состав смеси топлива с воздухом лежит за пределами воспламеняемости, а температура цикла ниже температуры мгновенного воспламенения любых углеводородных топлив. Горение в двигателе происходит в потоке воздуха, скорость которого значительно выше скорости распространения пламени углеводородных топлив. Скорость потока в камерах сгорания стационарных двигателей составляет 30–80 м/с, авиационных – до 50–120 м/с. К тому же сгорание должно происходить в весьма ограниченном объеме, а потому с высокой скоростью тепловыделения при очень быстром протекании процессов смешения и горения. Независимо от указанных ограничений, в двигателе необходимо обеспечить устойчивое горение, высокую полноту сгорания, воспламеняемость и низкие выбросы токсичных веществ.

В настоящее время вопросы снижения парниковых газов, в частности выбросов CO_2 , в выхлопных газах ГТД являются актуальными для энергетики и газотранспортной отрасли. Особый интерес представляет влияние организации горения в камере сгорания на образование CO_2 в зависимости от режимов работы ГТД [2].

Современные газообразные топлива представляют собой смесь различных углеводородных соединений. Условную химическую формулу такого топлива можно представить в виде C_mH_n . Для метана $m \sim 1$, $n \sim 4$.

В технических расчетах атмосферный воздух принимают как смесь азота и кислорода, тогда условную химическую формулу воздуха можно представить соотношением $(\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2)$. Коэффициент 3,76 показывает, что в воздухе на 1 молекулу кислорода приходится примерно 3,76 молекул азота.

Химическую реакцию окисления углеводородного топлива в воздухе можно записать символически в виде стехиометрического уравнения



Стехиометрическое уравнение записано в предположении полного превращения топлива в основные продукты сгорания и полной химической инертности атмосферного азота. Стехиометрическое уравнение дает макроскопическое описание процесса окисления топлива и позволяет определить такие важные характеристики, как стехиометрическое соотношение для топлива L_0 и состав продуктов полного сгорания, а именно:

$$L_0 = \frac{(4m + n)(\mu_{\text{O}_2} + 3,76 \cdot \mu_{\text{N}_2})}{4(m \cdot \mu_{\text{C}} + n \cdot \mu_{\text{H}})} = \frac{34,32(4m + n)}{12m + n} \frac{\text{кг воздуха}}{\text{кг топлива}}, \quad (2)$$

где μ – молекулярная масса соответствующего вещества,

$$C_{\text{CO}_2} = \frac{4m \cdot 100}{4m + 2n + 3,76(4m + n)} \%, \quad (3)$$

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{2n \cdot 100}{4m + 2n + 3,76(4m + n)} \%, \quad (4)$$

$$C_{\text{N}_2} = \frac{3,76(4m + n) \cdot 100}{4m + 2n + 3,76(4m + n)} \%. \quad (5)$$

Для метана $m = 1$, $n = 4$, то

$$L_0 \approx 17,2; C_{\text{CO}_2} \approx 9,5; C_{\text{H}_2\text{O}} \approx 19; C_{\text{N}_2} \approx 71,5 \%$$

В процессе окисления углеродосодержащих топлив окись углерода CO образуется как промежуточное вещество. Превращение CO в CO_2 в большей степени определяется элементарной реакцией [3]



Так как эта реакция является единственной, определяющей превращение CO в CO_2 , то можно сделать вывод, что весь углерод, первоначально содержащийся в топливе, превращается в CO_2 . Отсюда следует, что содержание CO_2 в продуктах сгорания будет определяться завершенностью или незавершенностью реакции его окисления.

Объект исследования

Для определения влияния конструкции камеры сгорания на содержание CO_2 в продуктах сгорания, в данной работе рассматривается два типа камер сгорания. Одна является серийной для двигателя НК-16СТ, другая – для двигателя НК-16-18СТ.

В серийной камере сгорания ГТД НК-16СТ организован диффузионный принцип сжигания топлива. Камера (рис. 1) состоит из наружного 1 и внутреннего 2 корпусов, коллектора 3, трубопроводов 4 для подачи топлива от коллектора к форсункам 5, жаровой трубы 6, включающей в себя кожухи 7 с нанесенными отверстиями 8 и патрубками смесителей 9. В кольцевом фронтальном устройстве 10 размещены 32 вихревые горелки 11. Жаровая труба – кольцевая – состоит из кольцевых секций, между которыми сформирован кольцевой канал для подачи охлаждающего воздуха, что обеспечивает конвективно-пленочное охлаждение стенок [4].

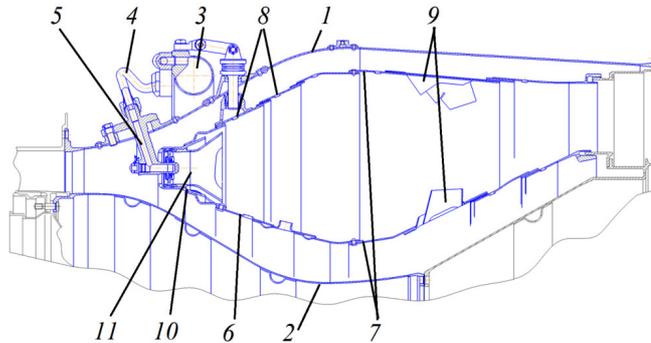


Рис. 1. Камера сгорания двигателя НК-16СТ

Fig. 1. Combustion Chamber of the Gas-turbine Engine NK-16ST

В каждой вихревой горелке организован индивидуальный подвод топливного газа посредством форсунок, обеспечивающих струйную подачу газа [5].

Фронтальное устройство жаровой трубы ГТД НК-16-18СТ (рис. 2) содержит кольцевую головку 1, включающую наружный и внутренний топливный коллектор 2. На стенке наружного топливного коллектора равномерно расположены четыре подвода, необходимые для подачи газа во внутреннюю полость коллекторов. Полости коллекторов соединяются при помощи каналов 3, расположенных во фронтальном устройстве. Так же в нем в шахматном порядке в два ряда нанесены фигурные окна 4 с центральным отверстием и стойки крепления форсунок 5 [6; 7].

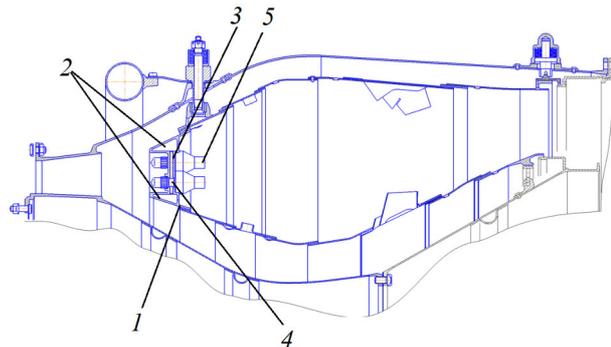


Рис. 2. Камера сгорания двигателя НК-16-18СТ

Fig. 2. Combustion Chamber of the Gas-turbine Engine NK-16-18ST

Каждая камера была испытана в составе газотурбинного двигателя. Стенд (рис. 3), где устанавливался двигатель, состоит из воздухоподводящей выравнивающей трубы, вход в которую предохраняет защитная сетка. Она необходима для предотвращения попадания посторонних частиц в трактовую часть двигателя. Для осуществления транспортировки отработавших газов в шахту выхлопа в выходной части двигателя установлено выходное устройство. В качестве загрузочного устройства свободной турбины применялся воздушный компрессор – пневмомотор [8].

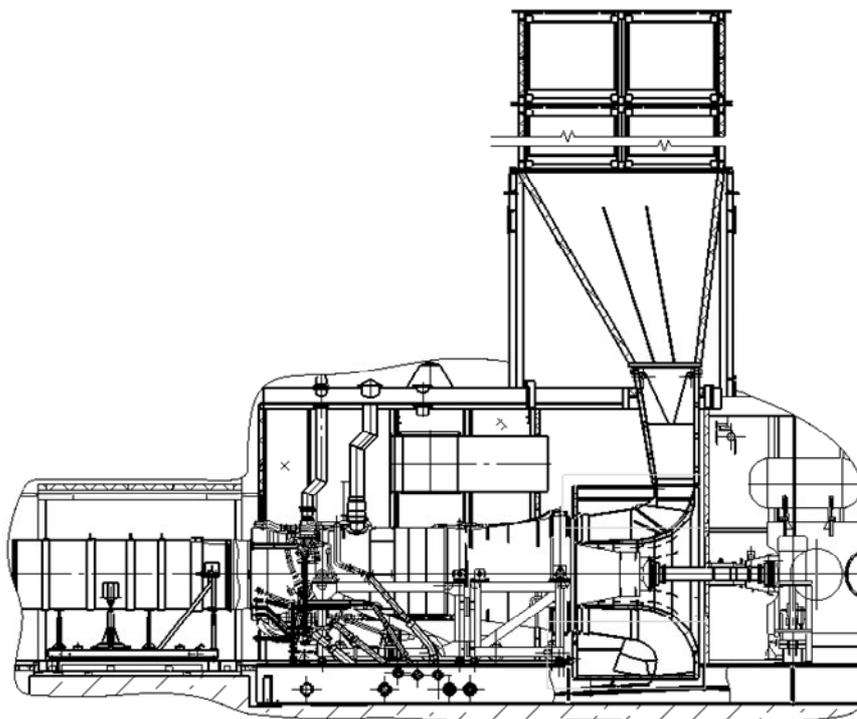


Рис. 3. Схема стенда

Fig. 3. Scheme of the Stand

Стенд оборудован необходимыми измерительными приборами. Оснащен масляной системой для выполнения смазки опор двигателя и агрегатов во время проведения испытаний. Для обеспечения запуска и подачи топливного газа к элементам топливопитания стенд содержит газовую систему. Контроль за параметрами двигателя и регулирование режимов его работы выполняется с пульта управления, оснащенного мониторами, на которые выводятся измеряемые параметры [9].

Результаты испытаний

Во время испытаний выполнялся запуск двигателей и выход на режимы необходимые для построения дроссельной характеристики. На режимах выше 10 МВт, в соответствии со стандартом [10] в выхлопной шахте производился отбор проб продуктов сгорания и определялись концентрации токсичных веществ в них.

Для отбора проб использовался газоотборный зонд, погружаемый в специальное окно, выполненное в стенке выхлопной шахты, а для определения концентрации токсичных компонентов в продуктах сгорания использовался газоанализатор Testo 350. По измеренной величине концентрации кислорода (O_2) в продуктах сгорания рассчитывается содержание CO_2 :

$$c(CO_2) = \frac{c(CO_{2max})(21 - c(O_2))}{21}, \quad (7)$$

где $c(CO_{2max})$ – максимальное значение концентрации CO_2 , %; 21 – концентрация O_2 в воздухе, %; $c(O_2)$ – измеренная концентрация O_2 в продуктах сгорания, %.

Согласно быстродействию прибора, время проведения одного измерения составляло 40 с. Обработанные газоанализатором данные выводились на экран, а также фиксировались при помощи печатного устройства, встроенного в газоанализатор [11].

Для перевода массовых концентраций CO_2 из % в $г/м^3$ принят ряд условий: температура выхлопных газов равна 618,15 К, давление выхлопных газов равно атмосферному при нормальных условиях и соответствует 101 325 Па.

Объем одного моль углекислого газа при температуре 618,15 К рассчитывается по формуле

$$V_{mCO_2T_r} = V_{mCO_2T_H} \left(\frac{T_r}{T_H} \right) \quad (8)$$

и составит 50,69 л, где $T_r = 618,15$ К, $T_H = 273,15$ К, $V_{mCO_2T_H} = 22,40$ л – объем 1 моль CO_2 при 273,15 К.

Так как масса 1 моль CO_2 M_{mCO_2} равна 44 г, то масса 1 л будет рассчитана по соотношению $M_{mCO_2}/V_{mCO_2T_r}$ и равна 0,868 г/л. Объем 1 % от 1 м³ составляет 10 л. Отсюда следует, что масса 1 % от 1 м³ равна 10 л · 0,868 г/л и равна 8,68 г [12].

Данные по содержанию CO_2 в продуктах сгорания в % и г/м³ в зависимости от режима работы двигателей сведены в таблицу.

Из рис. 4 следует, что с увеличением режима работы двигателя содержание углекислого газа CO_2 в выхлопных газах растет, что связано с увеличением расхода топлива и воздуха с набором мощности, а значит увеличением расхода продуктов сгорания.

В выхлопных газах двигателя НК-16СТ уровень содержания углекислого газа CO_2 ниже на ≈ 20 % по сравнению с двигателем НК-16-18СТ.

Если придерживаться ранее сделанного предположения, что единственным механизмом снижения CO_2 является не полное завершение реакции окисления, то снижение CO_2 должно приводить к увеличению выбросов CO , что подтверждается данными измерений (рис. 5).

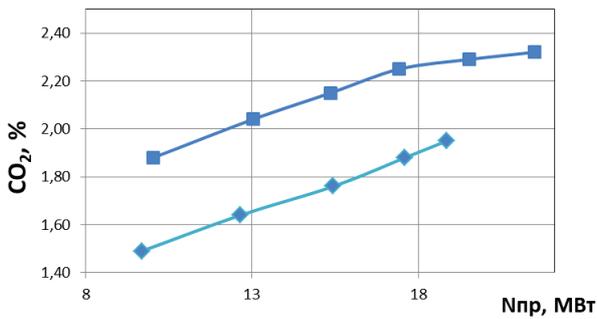


Рис. 4. Содержание углекислого газа CO_2 в продуктах сгорания:
♦ – двигатель НК-16СТ и ■ – двигатель НК-16-18СТ

Fig. 4. Content of CO_2 carbon dioxide in combustion products:
♦ – engine NK-16CT и ■ – engine NK-16-18CT

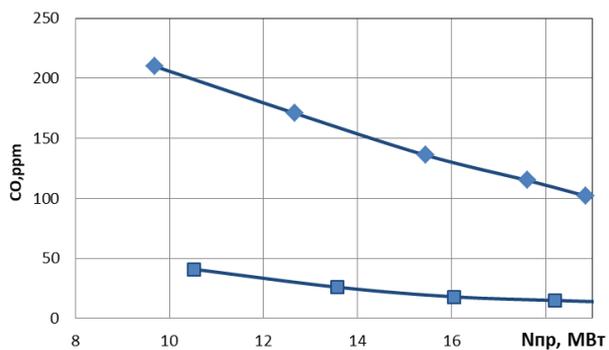


Рис. 5. Содержание оксидов углерода CO в продуктах сгорания:
♦ – двигатель НК-16СТ и ■ – двигатель НК-16-18СТ

Fig. 5. Content of carbon oxides in combustion products:
♦ – engine NK-16CT и ■ – engine NK-16-18CT

Для дальнейшего анализа представлены массовые концентрации CO_2 для каждого режима работы двигателей НК-16-18СТ и НК-16СТ, а также выполнен их перевод в г/м³ по ранее выведенному соотношению 1 % = 8,68 г/м³.

Содержание CO_2 в зависимости от режима работы двигателей

НК-16-18СТ					
	$n_{НДпр}$	$N_{пр}$	CO, ppm	CO ₂ , %	CO ₂ , г/м ³
1	4900	10,515	41	1,71	14,84
2	5100	13,577	26	1,89	16,41
3	5250	16,064	18	2,00	17,36
4	5350	18,201	15	2,10	18,22
5	5450	20,133	13	2,20	19,09
6	max	22,011	13	2,25	19,53

НК-16СТ					
	$n_{\text{НДпр}}$	$N_{\text{пр}}$	CO, ppm	CO ₂ , %	CO ₂ , г/м ³
1	4900	9,69	210	1,49	12,93
2	5100	12,66	171	1,64	14,24
3	5250	15,451	136	1,76	15,28
4	5350	17,61	115	1,88	16,32
5	max	18,864	102	1,95	16,93

Из рис. 4 и таблицы видно, что двигатель НК-16СТ с серийной камерой сгорания имеет уровень концентрации CO₂ ниже, чем двигатель НК-16-18СТ с камерой сгорания, имеющей многофорсуночное фронтное устройство [13].

Для расчета полноты сгорания топлива использована зависимость [14]:

$$\eta_{\Gamma} = 1 - (0,20175 \cdot EI_{\text{CO}} + EI_{\text{CH}_4}) \cdot 10^{-3}, \quad (9)$$

где EI_{CO} – индекс эмиссии окиси углерода; EI_{CH_4} – индекс эмиссии метана; значение 0,20175 – это коэффициент, учитывающий отношение низшей теплоты сгорания окиси углерода Q_{H}^{CO} к низшей теплоте сгорания метана $Q_{\text{H}}^{\text{CH}_4}$, которые составляют $Q_{\text{H}}^{\text{CO}} = 10096$ кДж/кг, $Q_{\text{H}}^{\text{CH}_4} = 50042$ кДж/кг.

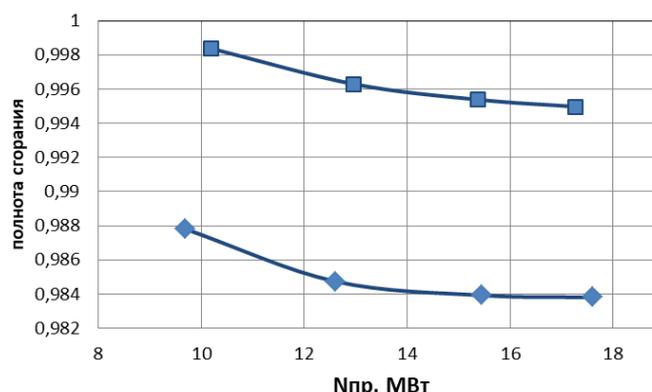


Рис. 6. Полнота сгорания топлива на различных режимах:
 ◆ – двигатель НК-16СТ, ■ – двигатель НК-16-18СТ

Fig. 6. Completeness of Combustion of Fuel on various power setting:
 ◆ – engine NK-16СТ и ■ – engine NK-16-18СТ

Индексы эмиссии EI_i для окиси углерода и метана рассчитываются при помощи уравнения

$$EI_i = \frac{\mu_i}{\mu_{\text{в}}} (1 - \alpha_i \cdot L_0) \cdot \chi_i \cdot 10^{-3}, \quad (10)$$

где $L_0 = 17,2$ – ранее рассчитанный стехиометрический коэффициент сгорания метана (кг воздуха / кг топлива); α_i – суммарный или местный коэффициент избытка воздуха; μ_i – молярная масса определяемого токсичного вещества (CO, CH₄), г/моль; $\mu_{\text{в}}$ – молярная масса воздуха, г/моль; χ_i – объемная доля токсичного вещества, ppm.

Изменение полноты сгорания характеризуется незначительным убыванием в пределах 0,5 % в диапазоне мощностей от 10 до 17 МВт, при этом на режиме 16 МВт средняя полнота для двигателя НК-16СТ составила $\eta = 0,985$, для двигателя НК-16-18СТ – $\eta = 0,996$ (рис. 6).

Заключение

Подтверждена возможность уменьшения уровня концентрации CO_2 в продуктах сгорания двигателя до 20 % за счет снижения полноты сгорания топлива в камере сгорания.

Полученные данные по изменению концентрации CO_2 с изменением режима работы двигателя могут быть полезны при выборе наиболее подходящего режима для минимизации CO_2 во время его эксплуатации.

Представленные подходы к организации процессов горения могут быть использованы разработчиками при проектировании камер сгорания газотурбинных двигателей, работающих на природном газе, для минимизации выбросов CO_2 с обеспечением оптимума по CO и полноты сгорания.

Библиографические ссылки

1. Lefebvre A. H. Fuel effects on gas turbine combustion-ignition, stability, and combustion efficiency // Am. Soc. Mech. Eng. 1984. Vol. 84, No. CONF-840611.
2. Бакланов А. В. Влияние изменения конструкции камеры сгорания на уровень CO_2 в выхлопных газах газотурбинного двигателя НК-16СТ // Газовая промышленность. 2022. № 6 (834). С. 80–88.
3. Маркушин А. Н., Бакланов А. В. Исследование рабочего процесса камер сгорания в составе ГТД // Вестник Самарского ун-та. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 3. С. 81–89.
4. Некоторые вопросы проектирования авиационных газотурбинных двигателей / Е. А. Гриценко, В. П. Данильченко, С. В. Лукачев и др. Самара : СНЦ РАН, 2002. 527 с.
5. Бакланов А. В. Влияние геометрии горелки на характеристики камеры сгорания газотурбинного двигателя // Вестник Москов. авиац. ин-та. 2021. Т. 28, № 2. С. 86–95.
6. Features of commissioning a gas turbine unit with a low-emission combustion chamber / I. E. Vorotyntsev, D. D. Tyulkin, D. G. Fedorchenko, Yu. I. Tsybizov // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1891. P. 012002.
7. Бакланов А. В. Управление процессом сжигания топлива путем изменения конструкции горелки в камере сгорания газотурбинного двигателя // Вестник Москов. авиац. ин-та. 2018. Т. 25, № 2. С. 73–85.
8. Бакланов А. В. Малоэмиссионная камера сгорания диффузионного типа с микропламенным горением для конвертированного авиационного газотурбинного двигателя // Вестник Москов. авиац. ин-та. 2017. Т. 24, № 2. С. 57–68.
9. ГОСТ 28775–90. Агрегаты газоперекачивающие с газотурбинным приводом. Общие технические условия. М. : Стандартинформ, 2005. 12 с.
10. Energy Efficient Engine Combustor Test Hardware–Detailed Design Report / D. L. Burrus, C. A. Charour, H. L. Foltz et al. NASA CR-168301.
11. Dodds W. J., Ekstedt E. E. Broad Specification Fuel Combustion Technology Program. Phase II, Final Report, 1989.
12. Lefebvre A. H. Influence of Fuel Properties on Gas Turbine Combustion Performance. AFWAL-TR-84-2104, 1985.
13. Анализ применимости моделей горения для расчёта многофорсуночной камеры сгорания ГТД / Б. Г. Мингазов, В. Б. Явкин, А. Н. Сабирзянов, А. В. Бакланов // Вестник Самарского гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. С. П. Королёва (нац. исслед. ун-та). 2011. № 5 (29). С. 208–214.
14. Канило П. М. Энергетические и экологические характеристики ГТД при использовании углеводородных топлив и водорода. Киев : Наук. думка, 1987. 224 с.

References

1. Lefebvre A. H. [Fuel effects on gas turbine combustion-ignition, stability, and combustion efficiency]. Am. Soc. Mech. Eng. 1984, Vol. 84, No. CONF-840611.

2. Baklanov A. V. [Impact of changing the combustion chamber design on the CO₂ concentration in the exhaust gases of the NK-16ST gas turbine engine]. *Gas industry*. 2022, No. 6 (834), P. 80–88 (In Russ.).
3. Markushin A. N., Baklanov A. V. [Investigation of the gas turbine engine combustion chamber workflow]. *Bulletin of the Samara university. Space equipment, technologies and mechanical engineering*. 2016, Vol. 15, No. 3, P. 81–89 (In Russ.).
4. Gritsenko E. A., Danilchenko V. P., Lukachev S. V. *Nekotoryye voprosy proyektirovaniya aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley* [Some issues of the design of aircraft gas turbine engines]. Samara, 2002, 527 p.
5. Baklanov A. V. [Burner geometry impact of gas turbine engine combustion chamber characteristics]. *Vestnik moskovskogo aviatsionnogo instituta*. 2021, Vol. 28, No. 1, P. 86–95 (In Russ.).
6. Vorotyntsev I. E., Tyulkin D. D., Fedorchenko D. G., Tsybizov Yu. I. [Features of commissioning a gas turbine unit with a low-emission combustion chamber]. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, Vol. 1891, P. 012002.
7. Baklanov A. V. [Controlling fuel combustion process by burner design change in gas turbine engine combustion chamber]. *Vestnik moskovskogo aviatsionnogo instituta*. 2018, Vol. 25, No. 2, P. 73–85 (In Russ.).
8. Baklanov A. V. [Low-emission combustion chamber of diffusion type employing micro flame burning process for converted aircraft gas turbine engine]. *Vestnik moskovskogo aviatsionnogo instituta*. 2017, Vol. 24, No. 2, P. 57–68 (In Russ.).
9. STO Gazprom 2-3.5-038-2005 Instructions for conducting control measurements of harmful emissions of gas turbine plants at compressor stations. Chelyabinsk, Center for Work Safety, 2005, 13 p.
10. Burrus D. L., Charour C. A., Foltz H. L. et al. Energy Efficient Engine Combustor Test Hardware—Detailed Design Report. NASA CR-168301.
11. Dodds W. J., Ekstedt E. E. Broad Specification Fuel Combustion Technology Program. Phase II, Final Report, 1989.
12. Lefebvre A. H. Influence of Fuel Properties on Gas Turbine Combustion Performance. AFWAL-TR-84-2104, 1985.
13. Mingazov B. G., Yavkin V. B., Sabirzyanov A. N., Baklanov A. V. [The analysis of applicability of models of burning for calculation of the GTD mnogoforsunochny combustion chamber]. *Bulletin of Samara State Aerospace University of the academician S.P. Korolyov (national research university)*. 2011, No. 5 (29), P. 208–214 (In Russ.).
14. Canilo P. M. *Energeticheskiye i ekologicheskiye kharakteristiki GTD pri ispol'zovanii uglevodородnykh topliv i vodoroda* [Energy and environmental performance of gas turbine engines when using hydrocarbon fuels and hydrogen]. Kiev, Nauk. Dumka, 1987, 224 p.

© Бакланов А. В., 2023

Бакланов Андрей Владимирович – заместитель главного конструктора; АО «Казанское моторостроительное производственное объединение». E-mail: andreybaklanov@bk.ru.

Baklanov Andrey Vladimirovich – deputy chief designer; Joint-Stock Company “Kazan motor production association”. E-mail: andreybaklanov@bk.ru.

УДК 629.785

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-706-716

Для цитирования: Расчёт параметров и характеристик вращающегося лунного реактивного пенетратора / Е. В. Гусев, В. А. Заговорчев, В. В. Родченко и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 4. С. 706–716. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-706-716.

For citation: Gusev E. V., Zagovorchev V. A., Rodchenko V. V. et al. [Calculation of the parameters and characteristics of a rotating lunar jet penetrator]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 4, P. 706–716. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-706-716.

Расчёт параметров и характеристик вращающегося лунного реактивного пенетратора

Е. В. Гусев*, В. А. Заговорчев, В. В. Родченко, Э. Р. Садретдинова,
Е. А. Шипневская

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
Российская Федерация, 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4
*E-mail: ccg-gus@mail.ru

Целью работы является определение параметров внутренней баллистики реактивного двигателя твёрдого топлива, установленного на реактивном пенетраторе, входящем в грунт с высокой скоростью вращения вокруг собственной оси. Методы исследования: для определения величины давления в камере вращающегося двигателя обычно используют известные уравнения баланса прихода и расхода газа, что и в случае невращающегося реактивного двигателя твёрдого топлива. Отличие внутренней баллистики вращающегося реактивного двигателя твёрдого топлива состоит в том, что влияние вращения на рабочий процесс учитывается коэффициентом расхода газов из камеры вращающегося двигателя, изменением скорости эрозионного горения твёрдого топлива при вращении реактивного двигателя твёрдого топлива, коэффициентом тепловых потерь. Результаты: установлено, что на параметры внутренней баллистики вращающихся реактивных двигателей твёрдого топлива основное влияние оказывают коэффициент расхода газов из камеры вращающегося двигателя, эффект эрозионного горения твёрдого топлива и изменение коэффициента тепловых потерь. Приведены основные расчетные зависимости для определения давления в камере сгорания вращающегося двигателя твёрдого топлива для периодов выхода давления на стационарный режим работы двигателя, работа двигателя на стационарном режиме и в период свободного истечения газов из камеры реактивного двигателя твёрдого топлива. Представлена методика выбора линейных и угловых размеров сопла вращающегося двигателя. Приведена оценка силы тяги для одинарного сопла, вращающегося реактивного двигателя твёрдого топлива. Установлено, что величина силы тяги вращающихся двигателей (при прочих одинаковых условиях в камере сгорания) в 1,1–1,36 раза меньше, чем у невращающихся реактивных двигателей твёрдого топлива. Проведённые опыты показали уменьшение степени закрутки газового потока вращающихся двигателей твёрдого топлива при увеличении количества топливных шашек в заряде двигателя. Заключение: результаты, изложенные в статье, могут быть полезны для научных работников, аспирантов и инженеров, занятых созданием и эксплуатацией авиационной и ракетно-космической техники, а также студентов технических вузов, обучающихся по соответствующим специальностям.

Ключевые слова: пенетратор, параметры и характеристики, вращение вокруг оси.

Calculation of the parameters and characteristics of a rotating lunar jet penetrator

E. V. Gusev^{*}, V. A. Zagovorchev, V. V. Rodchenko,
E. R. Sadretdinova, E. A. Shipnevskaya

Moscow Aviation Institute (National Research University)
4, Volokolamskoe highway, Moscow, 125993, Russian Federation
^{*}E-mail: ccg-gus@mail.ru

The purpose of the work is to determine the parameters of the internal ballistics of a solid fuel jet engine mounted on a jet penetrator entering the ground at a high rotation speed around its own axis. Research methods: to determine the pressure in the chamber of a rotating engine, the known equations for the balance of gas inflow and consumption are usually used, as in the case of a non-rotating solid fuel jet engine. The difference between the internal ballistics of a rotating solid fuel jet engine is that the effect of rotation on the operating process is taken into account by the coefficient of gas flow from the chamber of the rotating engine; a change in the rate of erosive combustion of solid fuel during rotation of a solid fuel jet engine; heat loss coefficient. Results: it was found that the parameters of the internal ballistics of rotating jet engines of solid fuel are mainly influenced by the coefficient of gas flow from the chamber of the rotating engine; effect of erosive combustion of solid fuel and change in heat loss coefficient. The main calculated dependencies for determining the pressure in the combustion chamber of a rotating solid fuel engine are presented for periods when the pressure reaches a stationary mode of operation of the engine, operation of the engine in a stationary mode and during the period of free flow of gases from the chamber of a solid fuel jet engine. A method for selecting the linear and angular dimensions of a rotating engine nozzle is presented. An estimate of the thrust force for a single nozzle rotating solid fuel jet engine is given. It has been established that the magnitude of the thrust force of rotating engines (under other identical conditions in the combustion chamber) is 1.1–1.36 times less than that of non-rotating solid fuel jet engines. The experiments carried out showed a decrease in the degree of swirl of the gas flow of rotating solid fuel engines with an increase in the number of fuel pellets in the engine charge. Conclusion: the results presented in the article can be useful for scientists, graduate students and engineers involved in the creation and operation of aviation and rocket and space technology, and can also be useful for students of technical universities studying in relevant specialties.

Keywords: penetrator, parameters and characteristics, rotation around an axis.

Введение

Теоретические и экспериментальные исследования по внедрению твёрдых тел в грунты за счёт кинетической энергии, накопленной на вне грунтового участка траектории, показывают, что участок движения в грунте иногда несёт явно выраженный криволинейный характер, при котором возможен значительный уход от прямолинейного движения вплоть до полного разворота проникающего тела и движения его донной частью вперёд. На характер движения существенное влияние оказывают силы, которые в свою очередь зависят как от формы тела, так и от начальных условий внедрения, определяемых наличием угла между вектором скорости и осью симметрии, а также угловыми скоростями прецессии, нутации и собственного вращения.

При внедрении в грунт реактивного пенетратора с работающим двигателем на его устойчивость, кроме указанных выше факторов, влияют и такие, как величина тяги, её эксцентриситет и возможность закрутки.

Целью настоящей работы является определение параметров внутренней баллистики реактивного двигателя твёрдого топлива (РДТТ), установленного на реактивном пенетраторе, входящем в грунт с высокой скоростью вращения вокруг собственной оси.

Для определения величины давления в камере вращающегося двигателя обычно используют известные уравнения баланса прихода и расхода газа, что и в случае невращающегося реактив-

ного двигателя твёрдого топлива. Отличие внутренней баллистики вращающегося РДТТ состоит в том, что влияние вращения на рабочий процесс учитывается [1]:

– коэффициентом расхода газов из камеры вращающегося двигателя

$$A_{rot} = A_0 \left(\frac{1}{1 + \frac{k}{k+1} \alpha_{кр}^2} \right)^{\frac{1}{1-\nu}} ; \quad (1)$$

– изменением скорости эрозионного горения твёрдого топлива при вращении РДТТ

$$\varepsilon_{rot} = 1 + Bn^{0,5}; \quad (2)$$

– коэффициентом тепловых потерь

$$\chi_{rot} = \frac{1 - 0,16 \left(1 + \tan^2 \alpha_{кр} \right)^{0,4}}{1 + 2\psi}, \quad (3)$$

где A_0 – коэффициент расхода газов с камеры сгорания невращающегося РДТТ.

Величина коэффициента расхода газов определяется по зависимости

$$A_0 = \frac{\dot{M}_0}{\dot{M}_T} \leq 1, \quad (4)$$

где \dot{M}_0 – реальный (опытный) массовый расход, учитывающий все возможные виды потерь,

уменьшающих расход газов через сопло; $\dot{M}_m = \frac{p_{кр} \cdot f_{кр}}{\sqrt{\chi R T_0}}$ – теоретический расход газов через со-

пло; $p_{кр}$ – давление торможения на входе в сопло; $f_{кр}$ – площадь критического сечения сопла;

χ – коэффициент тепловых потерь; $R T_0$ – приведённая сила твёрдого топлива; $B = 3,7 \cdot 10^{-6}$

при $n \leq 10^3 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$; k – показатель адиабаты; $\alpha_{кр}$ – угол закрутки газового потока в критическом

сечении сопла двигателя; n – количество оборотов вращающегося грунтового реактивного пенетратора; ν – показатель степени в законе скорости горения топлива; ψ – относительная доля сгоревшего заряда.

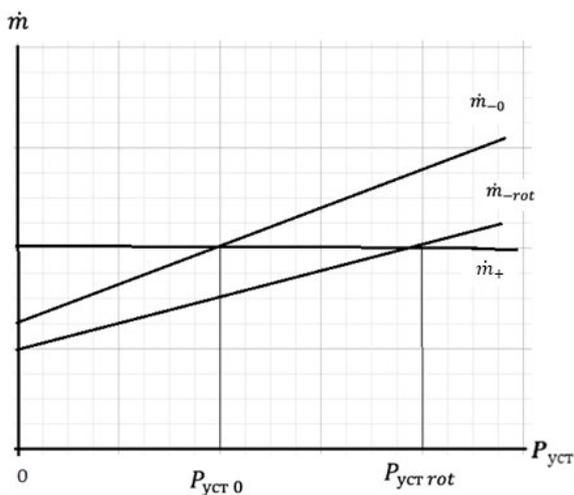


Рис. 1. График, иллюстрирующий принцип стационарности

Fig. 1. Graph illustrating the principle of stationarity

Алгоритм определения давления в камере сгорания вращающегося двигателя твёрдого топлива

1. Установившееся давление на участке стационарной работы РДТТ

На рис. 1 графически изображён принцип стационарности работы вращающегося РДТТ.

Здесь \dot{m}_+ – газоприход в камеру сгорания РДТТ; \dot{m}_0 и \dot{m}_{-rot} – газорасход невращающегося и вращающегося двигателя, соответственно.

Из графика видно, что уменьшение газорасхода у вращающегося двигателя приводит к увеличению величины установившегося давления в его камере сгорания, т. е. $P_{устrot} \geq P_0$.

При этом для расчёта $P_{устrot}$ используется уравнение

$$P_{устrot} = \left(\frac{1}{N_1} \right)^{\frac{1}{1-\nu}}, \quad (5)$$

где $N_1 = \frac{N}{\varepsilon}$; $\varepsilon = \frac{P}{\rho_m \chi_{rot} R T_0}$; $\chi_{rot}(\alpha)$ – из (3); $N = \frac{\Phi_2 A_{rot} P_k f_{кр}}{S_r U_m \rho_m \sqrt{\chi_{rot} R T_0}}$;

$U_m = f_1(T_3) f_2(p_k) f_3(\alpha_{кр}) f_4(\chi_0)$ – $U_m = f_1 f_2 f_3 f_4$ – скорость горения твёрдого топлива, зависящая от температуры заряда ($f(T_3)$), давление в камере сгорания $f_2(p_k)$, степень закрутки $f_3(\alpha_{кр})$ газового потока и критерий Победоносцева $f_4(\chi_0)$ [2; 3].

На рис. 2 представлена зависимость величины установившегося давления в камере вращающегося РДТТ от степени закрутки газового потока.

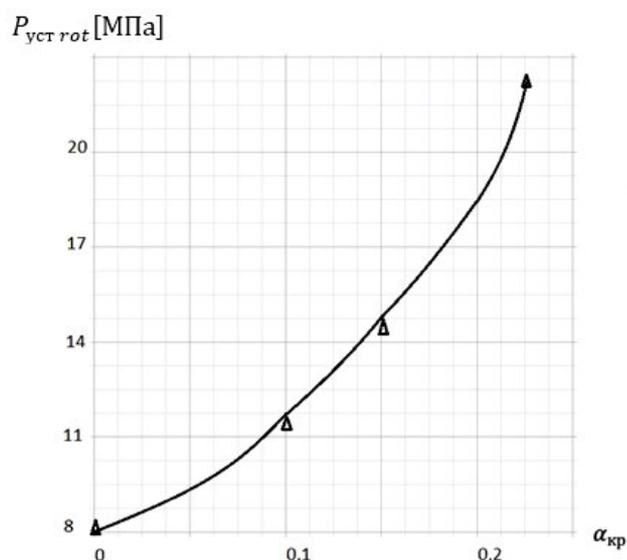


Рис. 2. Зависимость величины установившегося давления в камере сгорания от степени закрутки газового потока

Fig. 2. Dependence of the steady-state pressure in the combustion chamber on the degree of swirl of the gas flow

Расчёты $P_{устrot}$ проводились для реального двигателя модельного грунтового реактивного аппарата диаметром 40 мм. Здесь Δ – отмечены опытные значения установившегося давления. Видно хорошее согласование расчётных и опытных данных.

Таким образом, установившееся давление в камере РДТТ реактивного пенетратора изменяется в зависимости от скорости его вращения вокруг собственной оси. При этом с увеличением степени закрутки газового потока величина установившегося давления растёт, темп нарастания давления в процессе выхода двигателя на установившийся режим работы падает и при заданной массе топлива время работы двигателя уменьшается (рис. 3).

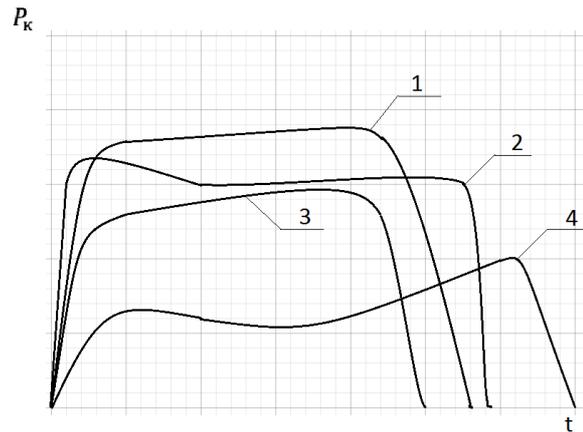


Рис. 3. Типовые зависимости давления в камере сгорания для вращающихся РДТТ: 1 – для вращающегося РДТТ; 2 – для невращающегося РДТТ; 3 – отмечается некоторое увеличение установившегося давления в камере для вращающихся двигателей при $n < 10^3 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$; 4 – показана возможность появления второго максимума, величина которого больше первого

Fig. 3. Typical pressure dependences in the combustion chamber for rotating solid propellant rocket engines: 1 – for a rotating solid propellant rocket engine; 2 – for a non-rotating solid fuel jet engine; 3 – there is a slight increase in the steady-state pressure in the chamber for rotating engines at $n < 10^3$ rpm/min; 4 – shows the possibility of the appearance of a second maximum, the value of which is greater than the first

Следует отметить, что давление в камере сгорания вращающегося двигателя может быть скорректировано либо использованием в его конструкции объема для дожигания, что увеличивает свободный объем камеры сгорания, либо изменением коэффициентов тепловых и гидравлических потерь. Коэффициент гидравлических потерь может быть рассчитан по формуле

$$\xi = \xi_0 (1 + \text{tg} \alpha_{\text{кр}}^2)^{1,375}, \quad (6)$$

где ξ_0 – коэффициент гидравлических потерь при одномерном течении газа по трубе при $\alpha_{\text{кр}} = 0$.

Расчёты показывают, что величина $\alpha_{\text{кр}}$ по причине гидравлических потерь до значений $\alpha_{\text{кр}} \approx 0,2$ почти не изменяется, поэтому учёт её уменьшения следует проводить при $\alpha_{\text{кр}} > 0,3 - 0,4$, когда $\alpha_{\text{кр}}$ уменьшается на 13–35 %.

2. Выход вращающегося РДТТ на стационарный режим

При расчёте зависимости давления по времени выхода твердотопливного вращающегося двигателя на стационарный режим работы, как и при расходах РДТТ [3; 4], определяют параметр

$$a = \frac{\varphi_2 A_{\text{rot}} b f_{\text{кр}} \sqrt{\chi_{\text{rot}} R T_0} (1 - \nu)}{W_{\text{г}}}, \quad (7)$$

где вращение учитывается введением коэффициентов A_{rot} и χ_{rot} ; b и ν – коэффициенты в законе горения топлива; $W_{\text{г}} = \rho u S_{\text{г}}$ – газовый приход в камеру сгорания; u – скорость горения топлива; $S_{\text{г}}$ – поверхность горения топливного заряда.

После этого рассчитывается полное время выхода РДТТ на стационарный режим

$$\tau_p = \frac{1}{a} \ln \frac{1 - p_b^{1-\nu}}{1 - \bar{p}^{1-\nu}}, \quad (8)$$

где $\bar{p} = 0,99$ – предельные относительные давления в камере сгорания в процессе выхода РДТТ на установившийся режим работы; p_b – давление в камере при воспламенении заряда.

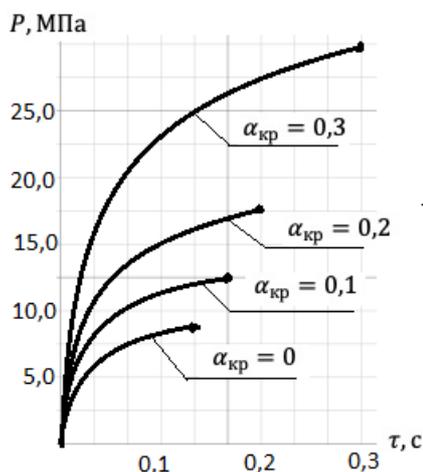


Рис. 4. Зависимость давления в камере сгорания от времени при выходе двигателя на установившийся режим

Fig. 4. Dependence of pressure in the combustion chamber on time when the engine reaches steady state

Расчёты, приводимые для вращающегося грунтового реактивного пенетратора диаметром 240 мм при углах закрутки $\alpha_{кр} = 0,1; 0,2; 0,3$ показали, что: 1) время выхода двигателя на установившийся режим работы с увеличением скорости вращения увеличивается на 23 % при $\alpha_{кр} = 0,1$, на 46 % при $\alpha_{кр} = 0,2$ и на 130 % при $\alpha_{кр} = 0,3$, т. е. от 0,13 с до 0,3 с; 2) увеличивается величина установившегося давления по сравнению с невращающимся двигателем.

Для получения зависимости (рис. 4) в начале было определено τ_p по формуле (8), а затем было выбрано три значения τ_1, τ_2, τ_3 , лежащих в интервале между τ_p и 0, и по величине этих времен определились относительные давления $\bar{p}_1, \bar{p}_2, \bar{p}_3$ по формуле

$$\bar{p}_i = \left[1 - (1 - p_b)^{1-\nu} e^{-a\tau_i} \right]^{\frac{1}{1-\nu}}, \quad (9)$$

Затем \bar{p}_i пересчитывались в реальные расчётные давления по зависимости:

$$\bar{p}_i = p_{устrot} \bar{p}_i, \quad (10)$$

где p_i вычисляются до $\bar{p} = 0,99$.

3. Расчет давления в период свободного истечения газов из камеры РДТТ

Как и для случая расчета периода последствия для невращающегося двигателя, определяется время конца горения заряда по формуле [3–5]

$$\tau_k = \frac{e}{u}, \quad (11)$$

где e – толщина горящего свода, для трубчатого заряда, горящего по наружной (D) и внутренней (d) поверхностям, в частности, равна

$$e = \frac{D-d}{4}. \quad (12)$$

С учетом зависимости скорости горения заряда от давления в камере сгорания, очевидно, что время конца горения для вращающегося двигателя будет меньше времени конца горения заряда невращающегося двигателя, поскольку давление на установившемся режиме работы вращающегося двигателя больше давления установившегося режима невращающегося двигателя.

Время полного истечения газов из камеры сгорания после сгорания твердого топлива вычисляется по формуле

$$\tau_{св} = \frac{1}{B} \left[\left(\frac{p_{krot}}{1,8} \right)^{0,1} - 1 \right], \quad (13)$$

где $B = \frac{K-1}{2} \frac{\varphi_2 A_{rot} f_{кр} b \sqrt{X_{rot} RT_0}}{W_{км}}$; $p_k = 1,8$ бар – давление в камере сгорания, до которого справедлива формула надкритического истечения.

Зависимость давления по времени свободного истечения газов определяется в следующей последовательности:

- 1) время $\tau_{св}$ разбивается на три интервала, где τ_1 , τ_2 и τ_3 – меньше $\tau_{св}$;
- 2) по формуле $p_i = \frac{p_{krot}}{(1 + B\tau_i)^{\frac{2k}{k-1}}}$ производится расчет p_1 , p_2 и p_3 .

Кривая, проходящая через точки расчета, описывает период свободного истечения газов из вращающегося РДТТ.

На рис. 5 показан график зависимости времени свободного истечения из камеры вращающегося двигателя от степени закрутки грунтового реактивного пенетратора диаметром 240 мм.

Было получено при $\alpha_{кр} > 0$, $\tau_{св} = 0,173$ с; при $\alpha_{кр} = 0,1$, $\alpha_{кр} = 0,2$ и $\alpha_{кр} = 0,3$, $\tau_{св1} = 0,22$ с, $\tau_{св2} = 0,32$ с и $\tau_{св3} = 0,55$ с, соответственно.

Из графика (рис. 5) видно, что с увеличением параметров закрутки, а, следовательно, и числа оборотов реактивного пенетратора, время свободного истечения газов из камеры сгорания после окончания горения топлива увеличивается.

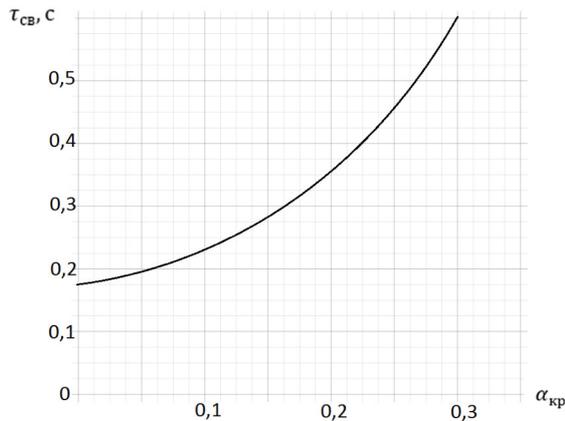


Рис. 5. Расчётная зависимость времени истечения от угла закрутки газового потока РДТТ

Fig. 5. Calculated dependence of the exhaust time on the swirl angle of the gas flow of a solid fuel jet engine

Выбор линейных и угловых размеров сопла вращающегося двигателя

Выбор размеров одинарного сопла или сопел соплового блока вращающегося РДТТ проводится по тем же зависимостям, что и для превращающегося двигателя, но с учетом установленных ранее зависимостей и коэффициентов.

Используя зависимости (5) для расчетов установившегося давления в камере вращающегося двигателя, можно найти площадь критического сечения сопла двигателя по формуле [1]

$$f_{кр} = \frac{s_r U_{\tau} \rho_{\tau} \sqrt{X_{rot} RT_0}}{\varphi_2 A_{rot} b p_{rot}^{1-\nu}}, \quad (14)$$

$$d_{кр} = \sqrt{\frac{4f_{кр}}{\pi n}}, \quad (15)$$

где n – число сопел; $A_{rot}(\alpha_{кр})$, $X_{rot}(\alpha_{кр})$ – коэффициенты; p_{rot} – проектное давление у стенки камеры двигателя.

Проведенный сравнительный анализ расчетов сверхзвуковой части сопла вращающегося и невращающегося двигателей показал, что оптимальный угол сверхзвуковой части вращающегося двигателя соответствует оптимальному углу сопла невращающегося РДТТ и равен 20° . Опытные данные, представленные в работе [1], подтверждают сделанный вывод, а также показывают, что угол входа в сопло при наличии вращения потока следует выбирать большим, чем для сопла при течении одномерного потока.

На рис. 6 приведена опытная зависимость единичного импульса $J_{ед}$ от половины угла входа в сопло α . Из графика видно, что $J_{ед}$ достигает максимума при $2\alpha = 180^\circ$, т. е. при плоской стенке соплового блока. Этот эффект объясняется тем, что плоская стенка полностью гасит осевую составляющую скорости газового потока и увеличивает ее радиальную составляющую, увеличивающую расход газа через сопло.

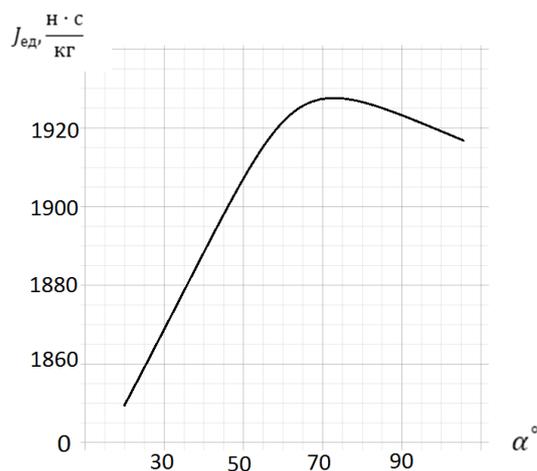


Рис. 6. Зависимость величины единичного импульса от половины угла входа в сопло двигателя

Fig. 6. Dependence of the magnitude of a single impulse on half the angle of entry into the engine nozzle

Для одинарного сопла формула силы тяги сможет быть записана следующим образом

$$P_{rot} = K_d p_{rot} f_{кр} \varphi_1 \varphi_2 A_{rot}, \quad (16)$$

где K_d – коэффициент тяги; $f_{кр}$ – площадь критического сечения сопла; $\varphi_1 = 0,95-0,98$ – коэффициент скорости; φ_2 – коэффициент расхода сопла при течении газа без закрутки; $A_{rot} = f(\alpha_{кр})$ – коэффициент расхода при вращающемся истечении газа.

Таким образом, зная законы изменения давления в камере сгорания вращающегося РДТТ и используя приведенные формулы для силы тяги, можно графически построить зависимости $P_{rot}(\tau)$ для любого типа вращающегося двигателя [6–8].

Анализ зависимостей для силы тяги вращающихся грунтовых реактивных аппаратов позволяет утверждать, что величина силы тяги у таких двигателей будет меньше, чем у невращающихся при прочих равных условиях.

Разница в силах тяги будет определяться отношением

$$\frac{A_0}{A_{rot}} = \left(\frac{P_{rotкр}}{P_{0кр}} \right)^{\frac{1}{1-\nu}} = \left(1 + \frac{k}{k-1} \alpha_{кр}^2 \right)^{\frac{1}{1-\nu}}, \quad (17)$$

тогда

$$\frac{P_0}{P_{rot}} \approx \left(1 + \frac{k}{k-1} \alpha_{кр}^2 \right)^{\frac{1}{1-\nu}}. \quad (18)$$

Для реальных твердых топлив $\nu = 0,5-0,67$ при $\alpha_{кр} = 0,1-0,15$ значение отношений тяги приходится в пределах $\frac{P_0}{P_{rot}} = 1,1-1,36$, т. е. тяга невращающегося двигателя на 10–36 % больше, чем тяга у вращающегося двигателя [9–11].

Экспериментальные исследования вращающихся ракетных двигателей твердого топлива, снаряженных многшашечными зарядами твердого топлива, показали, что в отличие от РДТТ с одношашечным зарядом неравномерность давления в камере сгорания наблюдается только в предсопловом объеме. При этом чем больше шашек в заряде, тем меньше степень закрутки как в канале отдельной шашки, так и в предсопловом блоке в целом [12–15].

Заключение

В рамках проведенного исследования решены следующие задачи:

1. Установлено, что на параметры внутренней баллистики вращающихся РДТТ основное влияние оказывают коэффициент расхода газов из камеры вращающегося двигателя, эффект эрозийного горения твердого топлива и изменение коэффициента тепловых потерь.
2. Приведены основные расчетные зависимости для определения давления в камере сгорания вращающегося двигателя твердого топлива для периодов выхода давления на стационарный режим работы двигателя, работа двигателя на стационарном режиме и в период свободного истечения газов из камеры РДТТ.
3. Представлена методика выбора линейных и угловых размеров сопла вращающегося двигателя, позволившая провести сравнительный анализ расчетов сверхзвуковой части вращающегося и невращающегося двигателей.
4. Приведена оценка силы тяги для одинарного сопла вращающегося РДТТ. Установлено, что величина силы тяги вращающихся двигателей (при прочих одинаковых условиях в камере сгорания) в 1,1–1,36 раза меньше, чем у невращающихся РДТТ.
5. Проведенные опыты показали уменьшение степени закрутки газового потока вращающихся двигателей твердого топлива при увеличении количества топливных шашек в заряде двигателя.

Библиографические ссылки

1. Михайловский Ю. В. Основы теории реактивных двигателей. МО СССР, 1970, 198 с.
2. Гостинцев Ю. А. Расходные характеристики сопла при истечении винтового потока газа // Изв. АН СССР. МЖГ. 1969. № 4. С. 158–162.
3. Алемасов В. Е. Дрегалин А. Ф. Теория ракетных двигателей. М. : Машиностроение, 1969. 547 с.
4. Орлов Б. В. Мазинг Г. Ю. Термодинамические и баллистические основы проектирования РДТТ. М. : Оборонгиз, 1968. 536 с.
5. Куров В. А. Должанский Ю. М. Основы проектирования пороховых ракетных снарядов. М. : Оборонгиз, 1961. 294 с.

6. Основы проектирования ракет / Г. В. Белов и др. М. : Машиностроение, 1974, 255 с.
7. Заговорчев В. А., Пронина П. Ф., Родченко В. В. Расчет основных проектных параметров и конструкция реактивного пенетратора для движения в лунном грунте // Известия вузов. Авиационная техника. 2020. № 4. С. 126–132.
8. Заговорчев В. А., Родченко В. В. Расчет основных проектных параметров реактивного пенетратора для движения в лунном грунте // Известия вузов. Авиационная техника. 2019. № 4. С. 65–72.
9. Импульс реактивной силы пороховых ракет / Я. Б. Зельдович и др. М. : Оборонизд, 1963. 190 с.
10. Родченко В. В. Основы проектирования реактивных аппаратов для движения в грунте. М. : МАИ-Принт, 2009. 359 с.
11. Сагомоян А. Я. Проникание. М. : Изд-во Московского ун-та, 2014. 298 с.
12. Применение реактивных пенетраторов для движения в лунном грунте / В. В. Родченко, В. А. Заговорчев, Э. Р. Садретдинова, П. Ф. Пронина // Вестник Уфимского гос. авиац. технич. ун-та. 2019. Т. 23, № 1(83). С. 56–63.
13. Федоров С. В., Федорова Н. А. Влияние импульса реактивной тяги на глубину проникания исследовательского зонда в грунт планеты // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 1 (13). DOI: 10.18698/2308-60332013-1-571.
14. Возможности моделирования проникания тел в грунтовые среды / Велданов В. А., Даурских А. Ю. и др. // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 9 (21). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-9-947.
15. Определение параметров проникания пенетраторов в грунтово-скальные преграды по различным эмпирическим зависимостям / С. В. Федоров, В. А. Велданов, А. В. Дюков, Т. А. Гущина // Инженерный журнал: наука и инновации. 2022. № 4(124). DOI 10.18698/2308-6033-2022-4-2167.

References

1. Mikhailovsky Yu. V. [Fundamentals of the theory of jet engines]. MO. USSR, 1970, 198 p.
2. Gostintsev Yu. A. [Flow characteristics of the nozzle during the expiration of a screw gas flow]. *Izvestiy Akademii Nauk USSR*. 1969, No. 4, P. 158–162 (In Russ.).
3. Alemasov V. E. Dregalin A. F. *Teoriya raketnykh dvigateley* [Theory of rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969, 547 p.
4. Orlov B. V. Mazing G. Yu. *Termodinamicheskie i ballisticheskie osnovy proektirovaniya RDTT* [Thermodynamic and ballistic principles of solid propellant rocket engine design]. Moscow, Oborongiz Publ., 1968, 536 p.
5. Kurov V. A. Dolzhansky Yu. M. *Osnovy proektirovaniya porokhovykh raketnykh snaryadov* [Fundamentals of the design of powder rocket projectiles]. Moscow, Oborongiz Publ., 1961, 294 p.
6. Belov G. V. et al. *Osnovy proektirovaniya raket* [Fundamentals of rocket design]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974, 255 p.
7. Zagorovchev V. A., Pronina P. F., Rodchenko V. V. [Calculation of the main design parameters and design of a reactive penetrator for movement in lunar soil]. *Izvestiya vischih echebnih zavedeniy. Aviacionnay tehnika*. 2020, No. 4, P. 126–132 (In Russ.).
8. Zagorovchev V. A., Rodchenko V. V. [Calculation of the main design parameters of a reactive penetrator for movement in lunar soil]. *Izvestiya vischih echebnih zavedeniy. Aviacionnay tehnika*. 2019, No. 4, P. 65–72 (In Russ.).
9. Zeldovich Ya. B. et al. *Impul's reaktivnoy sily porokhovykh raket* [Impulse of the reactive force of powder rockets]. Moscow, Oborongiz Publ., 1963, 190 p.
10. Rodchenko V. V. *Osnovy proektirovaniya reaktivnykh apparatov dlya dvizheniya v grunte* [Fundamentals of designing jet vehicles for movement in the ground]. Moscow, MAI-Print Publ., 2009, 359 p.

11. Sagomonyan A. Ya. *Pronikanie* [Penetration]. Moscow, Moscow University Publ., 2014, 298 p.
12. Rodchenko V. V., Zagovorchev V. A., Sadretdinova E. R., Pronina P. F. [Application of jet penetrators for movement in lunar soil]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tekhnicheskogo universiteta*. 2019, Vol. 23, No. 1(83), P. 56–63 (In Russ.).
13. Fedorov S. V., Fedorova N. A. [The influence of the jet thrust pulse on the depth of penetration of the research probe into the planet's soil]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*. 2013, No. 1 (13). DOI: 10.18698/2308-60332013-1-571 EDN (In Russ.).
14. Veldanov V. A., Dauriskikh A. Yu. et. al. [Possibilities of modeling body penetration in soils]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*. 2013, No. 9 (21). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-9-947 (In Russ.).
15. Fedorov S. V., Veldanov V. A., Dyukov A. V., Gushchina T. A. [Determination of parameters for penetration of penetrators into soil-rock barriers according to various empirical dependencies]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*. 2022, No. 4(124), DOI 10.18698/2308-6033-2022-4-2167 (In Russ.).

© Гусев Е. В., Заговорчев В. А., Родченко В. В.,
Садретдинова Э. Р., Шипневская Е. А., 2023

Гусев Евгений Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры 610 «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем»; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). E-mail: ccg-gus@mail.ru.

Заговорчев Владимир Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры 610 «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем»; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). E-mail: zagovorchev@mai.ru.

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

Садретдинова Эльнара Рамилевна – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора Аэрокосмического института; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). E-mail: elnara-5@mail.ru.

Шипневская Елизавета Алексеевна – магистр; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). E-mail: Shipnevskaya.E@gmail.com.

Gusev Evgeniy Vladimirovich – Cand. Sc., Associate Professor of Department 610 “Operation Management of Rocket and Space Systems”; Moscow Aviation Institute (National Research University). E-mail: ccg-gus@mail.ru.

Zagovorchev Vladimir Aleksandrovich – Cand. Sc., Associate Professor, Associate Professor of Department 610 “Operation Management of Rocket and Space Systems”; Moscow Aviation Institute (National Research University). E-mail: zagovorchev@mai.ru.

Rodchenko Vladimir Viktorovich – Dr. Sc., Professor, Professor of Department 610 “Operation Management of Rocket and Space Systems”; Moscow Aviation Institute (National Research University). E-mail: rodchenko47@mail.ru.

Sadretdinova Elnara Ramilevna – Cand. Sc., associate professor, deputy Director of the Aerospace Institute; Moscow Aviation Institute (National Research University). E-mail: elnara-5@mail.ru.

Shipnevskaya Elizaveta Alekseevna – master, Moscow Aviation Institute (National Research University). E-mail: Shipnevskaya.E@gmail.com.

УДК 536.2:623.5

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-717-736

Для цитирования: Подкопаев И. А., Подкопаев А. В., Должиков В. И. Математическая модель теплофизического нагружения малокалиберного артиллерийского ствола с вариантной дискретизацией полупелых слоев расчетной области // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 4. С. 717–736. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-717-736.

For citation: Podkopaev I. A., Podkopaev A. V., Dolzhikov V. I. [Mathematical model of thermophysical loading of a small-caliber artillery barrel with variant discretization of half-integer layers of the computational domain]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 4, P. 717–736. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-717-736.

Математическая модель теплофизического нагружения малокалиберного артиллерийского ствола с вариантной дискретизацией полупелых слоев расчетной области

И. А. Подкопаев, А. В. 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

В условиях непрерывного финансирования программ Министерства обороны Российской Федерации особенно остро встает вопрос поиска наиболее результативных путей модернизации изделий вооружения и военной (специальной) техники, наработки в области которых максимальны и процессы их совершенствования могут занять не более нескольких лет. К таким изделиям, в частности, можно отнести авиационное артиллерийское оружие (ААО), перспективы использования которого сохраняются на весь период существования армии с вооружением обычного типа. Основным фактором, влияющим на качество функционирования ААО, считается теплофизическое нагружение малокалиберного артиллерийского ствола (далее – ствол) в процессе стрельбы. Проблема повышения точности определения температурного поля ствола вновь актуализирована ужесточением условий нанесения ударов по целям. На первый план выдвинулись вопросы, тесно связанные с интенсификацией режимов применения ААО. Это вопросы нагрева, охлаждения, прочности при нагреве, износа, живучести стволов, вопросы безопасности и эффективности стрельбы. Несмотря на методологическую очевидность аналитических и численных подходов формализации теплопередачи в стволе, их практическая реализация довольно сложна. Физико-математический смысл этой причины следующий: возможная неустойчивость решений; проявление осцилляций в областях больших градиентов; одновременное присутствие в областях решений сверхзвуковых, звуковых и дозвуковых зон; существование ламинарных, турбулентных течений и других нелинейных образований; нетривиальность постановки граничных условий; наличие термического сопротивления поверхностей и т. д. Однако практические нужды обеспечения безопасности и повышения эффективности огневой эксплуатации ААО диктуют необходимость получения близкого приближения рассматриваемой задачи к ее возможно существующему точному аналитическому решению. Целью работы установлено совершенствование математического аппарата, моделирующего температурное поле ствола на основе сочетания методов теплообмена и математической физики. Проверкой достоверности разработанной математической модели (далее – модель, если из контекста изложения материала ясно, что речь идет именно о предлагаемом инструментарии), установлены факты отсутствия методических ошибок при формировании составных блоков модели и повышения точности дефиниции теплового нагружения ствола на 9,4 %. Исходя из акцентов заявленной проблемы, аргументированы направления совершенствования модели.

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

Mathematical model of thermophysical loading of a small-caliber artillery barrel with variant discretization of half-integer layers of the computational domain

I. A. Podkopaev, A. V. 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

In the conditions of continuous financing of the programs of the Ministry of defense of the Russian Federation, the question of finding the most effective ways to modernize weapons and military (special) equipment, the developments in which are maximum and the processes of their improvement can take no more than a few years, is particularly acute. Such products, in particular, include aviation artillery weapons (AAO), the prospects for the use of which remain for the entire period of the army's existence with conventional weapons. The main factor influencing the quality of the AAO functioning is considered to be the thermophysical loading of a small-caliber artillery barrel (hereinafter referred to as the barrel) during firing. The problem of increasing the accuracy of determining the temperature field of the barrel is again updated by tightening the conditions for striking targets. Issues closely related to the intensification of AAO application regimes have come to the fore. These are issues of heating, cooling, thermal strength, wear, barrel survivability, issues of safety and firing efficiency. Despite the methodological evidence of analytical and numerical approaches to formalizing heat transfer in the wellbore, their practical implementation is rather complicated. The physical and mathematical meaning of this reason is as follows: possible instability of solutions; manifestation of oscillations in areas of large gradients; simultaneous presence in the solution regions of supersonic, sonic and subsonic zones; the existence of laminar, turbulent flows and other non-linear formations; non-triviality of setting boundary conditions; the presence of thermal resistance of surfaces, etc. However, the practical needs of ensuring safety and increasing the efficiency of fire operation of AAO dictate the need to obtain a close approximation of the problem under consideration to its possibly existing exact analytical solution. The aim of the work is to improve the mathematical apparatus that simulates the temperature field of the shaft based on a combination of heat transfer methods and mathematical physics. By verifying the reliability of the developed mathematical model (hereinafter referred to as the model, if from the context of the presentation of the material it is clear that we are talking about the proposed tools), the facts of the absence of methodological errors in the formation of the constituent blocks of the model and the increase in the accuracy of determining the thermal loading of the wellbore by 9.4% were established. Based on the accents of the stated problem, the directions for improving the model are argued.

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

Введение

Анализ существующих тенденций развития артиллерии убедительно показывает, что в настоящее время основное внимание специалистов уделяется не столько созданию новых образцов, сколько оптимизации тактико-технических характеристик серийных типов ААО [1]. Немаловажное препятствие при изысканиях запаса функциональных возможностей ААО проявляется в явлении нагрева ствола, который циклично подвергается высоким термомеханическим нагрузкам, создаваемым режимами стрельбы. Ствол в значительной степени определяет боевые свойства ААО, так как именно в стволе реализуются баллистические характеристики и от его конструкции во многом зависит конструктивное исполнение всех элементов системы «патрон – ствол». Вследствие этого научно-техническая задача формализации температурного поля ствола представляется приоритетной задачей исследования ААО.

Физические смыслы процесса автоматической стрельбы указывают на необходимость непрерывного описания нестационарности нагрева и охлаждения ствола решением дифференциального уравнения теплопроводности и условий однозначности с переменными, непрерывными и разрывными коэффициентами [2]. Тем не менее точное решение уравнения теплофизики ограничено для некоторого круга задач. В число таких задач входит многомерная нестационарная нелинейная задача передачи теплоты в цилиндрической стенке переменного по длине сечения. Не останавливаясь на многообразных вариациях аппроксимационных схем дифференциального уравнения теплопроводности и условий однозначности в различных предметных областях, отметим наиболее успешные подходы, отработанные отечественными и зарубежными учеными. Так, в статьях [3–5] предложены схемы экспериментальных исследований и методы обработки выходных данных, обеспечивающие повышение точности определения температуры тела и расширение диапазона измерений; в публикации [6] представлена уникальная тепловая модель, разработанная на основе аппарата теории вероятностей; в работе [7] численными решениями многомерной задачи теплопроводности определены температурные поля обретенных стенок различной конфигурации; трудом [8] предложены инструменты математического моделирования (далее – моделирование) температурного поля в узлах газовых турбин, максимально учитывающие совокупность параметров в многофакторных граничных условиях пограничного слоя; в статье [9] 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 [10–13].

Несмотря на то, что в анализируемых трудах почти все изложение материала, естественно, носит сугубо специфический характер, некоторые идеи коллег оказались полезными при достижении цели настоящей работы.

Формирование модельной схемы исследования температурного поля ствола

Получение искомого решения поставленной задачи в нестационарной постановке с теплофизическими коэффициентами, зависящими от температуры, выполнено в последовательности, обеспечивающей поэтапную конкретизацию зависимых действий.

Поскольку ствол имеет форму ограниченного цилиндра конечной длины, при конструктивном отсутствии во внутренних сечениях ствола источников теплоты, основное уравнение теплопроводности представлено в цилиндрической системе координат в виде [2; 14; 15]:

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

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

Коэффициент a в уравнении (1) существенен для нестационарных тепловых процессов и характеризует скорость изменения температуры тела

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}, \quad (2)$$

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

Если коэффициент теплопроводности стали ствола λ характеризует способность материала проводить теплоту, то коэффициент температуропроводности ствольной стали a является мерой теплоинерционных свойств исследуемого тела. Скорость изменения температуры в любой точке ствола будет тем больше, чем больше величина коэффициента a , что обнаруживает

проверочное условие при оперировании формулой (2), сформированной в виде таблицы зависимостей коэффициентов теплопроводности λ и удельной теплоемкости c ствольной стали от температуры ствола T [16].

Наиболее полные математические модели процессов теплообмена, протекающих в различных изделиях, имеющих разнообразные конфигурации, учитывают наличие неравномерных пространственно-временных полей у искомых величин: температур твердых тел, жидкостей, газов, тепловых потоков, интенсивностей излучения и т. д. [6–9]. Такие математические модели представляют собой системы дифференциальных уравнений в частных производных интегральных и интегродифференциальных уравнений. Однако решение рассматриваемой задачи ограничено построением модели, основанной на специфических допущениях, что объясняется следующими причинами:

- непосредственная реализация полных тепловых математических моделей возможна исключительно для элементарных объемов при несложных граничных условиях;
- применение абсолютной математической модели функционирования импульсной тепловой машины затруднено отличием границ элементов ААО и большим числом не всегда детерминированных исходных данных;
- вопрос согласования точностных характеристик физико-математических методов с предполагаемыми характеристиками машинного времени, памяти и разрядной сетки предполагает последовательное использование более упрощенных, по сравнению с полной, математических моделей, описывающих теплофизическое нагружение ствола с разной степенью детализации.

При решении задачи о возможно полном и объективном определении температурного поля нагретого стрельбой ствола принимаются следующие допущения, относящиеся к основным допущениям предметной области знаний:

- начальная температура ствола примерно равна температуре окружающей среды ($T_0 = T_2$) или соответствует ее распределению по поверхности ствола, последующие нагружения выстрелами характеризуются наличием вполне определенного температурного поля ствола перед каждым выстрелом;
- материал ствольной стали ОХН2МФА считается изотропным и однородным, т. е. коэффициенты теплопроводности λ и удельной теплоемкости c стали ствола не зависят от пространственных координат;
- контакт гильзы со стенкой патронника принимается идеальным вследствие плотного прижатия гильзы под действием давления пороховых газов (далее – газы) при выстреле;
- патрон представляется модельным концентратором температур и имитируется сосредоточенной теплоемкостью с постоянными теплофизическими характеристиками.

Первое и второе допущения о механизме теплопередачи в стволе позволяют полагать отсутствие флуктуаций температуры T на наружной и внутренней поверхностях сечений ствола после выстрела. Тогда изотермические поверхности остаются цилиндрическими, имеющими с трубой общую ось, а температура ствола T будет изменяться только в радиальном и продольном направлениях, т. е. $\partial T / \partial \theta = 0$ и $\partial^2 T / \partial \theta^2 = 0$ [2; 14]. Из трех координат, записанных в уравнении (1) для трехмерного случая, при рассмотрении прикладной осесимметричной задачи определения температурного поля ствола останутся две координаты z и r . Кроме того, так как ствол является телом вращения и симметричен относительно продольной оси, то после некоторых преобразований, проведенных с целью удобства группировки данных, формула (1) сводится к уравнению нахождения двумерного температурного поля ствола на плоскости $(0, z, r)$:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (3)$$

Здесь же следует заметить, что принятие крайних двух допущений обуславливает обсужденную выше необходимость учета в уравнении (3) зависимости коэффициентов теплопроводности λ и удельной теплоемкости c ствольной стали, входящих в выражение (2), от температуры

ствола T при исследовании прикладных вопросов безопасного нахождения очередного патрона в разогретом стрельбой стволе.

Основное дифференциальное уравнение теплофизики (3) устанавливает связь между временными и пространственными изменениями температуры в любой точке ствола, в которой происходит явление теплопроводности. Дифференциальное уравнение вида (3) может иметь бесчисленное множество решений. Выделение из этого множества решения, отображающего условия теплового взаимодействия в стволе и конкретизирующего поставленную задачу, осуществлено путем присоединения к уравнению (3) геометрических, краевых и физических условий однозначности. Под краевыми условиями однозначности далее понимается совокупность начального и граничных условий.

При аргументации геометрических условий однозначности была выбрана самая легкая в мире 30-ти миллиметровая авиационная пушка ГШ-301 с уникальной одноствольной схемой автоматики, стоящая на вооружении большей части современных и планирующаяся на оснащение перспективных комплексов авиационного вооружения. Так как ствол является симметричным телом вращения относительно продольной оси, то введение в рассмотрение усеченной области, состоящей из внутренней Γ_1 , внешней Γ_2 и вертикальных Γ_3 , Γ_4 границ, расположенных по одну сторону от продольной оси ствола, вполне достаточно. На рис. 1 показана схема осевой симметрии ствола ААО типа ГШ-301 в цилиндрической системе координат $(0, z, r)$, конкретизирующая схему, представленную в публикации [17] включением обозначений границ $\Gamma_1 - \Gamma_4$, требуемым для дальнейших уточнений. Как и прежде, ось z совпадает с продольной осью ствола, а распределение температуры в каждом расчетном поперечном сечении ствола симметрично относительно оси канала $T = T(r)$.

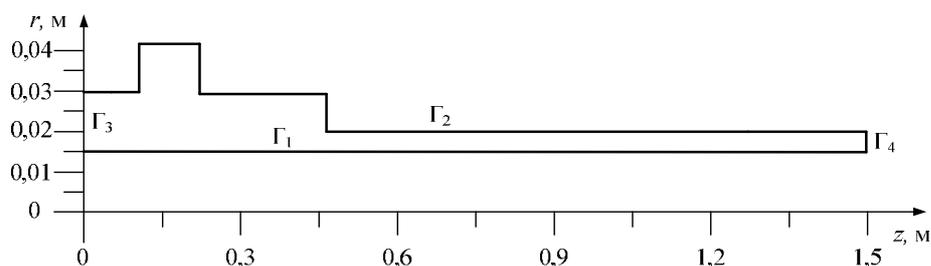


Рис. 1. Схема осевой симметрии ствола авиационной пушки ГШ-301

Fig. 1. Scheme of axial symmetry of the GSh-301 aircraft gun barrel

В процессе применения ААО полет летательного аппарата, как правило, выполняется на квазиустановившемся режиме $v_2 \approx \text{const}$ и, исходя из первого допущения, начальные условия задачи записаны в виде

$$T(z, r, 0) = T_2 = \text{const.} \quad (4)$$

Граничные условия для моделируемого процесса должны отображать условия теплового взаимодействия между окружающей средой и поверхностью тела. В общем случае граничные условия могут быть заданы несколькими способами. В теории теплопередачи различают граничные условия четырех родов [2; 14]. Граничные условия I-го рода задаются в виде распределения температур на поверхности тел. Математическое описание теплопередачи граничными условиями I-го рода применяется при заданных изменениях температур на границах тел или весьма интенсивной теплопроводности на поверхностях, когда температуры поверхностей близки между собой. Круг таких практических задач ограничен, и граничные условия I-го рода используются в основном при оценочных расчетах. Граничные условия II-го рода задаются распределением плотности теплового потока на поверхности тела. Физическая сущность условий теплообмена, отвечающих граничным условиям II-го рода, отражает нагревание и охлаж-

дение тел посредством излучения, когда теплообмен происходит главным образом по закону Ламберта – Бера при равномерном обогреве поверхности тела. Граничные условия III-го рода задаются в виде зависимости плотности теплового потока вследствие теплопроводности со стороны тела от температур поверхности тела и окружающей среды. Математическое описание процессов нагрева и охлаждения тела выполняется законом Ньютона. Аналитические выражения для граничных условий III-го рода нашли широкое применение при исследованиях теплопередачи на границах материалов и веществ. Граничные условия IV-го рода (условия сопряжения) задаются как условия непрерывности температурного поля и сохранения энергии на поверхностях соприкосновения многослойных структур.

В практике исследований теплопередачи в твердых телах, обтекаемых газовыми потоками широкое применение нашло задание граничных условий III-го рода на границе между телом и потоком. Принимая также во внимание то, что стволы являются нетеплоизолированными, при решении задачи по определению температурного поля ствола авиационной пушки ГШ-301, граничные условия зададим в виде температур окружающей среды и законов теплообмена между этой средой и поверхностью ствола, в зависимости от конструктивных характеристик и условий функционирования.

На внутренней Γ_1 и внешней Γ_2 границах ствола зададим зависимость коэффициента теплопроводности стали ствола λ от температуры газов T_1 и температуры воздуха T_2 , соответственно.

На внутренней границе Γ_1 ствола будет осуществляться конвективный теплообмен между горячими газами и каналом ствола

$$-\lambda_c \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r_0} = \alpha_1 (T_1 - T), \quad (5)$$

где r_0 – внутренний радиус ствола; α_1 – коэффициент теплоотдачи от газов к каналу ствола.

Здесь и далее зависимость рассматриваемых величин от текущего времени t очевидна.

Заметим, что для расчета граничных условий теплообмена в канале ствола необходимо определение внутрибаллистических параметров газов из решения основной задачи внутренней баллистики, изложенное в статье [18].

На внешней границе Γ_2 ствола происходит конвективный теплообмен между натекающим воздухом и внешней поверхностью ствола

$$-\lambda_c \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r_{y_j}} = \alpha_2 (T - T_2), \quad (6)$$

где r_{y_j} – толщина (наружные радиусы) элементов ствола; α_2 – коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности ствола к воздуху.

Разработке математической модели теплообмена внутри и в окрестностях ствола при околостенных течениях теплоносителей, позволяющей дефинировать коэффициенты теплоотдачи от газов к каналу ствола α_1 и от внешней поверхности ствола к воздуху α_2 , присутствующие в выражениях (5) и (6), соответственно, посвящена публикация [13].

В соответствии со вторым допущением, вертикальные границы ствола Γ_3 и Γ_4 считаются адиабатными, т. е. тепловым потоком через эти границы можно пренебречь:

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=l} = 0, \quad (7)$$

где l – длина ствола.

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.

В целях повышения точности моделирования температурного поля ствола выполнен учет влияния гильзы, находящейся во время выстрела в патроннике. На основании третьего допущения схематизацию переноса тепла возможно осуществить посредством описания явления теплопроводности. Так как толщина стенки гильзы сравнительно мала, предположен ее мгновенный прогрев до температуры газов при выстреле T_1 . Граничное условие на поверхности патронника в характерных точках ствола, где происходит непосредственный контакт гильзы со стенкой, сформулировано в виде граничного условия I-го рода [2; 14]

$$T(z = 0 \dots 0,175; r = 0) = T_1. \quad (8)$$

Нестационарное температурное поле ствола определимо при известном дифференциальном уравнении процесса (3) и заданных дополнительных условиях (4) – (8), полностью определяющих краевую задачу:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right); \\ -\lambda_c \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r_0} &= \alpha_1 (T_1 - T); \\ -\lambda_c \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r_{y_j}} &= \alpha_2 (T - T_2); \\ \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} &= 0; \quad \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=l} = 0; \\ T(z = 0 \dots 0,175; r = 0) &= T_1; \\ T(z, r, 0) &= T_2 = \text{const.} \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

Таким образом, при ряде упрощающих допущений, задача нагружения ствола сформулирована в завершённой форме. Однако, как отмечается в работах [2; 14; 19–22], объективное отсутствие точного аналитического решения прямых многомерных нестационарных нелинейных задач теплообмена в областях со сложной конфигурацией границ приводит к необходимости применения численных методов.

Синтез конечно-разностной схемы расчета температурного поля ствола

Для большинства конструкций сложной формы, к которым также относится и конструкция ствола, не известны и не табулированы система собственных функций и спектр собственных значений соответствующей однородной задачи [19]. Поэтому для подобных тел в этом случае удобно использовать как наиболее универсальный метод конечных разностей [19–22].

Заменена области непрерывного изменения аргумента дискретным множеством точек, пересечения которых образует узлы, т. е. построение разностной сетки (далее – сетка), а также сведение системы дифференциальных уравнений в частных производных (9) к конечно-разностной схеме, т. е. композиция системы конечно-разностных алгебраических (далее – разностных) уравнений, выполнены по аналогии с приемами, изложенными в публикации [17]. Некоторое авторское дублирование информации опосредуется сосредоточением классических физико-математических смыслов вопроса о нагреве и охлаждении ствола.

Область Ω_T непрерывного изменения аргументов искомой величины T заменена некоторым конечным множеством точек, лежащих в этой области. Точки сетки формирования конечной разности функции целочисленного аргумента T_{kj} по оси z обозначены через k , а аналогичные 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 kj -точках сечений ствола. В соответствии с выбранной системой координат $(0, z, r)$, в направлении оси z ствол разбит на \mathcal{N} равных час-

тей $\vartheta = l / \Delta z$, а в направлении оси r на v равных частей $v = r_y / \Delta r$, где $\Delta z, \Delta r$ – шаги сетки по соответствующим координатам; r_y – максимальная толщина ствола. Для этого в направлении, перпендикулярном оси z , проведено $\vartheta - 1$ лучей и в направлении, перпендикулярном оси r , направлено $v - 1$ лучей, как представлено на рис. 2. В результате такого разбиения располагаем сеткой, состоящей из совокупности внутренних (на рис. 2 обозначены \bullet) и граничных (на рис. 2 обозначены \circ) узлов. Так как, в рассматриваемом случае $\Delta z = l / \vartheta = \text{const}$ и $\Delta r = r_y / v = \text{const}$, то множество узлов z_k , определяемых точками с номерами $k = 0, 1, 2, \dots, K_\vartheta$ и множество узлов r_j , определяемых точками с номерами $j = 0, 1, 2, \dots, J_v$, представляет собой равномерную пространственную сетку в области $\Omega_{T_{kj}}$.

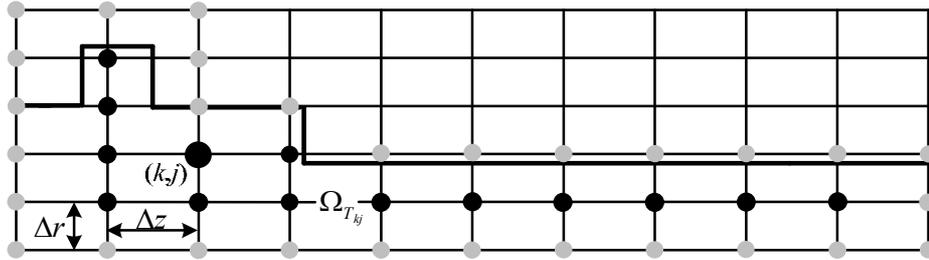


Рис. 2. Сеточная схема ствола авиационной пушки ГШ-301

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

В отличие от предыдущей версии [17], здесь рассмотрены два возможных подхода к заданию геометрических условий однозначности при несовпадении граничных узлов сетки с границами ствола. Одним из них является введение дополнительных узлов в точках несовпадения линий сетки с элементами геометрии ствола. Второй подход заключается в том, что геометрия ствола аппроксимируется линиями, проходящими через граничные узлы сетки и геометрические условия однозначности переносятся на эти линии. Вследствие нецелесообразности введения дополнительных узлов, приводящего к значительному усложнению задачи построения разностной схемы, второй подход оказался более предпочтительным, так как он не вносит дополнительных трудностей в написание разностных уравнений. Аппроксимация геометрии ствола реализована его условным разбиением на конечное число секций, каждая из которых характеризуется длиной и толщиной, которые приведены к шагам пространственной сетки Δz и Δr по осям z и r , соответственно.

По аналогии с сеткой для пространственной области $\Omega_{T_{kj}}$ вводится временная сетка области Ω_{T_j} расчета величины T^i во множестве узлов τ_i , определяемых точками $i = 0, 1, 2, \dots, I_0$, где i и I_0 – текущая и граничная, соответственно, точки сетки формирования конечной разности температуры ствола T по времени t . Шаг сетки по времени t обозначен Δt .

Решение нестационарной задачи теплопроводности в стволе предопределяет безусловное пересечение одномерных по каждому из направлений пространственных сеток с временной сеткой в следующем виде:

$$\Omega_{T_k T^i} = \Omega_{T_k} \times \Omega_{T^i} = \left[\begin{array}{l} (z_k, \tau_i), z_{k+1} = z_k + \Delta z, \tau_{i+1} = \tau_i + \Delta t; \\ k = 0, 1, 2, \dots, K_\vartheta; i = 0, 1, 2, \dots, I_0; \\ z_0 = 0, z_{K_\vartheta} = 1,5 \text{ м}, \tau_0 = 0, \tau_{I_0} = t. \end{array} \right]$$

$$\Omega_{T_j T^i} = \Omega_{T_j} \times \Omega_{T^i} = \left[\begin{array}{l} (r_j, \tau_i), r_{j+1} = r_j + \Delta r, \tau_{i+1} = \tau_i + \Delta t; \\ j = 0, 1, 2, \dots, J_v; i = 0, 1, 2, \dots, I_0; \\ r_0 = 15 \cdot 10^{-3} \text{ м}, r_{J_v} = 42 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \tau_0 = 0, \tau_{I_0} = t. \end{array} \right], \quad (10)$$

выражение (10) образует трафарет пространственно-временной сетки, схема которого по продольной координате z изображена на рис. 3.

Для построения разностных аналогов дифференциальных операторов системы уравнений (9) использован метод формальной замены производных конечно-разностными отношениями. Данный метод наиболее обоснован и применим в задачах подобного класса и основывается на разложении в ряд Тейлора достаточно гладких функций, что, как правило, позволяет сохранить локальные свойства дифференциальных уравнений [15]. Кроме того, метод аппроксимации производных рядами Тейлора имеет два основных преимущества:

- когда размер элементарной ячейки стремится к нулю, разностное уравнение приводится к дифференциальному уравнению, т. е. обеспечивается совместимость уравнений, что является важным критерием устойчивости;

- разностные уравнения любой степени точности могут быть получены добавлением или отсоединением необходимого числа членов в аппроксимирующих рядах, а при необходимости математической проверки, точность аппроксимации оценивается по отброшенным членам ряда.

Наиболее естественный способ замены производной основывается на определении производной (например, по координате z) как предела [15; 19]:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} [T(z + \Delta z) - T(z)] \frac{1}{\Delta z}. \quad (11)$$

Если в равенстве (11) зафиксировать шаг Δz , то получим приближенную формулу для первой производной, выраженной через конечные разности.

Для так называемого правого разностного отношения или разности «вперед»:

$$\frac{\partial T}{\partial z} \approx [T(z + \Delta z) - T(z)] \frac{1}{\Delta z}. \quad (12)$$

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

$$\frac{\partial T}{\partial z} \approx [T(z) - T(z - \Delta z)] \frac{1}{\Delta z}. \quad (13)$$

При решении задач теплопроводности необходимо аппроксимировать и вторую производную. Для второй производной рассматривается линейная комбинация отношений (12) и (13):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \approx [T(z + \Delta z) - 2T(z) + T(z - \Delta z)] \frac{1}{\Delta z^2}. \quad (14)$$

Каждый переход на 1 шаг «вперед» условно обозначен через «+1», а «назад» – через «-1». Тогда для k -й точки сетки формирования конечной разности величины T_{kj} по оси z правое разностное соотношение (12) преобразуется к виду

$$\frac{\partial T}{\partial z} = (T_{k+1} - T_k) \frac{1}{\Delta z}. \quad (15)$$

Аналогично преобразуется левое разностное отношение (13):

$$\frac{\partial T}{\partial z} = (T_{k+1} - T_k) \frac{1}{\Delta z}. \quad (16)$$

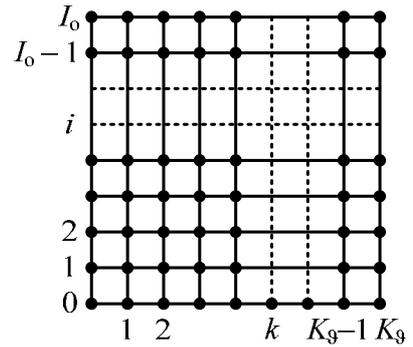


Рис. 3. К выбору пространственно-временной сетки (на примере пространственной координаты z и времени t)

Fig. 3. On the choice of a space-time grid (on the example of the spatial coordinate z and time t)

Разностный аналог второй производной, соответствующий формуле (14), представлен отношением

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = (T_{k+1} - 2T_k + T_{k-1}) \frac{1}{\Delta z^2}. \quad (17)$$

Формулы (11)–(17) и их обоснования справедливы также и при замене разностными соотношениями производной по координате r в системе уравнений (9). В этом случае в уравнениях-аналогах вместо переменной z будет присутствовать переменная r , а индекс k будет замещен индексом j . Обнаруженные аналогии будем иметь в виду далее, иногда не прибегая к прямой детализации разностной схемы по пространственной переменной r .

При построении соотношений, аппроксимирующих в системе уравнений (9) временную производную $\partial T/\partial t$, допустимо использование значений температур в kj -точках сечений ствола в различные моменты времени: $T_{k,j,i}$, $T_{k,j,i-1}$, $T_{k,j,i-2}$, Однако в практике решения большинства прикладных задач теплопроводности в подавляющем большинстве случаев используются исключительно двухслойные (по времени t) разностные схемы, аппроксимирующие значения искомых температур на текущей i -й и предыдущей $(i-1)$ -й временной точке. Значительно реже учитываются значения температур в $(i-2)$ -й момент времени получением трехслойных разностных схем [19–22].

При получении вариантов двухслойных разностных схем, производная по времени аппроксимируется временной разностью «назад»:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = (T^i - T^{i-1}) \frac{1}{\Delta \tau}. \quad (18)$$

Пространственные дифференциальные операторы при двухслойной разностной схеме аппроксимируются также на основе значений температуры T_{kj} в kj -точках сечений ствола в i -й и $(i-1)$ -й моменты времени. 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. Так, для пространственной переменной z одномерная пространственно-временная аппроксимация первого дифференциального оператора системы уравнений (9) будет иметь вид

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = (T_{k+1}^i - 2T_k^i + T_{k-1}^i) \frac{1}{\Delta z^2}. \quad (19)$$

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

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = (T_{k+1}^{i-1} - 2T_k^{i-1} + T_{k-1}^{i-1}) \frac{1}{\Delta z^2}. \quad (20)$$

В соответствии с вариантами (18)–(20) представим два типа разностных уравнений, аппроксимирующих первое уравнение системы (9) в одномерной версии:

$$\frac{1}{a} \frac{T_k^i - T_k^{i-1}}{\Delta \tau} = (T_{k+1}^i - 2T_k^i + T_{k-1}^i) \frac{1}{\Delta z^2}; \quad (21)$$

$$\frac{1}{a} \frac{T_k^i - T_k^{i-1}}{\Delta \tau} = (T_{k+1}^{i-1} - 2T_k^{i-1} + T_{k-1}^{i-1}) \frac{1}{\Delta z^2}. \quad (22)$$

Разностное уравнение вида (22) позволяет выразить решение задачи теплопроводности в стволе в явном виде на i -м временном слое через известные решения на предыдущем $(i-1)$ -м слое. Разностное уравнение (22) образует явную разностную схему. Алгоритмы численного расчета системы уравнений (9) по явной разностной схеме достаточно компактны при программировании, но предъявляют требования к машинному времени.

Разностная схема, заданная разностным уравнением вида (21), сложнее, поскольку в каждое разностное уравнение вида (21), кроме неизвестного решения для k -й пространственной точки,

входят еще два искомых решения для соседних $(k - 1)$ -й и $(k + 1)$ -й пространственных точек. Все искомые решения оказываются «завязанными» друг с другом в общую невырождающуюся систему разностных уравнений. Таким образом, в данном случае на каждом i -м временном слое решения определяются не по явным формулам вида (22), а из решения системы $(K_9 - 1)$ разностных уравнений, вследствие чего разностная схема, заданная разностным уравнением вида (21) неявна. Эффективные алгоритмы решения системы уравнений (9) по неявной разностной схеме значительно сложнее алгоритмов численного расчета по явной разностной схеме, но время решения задачи может быть существенно уменьшено рациональным выбором шагов Δz , Δr и Δt .

Очевидному отличию в поведении решений, полученных в случаях воплощения шаблона рис. 3 по явной (22) и неявной (21) разностным схемам, можно дать надлежащее физико-математическое объяснение. Значение производной по времени при явной разностной схеме (22) вычисляется по значениям искомой функции в начале временного интервала, поэтому приращение $(T_k^i - T_k^{i-1})$ не зависит от получаемых значений, а абсолютная величина этого приращения пропорциональна шагу. В результате при некотором критическом шаге Δt могут быть получены новые значения T_k^i , противоречащие физическому смыслу задачи (например, падение температуры ствола T на i -м временном слое по сравнению с $(i - 1)$ -м временным слоем при продолжении воздействия температуры газов T_1). В неявной же разностной схеме (21) приращение $(T_k^i - T_k^{i-1})$ зависит от всех значений T_k^i на новом временном слое, т. е. имеется своеобразная «обратная связь», не позволяющая получать абсурдные приращения сеточной функции. Тем не менее практика решения реальных задач совершенно не исключает целесообразности включения явной разностной схемы в трафарет, показанный на рис. 3. Во-первых, при описании исследуемых быстропротекающих процессов преимущество неявной схемы, заключающееся в более свободном выборе величины временного шага Δt , может не проявиться. Во-вторых, явные схемы более удобны в ресурсоемкости, тем более при счете на вычислителях с несколькими параллельными процессорами, которые получили широкое распространение в настоящее время.

Вследствие равномерности сетки по всем пространственным координатам, факт разностной аппроксимации дифференциального оператора для переменной r при каждом значении z в любой локальной точке как по обособленной координате r , так и при совместном решении задачи с временной переменной t можно показать аналогичным образом.

Одним из важнейших достижений вычислительной математики является разработка разнообразных разностных схем для решения многомерных уравнений теплофизики в частных производных [19–22]. Стремлению к получению близкого приближения задачи температурного нагружения ствола к ее возможно существующему точному аналитическому решению способствовали селекция и некоторые приемы преобразования продольно-поперечной разностной схемы метода двумерной прогонки Писмена – Рэкфорда. К основным достоинствам предпочтенной явно-неявной разностной схемы относятся: сочетание сильных сторон явных разностных схем (малые затраты машинного времени на шаге по времени Δt) и неявных разностных схем (безусловная устойчивость, т. е. способности обеспечивать точность решения при любой степени подробности сетки); возможности применения к многомерным областям и совместно протекающим процессам; приспособленность к компиляции эффективных машинных кодов на быстродействующей вычислительной технике с достаточно большим объемом оперативной памяти.

Протекание двухмерного по пространственным шагам Δz и Δr физического процесса нагрева и охлаждения ствола на каждом временном шаге Δt доставляется как результат последовательной реализации одномерных процессов, каждый из которых начинается от распределения температурного поля ствола, возникшего после окончания предыдущего одномерного процесса. На основе такого представления, называемого расщеплением [20; 22], моделирование одномерных процессов проводится в неявном виде, а последовательное действие процессов учитывается по существу явным образом. При заданных граничных условиях и одинаковой во всех точках начальной температуре T_0 в области ствола сложной формы, оптимальность решения достигается сведением многомерной задачи на каждом шаге по времени Δt к набору одномерных задач, решаемых методом прогонки.

Специфика устойчивости неявной аппроксимации локально-одномерных задач при любом дроблении шага по времени $\Delta\tau$ обусловила способ повышения точности образования массива температур ствола T . Сущность способа заключается в выборе на временной сетке шаблона, содержащего полущелый слой:

$$\tau_{i+1/2} = \frac{\tau_{i+1} - \tau_i}{2} = 0,5 \cdot \Delta\tau, \tag{23}$$

как показано на рис. 4.

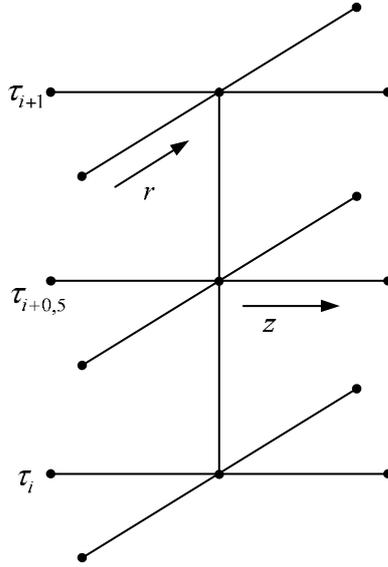


Рис. 4. К выбору временного шаблона продольно-поперечной разностной схемы методом двумерной прогонки Писмена – Рэкфорда

Fig. 4. To the choice of the time template of the longitudinal-transverse difference scheme by the method of two directions of Peaceman-Rackford

Тогда, с учетом разностных уравнений (21) и (22), разностного соотношения (23), а также обсужденных пространственных аналогий, конечно-разностная аппроксимация первого уравнения системы (9) по продольно-поперечной разностной схеме для направления z при любом значении r будет иметь вид

$$\frac{1}{a} \frac{T_{kj}^{i+1/2} - T_{kj}^i}{0,5 \cdot \Delta\tau} = \frac{T_{(k+1)j}^{i+1/2} - 2T_{kj}^{i+1/2} + T_{(k-1)j}^{i+1/2}}{(\Delta z)^2} + \frac{r_j T_{k(j+1)}^i - (r_{j-1} + r_j) T_{kj}^i + r_{j-1} T_{k(j-1)}^i}{r_j (\Delta r)^2}. \tag{24}$$

Граничные и начальные условия по координате z при каждом фиксированном значении r аппроксимируются следующим образом:

– начальное условие:

$$\left. \begin{aligned} i = 0 & \quad T_{kj}^0 = T_2, \\ i > 0 & \quad T_{kj}^i = T_{kj}^{i+1}. \end{aligned} \right\}; \tag{25}$$

– граничные условия:

$$\left. \begin{aligned} T_{1j}^{i+1/2} &= T_{2j}^{i+1/2}, \\ T_{K_9j}^{i+1/2} &= T_{(K_9-1)j}^{i+1/2}. \end{aligned} \right\}. \tag{26}$$

При синтезе модифицированной двухслойной разностной схемы решение нестационарной задачи теплопроводности на отдельном слое можно рассматривать как начальное условие для

последующих слоев. Следовательно, конечно-разностную аппроксимацию первого уравнения системы (9) для направления r при любом значении z запишем в виде

$$\frac{1}{a} \frac{T_{kj}^{i+1/2} - T_{kj}^i}{0,5 \cdot \Delta\tau} = \frac{r_j T_{k(j+1)}^{i+1} - (r_j + r_{j-1}) T_{kj}^{i+1} + r_{j-1} T_{k(j-1)}^{i+1}}{r_j (\Delta r)^2} + \frac{T_{(k+1)j}^{i+1/2} - 2T_{kj}^{i+1/2} + T_{(k-1)j}^{i+1/2}}{(\Delta z)^2}. \quad (27)$$

Граничные и начальное условия по координате z при каждом фиксированном значении r аппроксимируются следующим образом:

– начальное условие:

$$T_{kj}^{i+1} = T_{kj}^{i+1/2} + T_{kj}^{i+1/2} - \text{решение уравнения (24)}; \quad (28)$$

– граничные условия:

$$\left. \begin{aligned} -\lambda_c \frac{T_{k1}^{i+1} - T_{k2}^{i+1}}{\Delta r} &= \alpha_1 (T_{1,k}^{i+1} - T_{k1}^{i+1}), \\ -\lambda_c \frac{T_{k(J_v-1)}^{i+1} - T_{kJ_v}^{i+1}}{\Delta r} &= \alpha_2 (T_{kJ_v}^{i+1} - T_{2,k}^{i+1}). \end{aligned} \right\}. \quad (29)$$

Исключая возможные разночтения, заметим, что в разностном соотношении (29) через $T_{1,k}^{i+1}$ и $T_{2,k}^{i+1}$ обозначены, соответственно, температуры газов и воздуха в k -й пространственной точке сетки на $(i+1)$ -м временном слое.

Из уравнений (24), (27) видно, что в сконструированной разностной схеме переход от i -го к $(i+1)$ -му временному слою совершается в два этапа с шагами $0,5 \cdot \Delta\tau = 0,5 \cdot (\tau_{i+1} - \tau_i)$. Наряду с основными значениями сеточной функции T_{kj}^i и T_{kj}^{i+1} , вводятся промежуточные значения $T_{kj}^{i+1/2}$, которые формально рассматриваются как значения T_{kj} при $(\tau_{i+1} - 2\tau_{i+1/2})$. Соотношение (24) содержит три неизвестных величины $T_{(k+1)j}^{i+1/2}, T_{kj}^{i+1/2}, T_{(k-1)j}^{i+1/2}$, значения $T_{k(j+1)}^i, T_{kj}^i, T_{k(j-1)}^i$ определены на исходном слое путем интегрирования систем уравнений внутренней и промежуточной баллистики [18], т. е. соотношением (24) разностная схема классифицируется неявной по координате z и явной по координате r . При любом значении r численное решение может быть найдено методом прогонки по направлению z . Искомые значения температуры T_{kj} в kj -точках сечений ствола связаны между собой «по горизонталям» и «по вертикалям». Причем неизвестные любой внутренней горизонтальной прямой «взаимодействуют» на временном полуслое исключительно с неизвестными двух соседних прямых – верхней и нижней. Далее соотношением (27), содержащим три неизвестных величины $T_{k(j+1)}^{i+1/2}, T_{kj}^{i+1/2}, T_{k(j-1)}^{i+1/2}$, значения $T_{(k+1)j}^{i+1/2}, T_{kj}^{i+1/2}, T_{(k-1)j}^{i+1/2}$ регистрированы прогонкой по направлению z при значениях r , разностная схема переводится в вид неявный по координате r и явный по координате z . Поэтому окончательное распределение температуры T_{kj} в kj -точках сечений ствола находится прогонкой по направлению r при любом значении z , где переход между временными слоями совершается также полшагами в продольном и поперечном направлениях, соответственно, вдоль строк и столбцов на сетке.

Проблема оптимального выбора шагов сетки $\Delta z, \Delta r, \Delta\tau$ и тем самым количества ее узлов является непростой. С одной стороны, чем большая требуется точность, тем более мелкий шаг желателен. С другой стороны, слишком мелкий шаг значительно повышает требования к быстродействию и объему памяти вычислительных машин. Очевидно, должны существовать некоторые сетки с оптимальным числом узлов. Оптимизацию сетки будем осуществлять исходя из условий наилучшей сходимости результатов численного расчета с вероятно существующим истинным аналитическим решением и заимствованными экспериментальными данными.

В первую очередь, для наиболее точного определения температурного поля ствола, задачу целесообразно решать с учетом конфигурации нарезов, поскольку их наличие приводит к неравномерности распределения температуры по периметру нарезной части канала ствола [9; 10]. Первоначальное требование несравненной малости величина Δr шага сетки по оси r в отношении к высоте поля нареза очевидно. В общем, величина Δr шага сетки по оси r назначена по приближенной зависимости стационарных и линейных компонентов [23]:

$$\Delta r \approx \frac{\lambda \cdot \Delta T}{\alpha_1 (T_1 - T_0 - \Delta T)},$$

где ΔT – градиент температуры на поверхности теплообмена (для ААО $\Delta T \leq 323$ К).

Так как скорость снаряда (газов) при выстреле v_1 во времени t и по длине ствола l постепенно возрастает, достигая значения v_d у дульного среза ствола, то такая особенность не позволяет построить равномерную сетку по времени $\Delta \tau$, поскольку по длине ствола l величина шага Δz сетки по оси z так же будет увеличиваться. Это, в свою очередь, может привести к тому, что точность результатов решения, полученных в различных точках области дискретного изменения аргументов $\Omega_{T_{kj}}$ величины T_{kj} , будет существенно отличаться между собой, что недопустимо. Учитывая также и то, что вычисления на каждом i -м временном слое производятся как на основании значения предыдущего $(i - 1)$ -го, так и предшествующего $(i - 0,5)$ -го временного слоя, ошибка будет накапливаться достаточно быстро. В целях исключения этого события при расчете нагрева ствола в течение времени движения снаряда (газов) по каналу ствола t_d целесообразно использовать переменный шаг по времени $\Delta \tau \neq \text{const}$, назначенный при решении основной задачи внутренней баллистики [18]. Далее в течение времени периода последствия $t_{п}$ и в интервалах времени между очередями выстрелов Δt устанавливается постоянный шаг по времени:

$$\Delta \tau = \begin{cases} 0,0002 \frac{l}{v_1(t)}, & \text{если } t \leq t_d; \\ 0,0002 \frac{l}{v_d}, & \text{если } t > t_d. \end{cases} \quad (30)$$

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

Обоснование величины Δz шага сетки по оси z , обеспечивающего желаемую точность решения, произведено с применением условия устойчивости явных компонентов разностной схемы (24)–(29) [20; 22], включающего, в том числе, постоянство шага по времени $\Delta \tau$ нижней части формулы (30):

$$\frac{(\Delta z)^2}{\Delta \tau} \geq 2a, \quad \text{при } \Delta \tau = \text{const}, a = \text{const}. \quad (31)$$

Формула (31) предъявляет жесткую связь величины Δz шага сетки по оси z со значениями Δt шага сетки по времени t , поскольку точность решения задачи непосредственно зависит от правильности выбора последнего. Из условия устойчивости (31) следует руководство к действию – измельчение пространственной сетки должно сопровождаться измельчением и временной сетки. Например, при увеличении числа пространственных узлов z_k в 4 раза, требуется увеличить число шагов по времени t разностной сетки $\Delta \tau$ в 16 раз. Ранее необходимость соблюдения условия (31) приводила к тому, что при определении величины шага Δt в решении реальных нестационарных задач теплофизики, исходение только из характера протекания изучаемого физического процесса не представлялось возможным. Это в ряде случаев приводило к неприемлемым затратам машинного времени. Кроме того, при неоправданно большом числе временных

узлов τ_i наблюдалось появление погрешности округления, возникающей при численном счете в вычислителях ранних поколений.

Свойство устойчивости явной части разностной схемы (24)–(29) установлено также на практике путем констатации отсутствия «разболтки» численного решения в процессе пробных расчетов.

При рассмотрении свойства аппроксимации образованной разностной схемы (24)–(29) введено специальное понятие так называемой суммарной аппроксимации [20; 22] локально-одномерных разностных схем, которое заключается в следующем. Каждое из промежуточных разностных уравнений (24) или (27) в отдельности могут не обладать свойством аппроксимации. Однако невязка, возникающая на первом временном полушаге, как правило, компенсируется на втором временном полушаге при корректном сочетании пространственных шагов Δz , Δr и временного шага Δt , так что в целом получается погрешность аппроксимации, стремящаяся к нулю при поставленной степени подробности пространственно-временной сетки.

Подобный путь дискретизации расчетной области следует признать хотя и трудоемким, но и наиболее приемлемым для решения прикладной задачи теплофизики.

Тем самым дискретное множество точек сетки характеризуется координатами и параметрами:

$$\begin{aligned} z_k &= (k-1) \cdot \Delta z, \Delta z = 0,001 \text{ м}, k = \overline{1,151}; \\ r_j &= r_0 + (j-1) \cdot \Delta r, \Delta r = 0,125 \cdot 10^{-3} \text{ м}, j = \overline{1,161}; \\ \tau_i &= (i-1) \cdot \Delta t, \\ \tau_{i+1/2} &= 0,5 \cdot \Delta t, i = 0, t. \end{aligned}$$

Таким образом, полученные выражения (24)–(29) составляют способ численного решения краевой задачи (9) определения сеточных температур ствола T_{jk}^i . Учет нелинейности I-го рода при численном решении системы уравнений (9) организован итерационным процессом, при котором определение очередного приближения проводится путем включения линейного решения, в котором коэффициенты теплопроводности λ и удельной теплоемкости c ствольной стали рассчитаны по значениям температур ствола T , найденным на предыдущей итерации. Формирование нестационарного температурного поля ствола авиационной пушки ГШ-301 в целом выполнимо программной организацией матрицы значений T_{jk}^i при исследовании режимов применения ААО.

В трудах [19–22] доказано, что при наличии аппроксимации и устойчивости всегда будет иметь место и сходимость всех типов разностных схем. Тем не менее этот факт не исключает научно-методического значения процедуры проверки улучшения сходимости результатов моделирования теплофизического нагружения системы в сравнении с известными результатами.

Проверка достоверности теплофизической модели нагружения ствола

Прикладным исследованиям качества ААО предшествует проверка разработанной модели на адекватность отражения моделируемых теплофизических процессов, происходящих в газодинамической импульсной машине. Установление совокупности свойств модели, обуславливающих ее пригодность к проведению разноплановых численных экспериментов, возможно по направлениям сравнения результатов моделирования с опытными данными, а также с известными осредненными результатами некоторых теоретических работ, которые наиболее близки к экспериментальным данным. Такой подход позволяет значительно повысить достоверность выводов.

Исходя из этих позиций, проверка степени объективного отображения результатами счета действительных значений основного параметра производилась численным моделированием отработанного на полигоне процесса нагрева и остывания поверхности ствола при и после отстрела боевого комплекта в 75 патронов. Содержание режимов ведения огня и условий применения ААО ограничиваются типом информации, не предполагающей дальнейших конкретизаций. Совместные результаты натурального эксперимента и расчета показаны в виде графиков зависимости температуры ствола T от времени t на рис. 5.

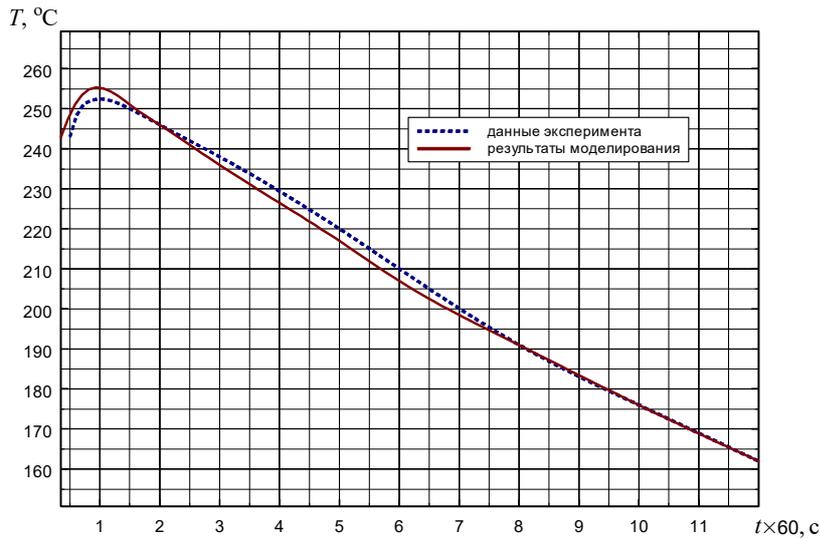


Рис. 5. Зависимость температуры ствола авиационной пушки ГШ-301 в районе компенсатора от времени при отстреле боевого комплекта в 75 патронов

Fig. 5. Dependence of the barrel temperature of the GSh-301 aircraft gun in the area of the compensator on time when firing a combat set of 75 rounds of ammunition

Анализ полученных результатов показывает, что имеется достаточно хорошая корреляция между экспериментами и расчетными данными. Удовлетворительное согласование результатов моделирования с данными, полученными экспериментально, подтверждается тем фактом, что осредненная относительная ошибка определения температуры ствола T в реперном сечении не превышает 0,6 %. В большинстве работ в области авиационной артиллерийской науки, в том числе и в трудах соавтора статьи, расхождения этой величины в численных и натуральных экспериментах составляет около 10 % [9; 11].

Таким образом, повышение точности имитации теплового нагружения ствола на 9,4 % достигнуто:

- учетом нелинейности теплофизических свойств материала стали ствола $\lambda(T)$, $c(T)$;
- выбором вероятно близких к оптимальным значений шагов сетки Δz , Δr по соответствующим координатам z , r , а также величины шага Δt по времени t в теплофизической модели нагружения ствола;
- действенным сочетанием достоинств явных и неявных разностных схем в построенной явно-неявной разностной схеме конечно-разностной аппроксимации задачи теплообмена в теле сложной геометрической формы.

Формализация теплофизических процессов распространения тепла в термонагруженном элементе ААО логически завершена пакетом прикладных программ, предназначенным для расчета теплового состояния ствола во время стрельбы и определения безопасных режимов ведения огня для диапазона условий полета самолета-носителя [24]. Алгоритмы численного расчета системы уравнений (9) по соответствующей ей конечно-разностной схеме (24)–(29) отлажены с использованием программного продукта Microsoft Developer Studio, среды Fortran Power Station 4.0 и алгоритмического языка ФОРТРАН-90.

Перспективы дальнейшего совершенствования модели

Программная организация расчета температурного поля ствола при применении ААО сводится к многократному (по режимам стрельбы) решению системы уравнений (24)–(29) при начальном распределении температуры ствола T , которое устанавливается к началу очередного выстрела и определяется при решении той же системы уравнений (24)–(29) для предыдущего выстрела. Предлагаемый инструментарий позволяет адекватно имитировать температурное по-

ле ствола в различных условиях ведения огня и создавать базис для композиции предельных эффективных режимов стрельбы.

Вместе с тем существуют практические приложения среднего специального машиностроения, для которых некоторые из принятых в работе допущений приходится снимать. Так, при анализе нагрева ствола в районе газоотводных отверстий газовой автоматики или наддульных устройств обязательно учитывают локальные теплоперетоки в элементах, присоединенных к стволу. Тогда следует переходить к гораздо более сложной трехмерной постановке в координатах $(0, z, r, \theta)$. Потребность решения трехмерных задач теплообмена не исключается при анализе эффективности ребер или каналов охлаждения, теплового состояния нарезки и учета технологической разностенности ствола. Кроме того, при исследовании механизма износа ствола при анализе термонапряженного состояния тонкого поверхностного слоя металла, прилегающего к поверхности канала, неизбежен учет зависимости теплофизических характеристик ствольной стали не только от температуры, но и от пространственных координат. При практических расчетах все чаще приходится отказываться и от допущения о постоянстве теплофизических характеристик патрона. Расчеты по так называемым «мгновенным» значениям теплофизических характеристик элементов боеприпаса, находящегося в стволе в перерывах между автоматической стрельбой, способствуют уточнению термодинамического состояния системы «патрон – ствол», теснее увязывают его с боевыми свойствами ААО.

Для получения более полной информации о точностных характеристиках модели желательно дополнительно провести серию летных экспериментов, обеспечивающих естественные условия теплового нагружения ствола. Тогда оценка осредненной относительной ошибки в моделировании нагрева и охлаждения ствола будет, несомненно, более объективной.

Заключение

Согласованием точностных характеристик физико-математических методов решения задач теплообмена и сопрягаемых задач с колоссальными характеристиками быстродействия, памяти и разрядной сетки современных вычислителей синтезирована модель повышенной точности, отличающаяся от известных вариантов переменного выбора шага шаблона-сетки ствола авиационной пушки ГШ-301. Прикладное значение модели продемонстрировано доступностью приемов ее адаптации к разрешению других вопросов термодинамики и механики прочности стволов.

Библиографические ссылки

1. Комплексы авиационного вооружения / под ред. В. А. Конуркина. М. : ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 2005. 947 с.
2. Сапожников С. В., Китанин Л. В. Техническая термодинамика и теплопередача. СПб. : СПбГТУ, 1999. 319 с.
3. Деревянко В. А., Макуха А. В. Измерение распределения температуры с помощью трехпроводной системы датчиков на основе термисторов // Сибирский журнал науки и технологий. 2019. Т. 20, № 3. С. 334–343.
4. Анализ экспериментальных данных по плавлению и движению расплава металла по цилиндрической поверхности / П. Д. Лобанов, Э. В. Усов, А. И. Светоносков и др. // Теплофизика и аэромеханика. 2020. № 3. С. 483–490.
5. Cruz C., Marshall A. Surface and gas measurements along a film cooled wall // Thermophysics and Heat Transfer. 2007. No. 21. P. 181–189.
6. 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.
7. Васильев Е. Н. Расчет характеристик теплообмена оребренной стенки // Сибирский аэрокосмический журнал. 2020. Т. 21, № 2. С. 226–232.
8. Зуев А. А., Арнольд А. А., Ходенкова Э. В. Теплоотдача в поле центробежных сил для элементов газовых турбин // Сибирский аэрокосмический журнал. 2020. Т. 21, № 3. С. 364–376.

9. 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». Санкт-Петербург, 2012. Т. 1. С. 79–86.*
10. 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.*
11. 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.*
12. 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.*
13. Подкопаев А. В. Способ определения коэффициента теплоотдачи для расчета температурного поля ствола скорострельного артиллерийского орудия // *Современное состояние и перспективы развития летательных аппаратов, их силовых установок и комплексов авиационного вооружения : материалы Всерос. науч.-практ. конф. (16–17 мая 2012, г. Воронеж) : в 12 ч. / ВУНЦ ВВС «ВВА». Воронеж, 2012. Ч. 3. С. 202–204.*
14. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М. : Энергоиздат, 1981. 416 с.
15. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М. : Наука, 1984. 832 с.
16. Справочник по авиационным материалам и технологии их применения / под ред. В. Г. Александрова. М. : Транспорт, 1979. 242 с.
17. Идентификационно-имитационная математическая модель теплофизического нагружения малокалиберного артиллерийского ствола / А. В. Подкопаев, А. Б. Бабаджанов, И. А. Подкопаев и др. // *Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 2. С. 209–226.*
18. Комбинированная математическая модель внутренней и промежуточной баллистики авиационного артиллерийского оружия / А. Б. Бабаджанов, И. А. Подкопаев, А. В. Подкопаев и др. // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 4. С. 177–185.*
19. Власова Е. А., Зарубин В. С., Кувыркин Г. Н. Приближенные методы математической физики. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 700 с.
20. Дульнев Г. Н., Парфенов В. Г., Сигалов А. В. Применение электронных вычислительных машин для решения задач теплообмена. М. : Высшая школа, 1990. 207 с.
21. Зарубин В. С., Станкевич И. В. Расчет теплонапряженных конструкций. М. : Машиностроение, 2005. 352 с.
22. Самарский А. А., Николаев Е. С. Методы решения сеточных уравнений. М. : Наука, 1978. 592 с.
23. Зайцев А. С. Проектирование артиллерийских стволов. Ч. II. Специальные вопросы. М. : Изд-во ГК СССР по народному образованию, 1988. 114 с.
24. Подкопаев И. А., Подкопаев А. В. Расчет температурного поля ствола автоматической пушки во время стрельбы. М. : Роспатент. 2023. № государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2023617444 от 10.04.2023.

References

1. *Kompleksy aviatsionnogo vooruzheniya* [Aircraft weapon systems]. Ed. by V. A. Konurkin. Moscow, AFIA named after professor N. E. Zhukovsky Publ., 2005, 947 p.
2. Sapozhnikov S. V., Kitanin L. V. *Tekhnicheskaya termodinamika i teploperedacha* [Technical thermodynamics and heat transfer]. St. Petersburg, SPbSTU Publ., 1999, 319 p.
3. Derevianko V. A., Makukha A. V. [Measuring the temperature distribution with a three-wire thermistor sensor system]. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii*. 2019, Vol. 20, No. 3, P. 334–343 (In Russ.).
4. 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.).
5. Cruz C., Marshall A. Surface and gas measurements along a film cooled wall. *Thermophysics and Heat Transfer*, 2007. No. 21. P. 181–189.
6. Gusev S. A., Nikolaev V. N. [Parametric identification of the thermal state of electronic equipment in the aircraft instrument compartment]. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii*. 2019, Vol. 20, No. 1, P. 62–67 (In Russ.).
7. Vasiliev E. N. [Calculation of heat transfer characteristics of a ribbed wall]. *Sibirskiy aerokosmicheskij zhurnal*. 2020, Vol. 21, No. 2, P. 226–232 (In Russ.).
8. Zuev A. A., Arngold A. A., Khodenkova E. V. [Heat transfer in the field of centrifugal forces for elements of gas turbines]. *Sibirskiy aerokosmicheskij zhurnal*. 2020, Vol. 21, No. 3, P. 364–376 (In Russ.).
9. 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.).
10. 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 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. 97–100 (In Russ.).
11. 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. 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. "Akademicheskije Zhukovskiye chteniya"* [Materials V All-Russ. Scient. and Practic. Conf. "Academic Zhukovsky reading"]. Voronezh, 2018, P. 67–73 (In Russ.).
13. Podkopaev A. V. [Modus for determining the heat transfer coefficient for calculating the temperature field of the barrel of a rapid-firing artillery gun]. *Materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. "Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya letatel'nykh apparatov, ikh silovykh ustanovok i kompleksov aviatsionnogo vooruzheniya"* [Materials All-Russ. Scient. and Practic. Conf. "The current state and prospects for the development of aircraft, their power plants and aviation weapons systems"]. Voronezh, 2012, P. 202–204 (In Russ.).

14. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981, 416 p.
15. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematical handbook for scientists and engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 832 p.
16. *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.
17. 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]. *Sibirskiy aerokosmicheskiy zhurnal*. 2022, Vol. 23, No. 2, P. 209–226 (In Russ.).
18. Babadzhanov A. B., Podkopaev I. A., Podkopaev A. V., Dolzhikov V. I. [Combined mathematical model of internal and intermediate ballistics of aviation artillery weapons]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*. 2022, Rel. 4, P. 177–185 (In Russ.).
19. 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.
20. 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.
21. Zarubin V. S., Stankevich I. V. *Raschet teplonapryazhennykh konstruktsiy* [Calculation of heat-stressed structures]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2005, 352 p.
22. Samarsky A. A., Nikolaev E. S. *Metody resheniya setochnykh uravneniy* [Methods for solving grid equations]. Moscow, Nauka Publ., 1978, 592 p.
23. Zaitsev A. S. *Proyektirovaniye artilleriyskikh stvolov. Ch. II. Spetsial'nyye voprosy* [Designing artillery barrels. P. II. Special questions]. Moscow, MC of the USSR on public education Publ., 1988, 114 p.
24. Podkopaev I. A., Podkopaev A. V. *Raschet temperaturного polya stvola avtomaticheskoy pushki vo vremya strel'by* [Calculation of the temperature field of the barrel of an automatic gun during firing]. Moscow, Rospatent, 2023, No. gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM [state registration of a computer program] RU 2023617444. (In Russ.).

© Подкопаев И. А., Подкопаев А. В., Должиков В. И., 2023

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.

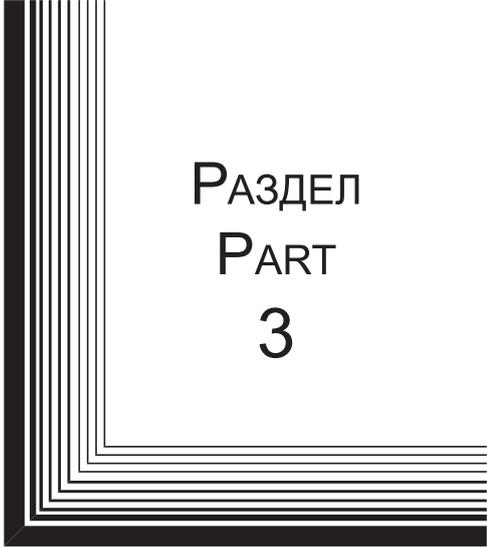
Подкопаев Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры эксплуатации комплексов авиационного вооружения (и прицельных систем); Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж).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

Должиков Василий Иванович – кандидат технических наук, доцент, начальник 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: Link707@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.

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.

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.



РАЗДЕЛ
PART
3



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ
И МАТЕРИАЛЫ

TECHNOLOGICAL
PROCESSES
AND MATERIALS SCIENCE



УДК 621.791.722

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-738-750

Для цитирования: Серегин Ю. Н., Мурыгин А. В., Курашкин С. О. Моделирование технологических параметров электронно-лучевой сварки для изделий ракетно-космической техники // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 4. С. 738–750. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-738-750.

For citation: Seregin Yu. N., Murygin A. V., Kurashkin S. O. [Modeling of technological parameters of electron beam welding for rocket and space technology products]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 4, P. 738–750. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-738-750.

Моделирование технологических параметров электронно-лучевой сварки для изделий ракетно-космической техники

Ю. Н. Серегин^{*}, А. В. Мурыгин, С. О. Курашкин

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

Статья содержит результаты научных исследований по моделированию технологических параметров электронно-лучевой сварки. При моделировании использовался материал ВТ-14 толщиной 0,16 см. Целью моделирования выбрано повышение качества сварного шва за счет оптимальной формы и отсутствие дефектов в виде пор и трещин. В расчетах применен концентрированный источник энергии, эквивалентный электронно-лучевому пучку. В ходе исследования теплового процесса нагрева материала авторами разработаны и опробованы критерии, позволяющие оптимизировать такие параметры сварки, как скорость сварки и положение фокусного пятна относительно поверхности нагреваемой детали. Авторы в своих расчетах применили оригинальный метод нахождения скорости сварки и координаты фокусного пятна по функционалам тепловой модели. Используемые математические модели позволили построить контуры зон термического влияния, соизмеримые с формами шва, полученными на образцах во время сварки с технологическими режимами, соответствующими расчетным при моделировании параметров. Такой способ исследований позволил существенно сэкономить затраты на отработку технологического режима сварки для макетного узла. Разработанный авторами алгоритм был успешно опробован на материале АМГ-6 с толщиной 10 см. В процессе моделирования сварки для больших толщин получены результаты, которые необходимо учитывать при оптимизации параметров сварки изделий с большой толщиной. Актуальность излагаемого материала подтверждается востребованностью к качеству технологии сварки конструкций электронным пучком. Исследования авторами этого направления позволят существенно расширить возможности в применении электронно-лучевой технологии для ракетно-космической техники.

Ключевые слова: скорость сварки, фокусное расстояние электронного пучка, форма шва, мощность электронно-лучевого оборудования, погонная энергия.

Modeling of technological parameters of electron beam welding for rocket and space technology products

Yu. N. Seregin^{*}, A. V. Murygin, S. O. Kurashkin

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

The article contains the results of scientific research on modeling the technological parameters of electron beam welding. The modeling used a material VT-14 with a thickness of 0.16 cm. The purpose of the simulation is to improve the quality of the weld due to the optimal shape and the absence of defects in the form of pores and cracks. A concentrated energy source equivalent to an electron beam is used in the calculations. During the study of the thermal process of heating the material, the authors developed and tested criteria that allow optimizing welding parameters such as welding speed and the position of the focal spot relative to the surface of the heated part. In their calculations, the authors applied an original method of finding the welding speed and the coordinates of the focal spot according to the functionals of the thermal model. The algorithm developed by the authors was successfully tested on AMG-6 material with a thickness of 10 cm. In the process of modeling welding for large thicknesses, results have been obtained that must be taken into account when optimizing the welding parameters of products with large thickness. The relevance of the presented material is confirmed by the demand for the quality of the technology of welding structures with an electron beam. Research by the authors of this direction will significantly expand the possibilities in the application of electron beam technology for rocket and space technology.

Keywords: Welding speed, focal length of the electron beam, seam shape, power of electron beam equipment, linear energy.

Введение

Для создания неразъёмных соединений зачастую на производстве ракетно-космической техники используется электронно-лучевая сварка (ЭЛС). В процессе получения сварных соединений по разного рода причинам появляются дефекты, которые снижают прочность детали или металлоконструкции, нарушают герметичность выполняемых посредством сварки емкостей, а также способствуют уменьшению надежности эксплуатации данного узла в целом.

Соединение деталей требует равномерности зоны нагрева стыка, так как при неравномерности его нагрева возникают дефекты сварных соединений. Требуемые параметры технологического процесса сварки обычно подбираются при помощи натуральных экспериментов. Однако проведение натуральных экспериментов является материально затратным и требует большого количества времени.

Решению вопросов повышения качества процесса сварки посвящены исследования многих отечественных и зарубежных авторов (Зуев И. В., Трушников Д. Н., Нара К., Виноградов В. А., Sasaki S., Кривенков В.А., Куцан Ю. Г., Anderl P. и др.) [1–4]. В своих исследованиях Родякина Р. В. [5] разрабатывает методику моделирования процесса прохождения пучка электронов через слой испаренного металла. Авторы Мотасов М. И., Довыдов Д. А., Алексеев В. С. [6] рассматривают имитационную модель системы управления фокусировкой луча с использованием программной среды Simulink, входящей в состав пакета MATLAB. Дрозд А. А. [7] использует численный метод, который позволяет моделировать процессы развития термических напряжений и деформаций при точечной электронно-лучевой сварке, в модели учитываются фазовые переходы при нагреве, плавлении, испарении и кристаллизации. Тарасова В. Н. [8] разработала метод компьютерного моделирования, позволяющий существенно снизить временные затраты на изготовление свариваемых изделий и прогнозирующий результаты в заранее заданных условиях. Авторы Мелюков В. В. и Тарабукин Д. А. [9] предложили метод математического и численного моделирования теплового процесса сварки для определения мощности сварочного источника и сокращения времени и объема натурального эксперимента при отладке режима.

1. Применение теории тепловых процессов к ЭЛС

У большинства имеющихся разработок есть ряд недостатков – отсутствует возможность реализовать разработанные методы в производственных условиях в связи с их сложностью, узконаправленность, отсутствие возможности оптимизации технологических параметров при вводе в технологический процесс новых материалов. Оптимизация технологических парамет-

ров процесса сварки при вводе новых материалов требует проведения натуральных экспериментов, что ведет к увеличению материальных и трудовых затрат. Предложенные методики и модель в данном исследовании, а также разработанная АСУ ЭЛС позволяют решить вышеуказанные проблемы и снизить количество дефектов, возникающих в процессе сварки, как для существующих режимов сварки, так и при вводе в эксплуатацию нового изделия.

Для авторов наибольший интерес представляет технология, которая используется для широкой номенклатуры толщин соединяемых конструкций. В работах [10–17] авторами предложены материалы по моделированию процесса ЭЛС с целью нахождения оптимального режима для толщин от 0,1 до 30 мм. Полученный опыт моделирования привел авторов к идее исследования возможности применения ЭЛС для значительно больших толщин свариваемых изделий. Таким образом, была реализована цель оценить возможности моделирования теплового процесса нагрева исследуемого материала концентрированным источником энергии в широком диапазоне толщины и применения результатов моделирования для практического использования на электронно-лучевом оборудовании.

При моделировании процесса электронно-лучевой сварки применялся классический способ представления процесса (рис. 1) в виде движущихся мгновенных источников энергии (рис. 2), количество и расположение которых в полной мере соответствует реальному электронному пучку.

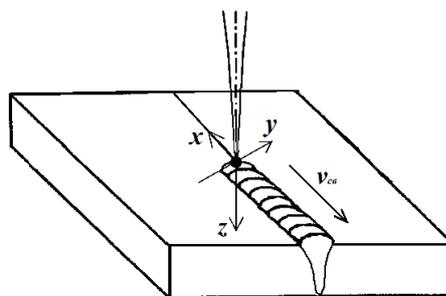


Рис. 1. Представление ЭЛС в графическом виде

Fig. 1. Representation of the EBW in graphical form

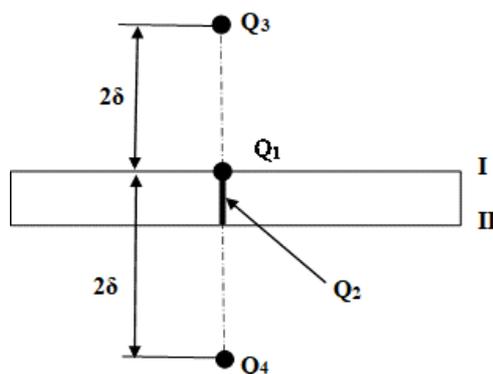


Рис. 2. Представление ЭЛС в графическом виде:

δ – толщина детали; Q_1 – мгновенный точечный источник; Q_2 – мгновенный линейный источник; Q_3 и Q_4 – фиктивные точечные источники

Fig. 2. Representation of the EBW in graphical form:

δ – part thickness; Q_1 – instant point source; Q_2 – instant linear source; Q_3 и Q_4 – fictitious point sources

Температура нагрева материала вследствие воздействия выбранных источников в соответствии с [18] и принципа суперпозиции вычисляется по (1):

$$T_{\text{комп}} = \sum_{i=1}^4 T_i(x, y, z, v, t, Q_i), \quad (1)$$

где

$$T_1 = \frac{Q_1}{c\rho\sqrt{(4\pi a)^3}} e^{-\frac{vx}{2a}t} \exp\left(-\frac{v^2\tau}{4a} - \frac{x^2 + y^2 + z^2}{4a\tau}\right) \frac{d\tau}{\tau^{3/2}};$$

$$T_2 = \frac{Q_2}{4\pi\lambda\delta} e^{-\frac{vx}{2a}t} \exp\left(-\frac{v^2\tau}{4a} - \frac{2\lambda\tau}{c\rho\delta} - \frac{x^2 + y^2}{4a\tau}\right) \frac{d\tau}{\tau};$$

$$T_3 = \frac{Q_3}{c\rho\sqrt{(4\pi a)^3}} e^{-\frac{vx}{2a}t} \exp\left(-\frac{v^2\tau}{4a} - \frac{x^2 + y^2 + (z-2\delta)^2}{4a\tau}\right) \frac{d\tau}{\tau^{3/2}};$$

$$T_4 = \frac{Q_4}{c\rho\sqrt{(4\pi a)^3}} e^{-\frac{vx}{2a}t} \exp\left(-\frac{v^2\tau}{4a} - \frac{x^2 + y^2 + (z+2\delta)^2}{4a\tau}\right) \frac{d\tau}{\tau^{3/2}} - \text{температура от воздейст-}$$

вия соответствующих мгновенных источников (см. рис. 2).

Используемая модель теплового процесса (1) исследовалась и настраивалась для материала ВТ-14 с толщиной проплавления $1,5 \pm 0,5$ мм. Для сравнения формы поперечного сечения шва и смоделированной зоны термического влияния было принято соответствие соотношения размеров ширины к глубине шва. На рис. 3 приведены результаты моделирования и форма шлифа соответствующего режима сварки. График зоны термического влияния получен вычислением (1) и выбором сечения зоны нагрева по координатам, соответствующим наибольшему отклонению температуры термического влияния (для ВТ-14 – 600 °С) от положения источника нагрева.

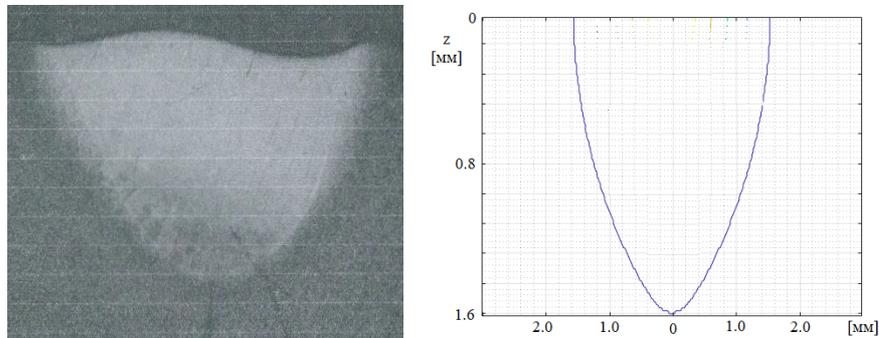


Рис. 3. Изображения формы шлифа и зоны термического влияния для применяемого в производственных условиях режима сварки

Fig. 3. Images of the shape of the slot and the zone of thermal influence for the welding mode used in production conditions

2. Разработка математического функционала

Для вычисления таких параметров технологического процесса, как скорость сварки, фокусное расстояние и требуемая мощность для ЭЛС авторами разработана модель математического функционала (2) (аналога среднеквадратическому отклонению), критерий оптимальности (3) которого позволяет определить указанные параметры технологического процесса для материала любой толщины:

$$J_1 = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T_{\text{норм}i} - \overline{T_{\text{норм}}})^2}; \quad (2)$$

$$J_1 = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T_{\text{норм}i} - \overline{T_{\text{норм}}})^2} \rightarrow \min. \quad (3)$$

Согласно разработанному критерию, параметрами технологического процесса будут решения системы (4)

$$\begin{cases} \frac{\partial J_1}{\partial v} = 0, \\ \frac{\partial J_1}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial J_1}{\partial Q} = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где v – скорость сварки; z – положение фокусного пятна; Q – энергия источника нагрева (равна сумме мгновенных точечного Q_1 и линейного Q_2 источников).

Для поиска требуемых технологических параметров ЭЛС (энергия, время, скорость сварки) был разработан алгоритм, представленный в виде блок-схемы на рис. 4.

Алгоритм основан на предлагаемых в данном исследовании моделях (1)–(4). После инициализации технологических параметров задаются следующие параметры: T – температура граничной зоны термического влияния (от минимальной до максимальной), t – время интегрирования, v – скорость сварки, Q – энергия источников нагрева, x – координаты по длине изделия, y – координаты по ширине изделия, z – координаты по высоте изделия. Далее значения сохраняются в базу данных для дальнейшего использования в будущих вычислениях. В случае, если эксперимент новый, то для вычисления энергии источника нагрева задаются значения температуры, времени интегрирования и скорости сварки после вычисления температуры нагрева (1) при действующих фиктивных и действительных источниках. Далее, применяя критерий оптимальности (2), вычисляется требуемая энергия, обеспечивающая равномерную зону нагрева сварного шва. Для нахождения времени интегрирования задается полученная энергия и температура граничной зоны термического влияния, затем вычисляется температура нагрева, варьируя остальные параметры в некотором диапазоне. Зная оптимальные значения энергии, времени интегрирования производится вычисления скорости сварки, аналогично предыдущим этапам.

Применив указанный алгоритм для деталей с толщиной до 100 мм, авторы столкнулись с особенностью, которая проявила себя при вычислении координаты фокусного пятна электронного пучка и распределении энергий мгновенных источников. При увеличении толщины свариваемого материала экстремум функционала (3) исчезает. Это объясняет тот факт, что сварку больших толщин осуществляют электронно-лучевой пушкой с узким фокусом.

Идея простого перебора указанных параметров с применением критерия оптимизации (3) представляет собой задачу, требующую больших временных затрат, что зачастую приводит к практической нецелесообразности проведения работ в этом направлении.

3. Разработка физического функционала

При изучении технологии сварки конструкций с различной толщиной проплавления, авторы столкнулись с задачей выбора конкретных значений энергий для источников Q_1 и Q_2 . Причем способ выбора этих величин зависит от исследуемых толщин деталей. Часто во время моделирования тепловых процессов исследователи выбирают величину энергии точечного источника, опираясь на экспериментальный материал с целью получения адекватной математической модели [19–22]. Авторы поступили аналогичным образом, выбирая наилучшее соответствие в отношении между шириной шва и его глубиной.

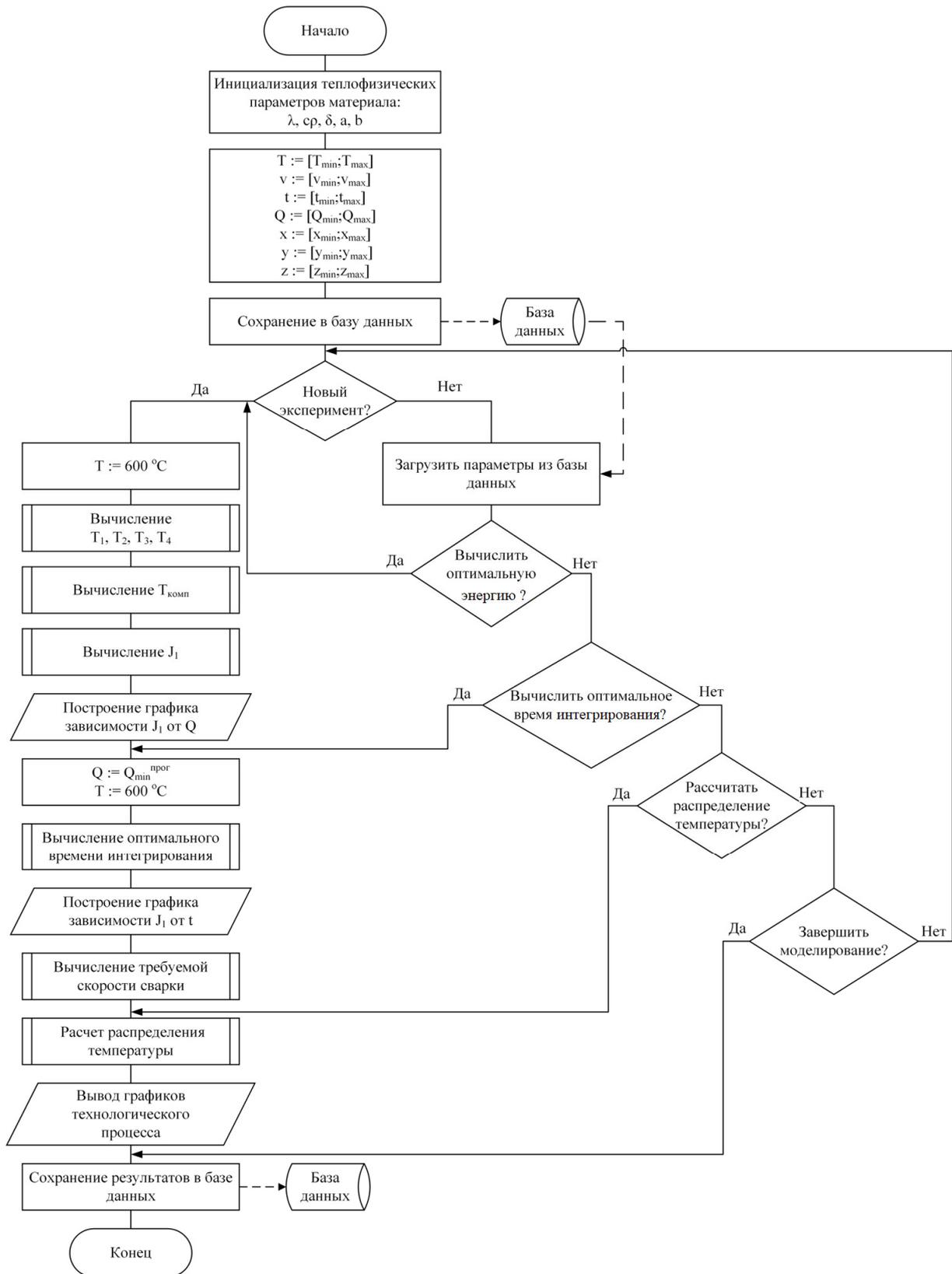


Рис. 4. Блок-схема алгоритма поиска требуемых технологических параметров процесса сварки

Fig. 4. Block diagram of the algorithm for finding the required technological parameters of the welding process

Для сокращения времени поиска указанного соотношения, авторами разработан физический функционал (5) и критерий оптимизации для этого функционала (6):

$$J_2 = \left(\left(\frac{Q}{v} \right)_{\text{норм}} - (Q \cdot t)_{\text{норм}} \right)^2; \quad (5)$$

$$J_2 = \left(\left(\frac{Q}{v} \right)_{\text{норм}} - (Q \cdot t)_{\text{норм}} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (6)$$

где Q – энергия источника нагрева, включающего подобранные источники Q_1 и Q_2 ; v – скорость сварки, t – время достижения границы зоны термического влияния нижней границы зоны нагрева.

Моделирование процесса нагрева при сварке с использованием обоих критериев оптимальности показало хорошую корреляцию разработанных функционалов. Это послужило основанием для объединения критериев оптимальности в получении общего решения в поиске требуемых технологических параметров ЭЛС.

Применение физического функционала при моделировании процесса ЭЛС значительно сокращает вычислительный ресурс, так как использует исходную систему уравнений теплового процесса (1) в упрощенном варианте (для определения только v – скорости сварки и t – времени достижения границы зоны термического влияния нижней границы зоны нагрева).

В качестве исходного материала авторами был выбран технологический режим, применяемый в производственных условиях. Используя модели (1), (3), (5) проведен расчет параметров, входящий в состав этих уравнений. Результаты вычислений представлены в таблице.

Результаты вычисления для ВТ-14 толщиной 0,16 см

Q [Калл.]	Q ₁ [Калл.]	Q ₂ [Калл.]	Delta = 0,16 см (f = 0)					
			J ₁	Q/v	v [см/с]	t [с]	Q · t	J ₂
800	560	240	0,062243	484,8485	1,65	0,236	188,8	0,000291516
810	567	243	0,062089	486,4865	1,665	0,2346	190,026	0,000208469
820	574	246	0,061959	488,0952	1,68	0,2332	191,224	0,00014109
830	581	249	0,061844	489,6755	1,695	0,2318	192,394	8,82512E-05
840	588	252	0,061739	491,2281	1,71	0,2304	193,536	4,88335E-05
850	595	255	0,061649	492,7536	1,725	0,229	194,65	2,17259E-05
860	602	258	0,061591	494,2529	1,74	0,2276	195,736	5,82972E-06
870	609	261	0,061522	495,7265	1,755	0,2262	196,794	6,22367E-08
880	616	264	0,061473	497,1751	1,77	0,2248	197,824	3,35895E-06
890	623	267	0,061452	498,5994	1,785	0,2234	198,826	1,46767E-05
900	630	270	0,061436	500	1,8	0,222	199,8	3,29965E-05
910	637	273	0,061431	502,7624	1,81	0,2203	200,473	1,4464E-05
920	644	276	0,061438	505,4945	1,82	0,2186	201,112	3,10314E-06
930	651	279	0,061451	508,1967	1,83	0,2169	201,717	1,45467E-07
940	658	282	0,0615	510,8696	1,84	0,2152	202,288	6,89928E-06
950	665	285	0,061547	513,5135	1,85	0,2135	202,825	2,4751E-05
960	672	288	0,061954	516,129	1,86	0,2118	203,328	5,51664E-05
970	679	291	0,062063	518,7166	1,87	0,2101	203,797	9,96923E-05
980	686	294	0,062167	521,2766	1,88	0,2084	204,232	0,000159957
990	693	297	0,06226	523,8095	1,89	0,2067	204,633	0,000237674
1000	700	300	0,062375	526,3158	1,9	0,205	205	0,000334638

По результатам таблицы построены графики для функционалов (3) и (5) (рис. 5).

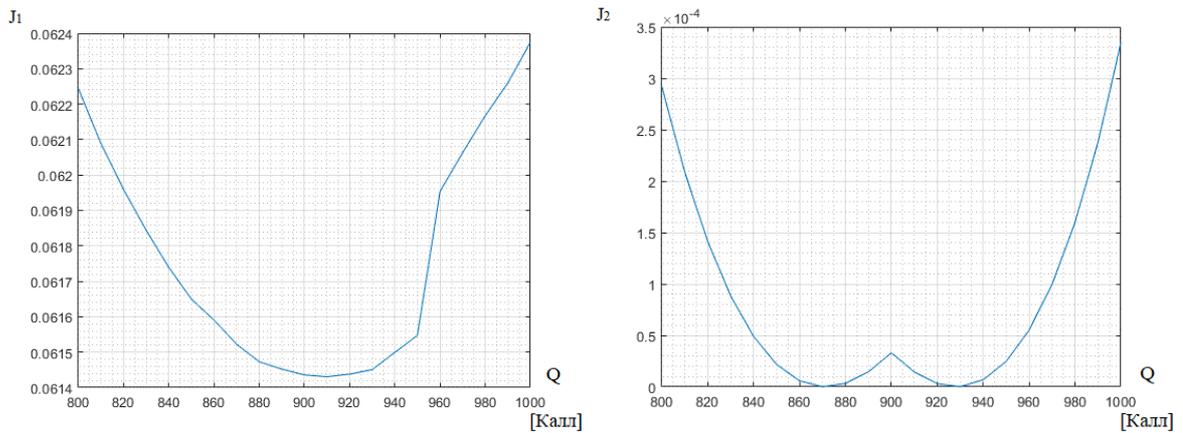


Рис. 5. Графики зависимостей функционалов

Fig. 5. Graphs of functional dependencies

Поиск оптимальных параметров выполняется по принятым критериям (4) и (6). В качестве решения принимаются координаты, где экстремумы по обоим функционалам совпадают.

В нашем случае имеется некоторое расхождение, поэтому была выбрана координата правого экстремума для функционала J_2 . В таблице выделены технологический режим и режим, который принят как оптимальный. Размеры технологического режима представлены на рис. 3. На рис. 6 приведены результаты моделирования и форма шлифа соответствующего выбранного оптимального режима сварки.

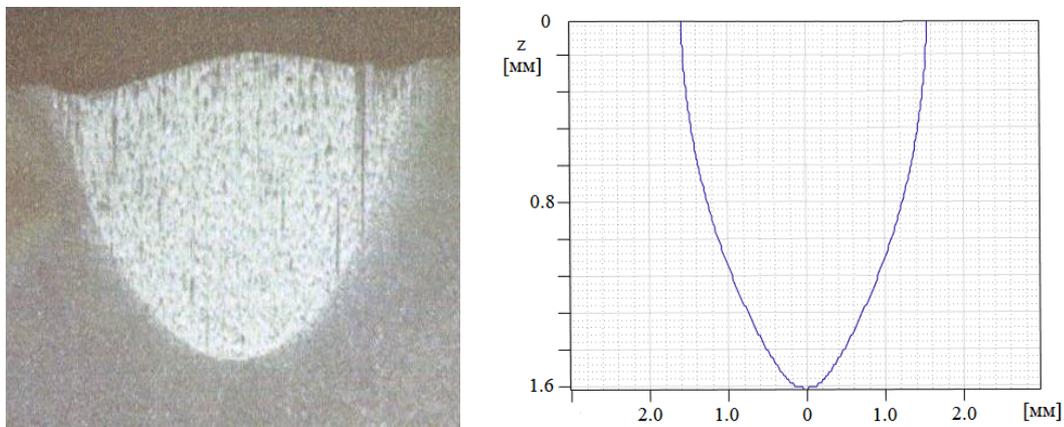


Рис. 6. Изображения формы шлифа и зоны термического влияния для оптимального по таблице режима сварки

Fig. 6. Images of the shape of the slot and the zone of thermal influence for the optimal welding mode according to Table

Как видно, оптимизация не дала значительных улучшений в сторону снижения ширины шва относительно глубины. Это связано, прежде всего, с тем, что фокусное пятно электронного пучка находилось на поверхности детали. Авторы провели исследования по влиянию на функционал (3) положения фокуса относительно поверхности детали. Было выявлено, что значение функционала будет наименьшим в случае, когда фокус электронного пучка находится внутри детали приблизительно на глубине, равной половине глубины проплавления (рис. 7).

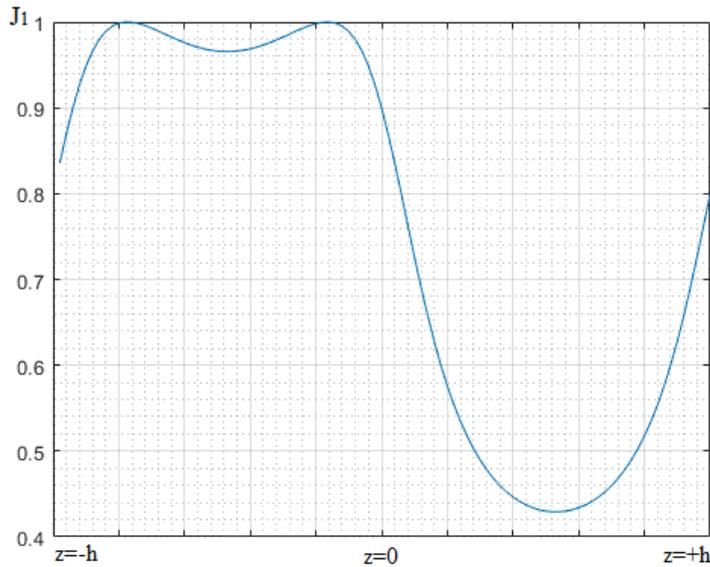


Рис. 7. График изменения функционала для толщины 0,16 см

Fig. 7. Functional change graph for 0.16 cm thickness

С учетом изменения положения фокуса авторы провели эксперимент с предложенным ранее режимом сварки. На рис. 8 приведены результаты моделирования и форма шлифа соответствующего выбранного оптимального режима сварки.

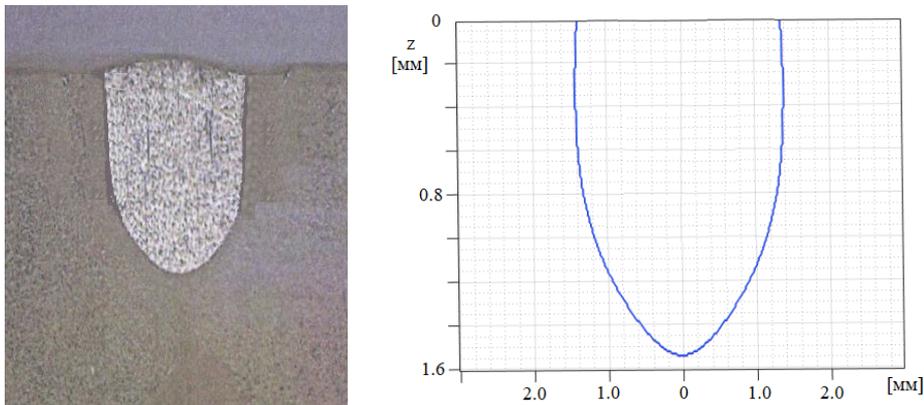


Рис. 8. Изображения формы шлифа и зоны термического влияния для оптимального режима сварки с учетом измененного фокусного расстояния

Fig. 8 Images of the shape of the slot and the zone of thermal influence for optimal welding mode taking into account the changed focal length

Результаты моделирования и опытные данные показали, что с применением полученных экспериментальных исследований боковые стенки шва опытного образца стали более параллельны, что удовлетворяет требованиям по снижению остаточных напряжений в сварочных деталях, что значительно повышает качественные показатели технологического процесса.

При моделировании технологического процесса сварки для больших толщин (от 3 см и более) авторы столкнулись со следующим явлением: при определении оптимального фокусного расстояния по минимуму функционала (2) экстремум функции не наблюдается (рис. 9).

У авторов не было возможности получить технологические параметры на образцы сварных швов больших толщин, поэтому они сделали предположение в том, что положение фокусного

пятна не оказывает влияния на процесс сварки. Объяснением этого может служить возможность сварочного оборудования проводить сварку таких глубин. Как правило, для этого применяются энергоустановки, укомплектованные электронно-лучевыми пушками с узко фокусными характеристиками пушки. Авторы провели моделирование, аналогичное изложенному для алюминиевого сплава АМГ-6 прогнозируемой модели теплового процесса сварки больших глубин проплавления, позволяющих провести оценку возможностей сварки изделий на существующем оборудовании или выбор подходящей для этого энергоустановки. Как видно из рис. 10, помимо общей координаты для критериев (3) и (5), наличие у второго функционала нескольких экстремумов расширяет картину поиска оптимальных параметров электронно-лучевой сварки, не ограничиваясь только общим с первым функционалом экстремумом.

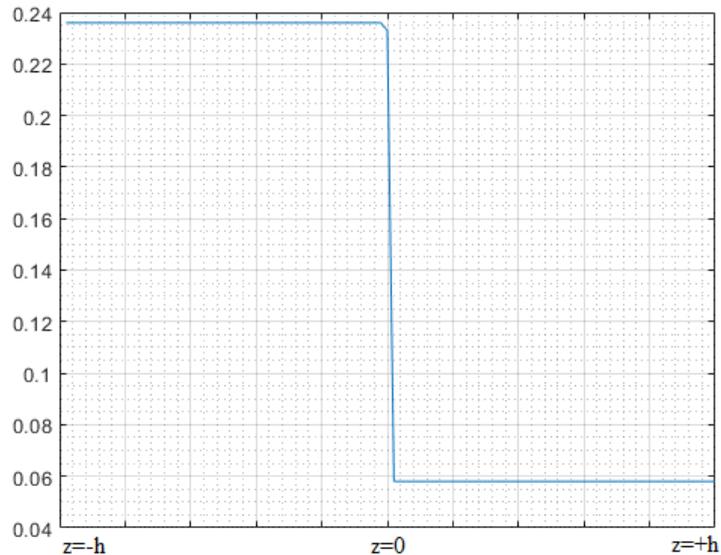


Рис. 9. График изменения функционала для толщины 10 см

Fig. 9. Functional change graph for 10 cm thickness

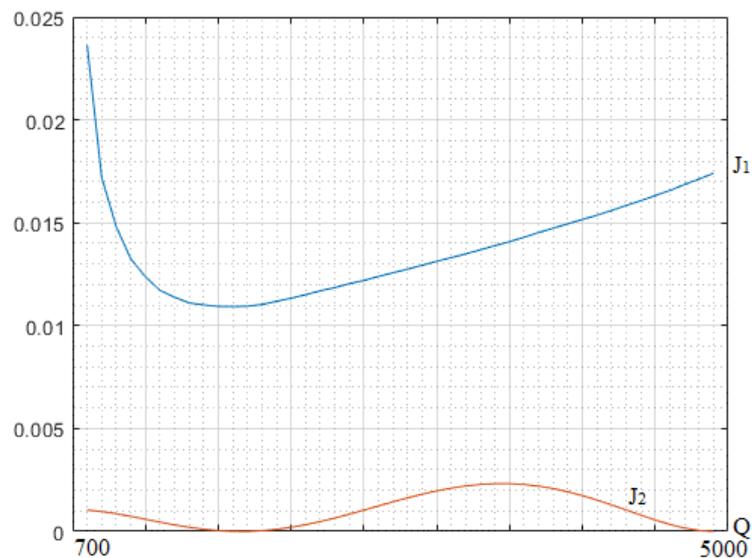


Рис. 10. Графики поведения функционалов от вводимой энергии для АМГ-6 толщиной 10 см

Fig. 10. Graphs of the behavior of functionals from the input energy for AMG-6 with a thickness of 10 cm

Совместное применение функционалов позволяет при моделировании объединить два физических свойства процесса нагрева материала: температурные характеристики зоны нагрева и эффективное энерговложение источников нагрева.

Заключение

Результаты научных исследований, проведенные авторами, позволяют теоретически определить такие возможные параметры технологии электронно-лучевой сварки, как скорость перемещения свариваемого материала и требуемая энергия источника нагрева для деталей с широким диапазоном свариваемых толщин. Применение электронно-лучевой технологии для изготовления изделий ракетно-космической техники существенно окажет влияние на качество сварных соединений за счет оптимального выбора указанных параметров сварки.

Библиографические ссылки

1. Guoqing, Ch., Junpeng L., Xi S., Hua G. Numerical simulation of keyhole morphology and molten pool flow behavior in aluminum alloy electron-beam welding // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 138. P. 879–888.
2. Ziyu, Y., Yuchao F., Jingshan H. Numerical simulation of heat transfer and fluid flow during vacuum electron beam welding of 2219 aluminium girth joints // *Vacuum*. 2020. Vol. 175. P. 109–126.
3. Sanjib J., Dilip K. P. Fuzzy Inference System-Based Neuro-Fuzzy Modeling of Electron-Beam Welding // *Advances in Computational Methods in Manufacturing*. 2019. Vol. 123. P. 839–850.
4. Mathematical modeling of the electron-beam wire deposition additive manufacturing by the smoothed particle hydrodynamics method / D. N. Trushnikov, E. G. Koleva, R. P. Daviyatshi et al. // *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*. 2019. Vol. 5. P. 1–14.
5. Родякина Р. В., Щербаков А. В., Гапонов Д. А. Моделирование процесса ионизации металла в ЭЛС // *Электронно-лучевая сварка и родственные технологии*. 2020. № 1. С. 129–136.
6. Мотасов М. И., Довыдов Д. А., Алексеев В. С. Автоматизация управления фокусировкой луча при электронно-лучевой сварке // *Вопросы электротехники*. 2017. № 1. С. 127–130.
7. Дрозд А. А. Численное исследование температурных полей и деформаций в процессе точечной электронно-лучевой сварки // *Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук*. 2018. № 1. С. 290–294.
8. Тарасова В. Н. Оптимизация конструкции электронно-лучевого оборудования за счет компьютерного моделирования // *Наука и современное образование. Материаловедение, машиностроение*. 2021. № 1. С. 11–13.
9. Мелюков В. В., Тарабукин Д. А. Определение параметров сварочного источника в зависимости от геометрических размеров сварочного шва // *Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. Материаловедение*. 2017. № 1. С. 117–130.
10. Seregin Yu. N., Murygin A. V., Kurashkin S. O. Features of modeling the electron beam energy distribution for the electron beam welding process // *Siberian Journal of Science and Technology*. 2020. Vol. 21, No. 2. P. 266–273.
11. Mathematical modelling of waveguide paths by electron-beam welding / S. O. Kurashkin, A. V. Murygin, Yu. N. Seregin et al. // *3rd International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing, ISM 2021. Procedia Computer Science, Elsevier*. 2022. Vol. 200. P. 83–90.
12. Hardware Control of the Electron Beam Energy Density by the Heating Spot / S. O. Kurashkin, V. S. Tynchenko, Yu. N. Seregin et al. // *Proceedings of Sixth International Congress on Information and Communication Technology. Lecture Notes in Networks and Systems. Springer, Singapore*, 2022. P. 71–78.
13. Kurashkin S. O., Seregin Yu. N. Modeling the thermal process using the temperature functional by electron beam welding // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing*, 2020. Vol. 734, No. 1. P. 012003.
14. Mathematical functional for thermal distribution calculating during the electron-beam welding process / S. O. Kurashkin, Yu. N. Seregin, V. S. Tynchenko et al. // *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*, 2020. Vol. 1515, No. 5. P. 052049.

15. Analytical characteristics of the electron beam distribution density over the heated spot for optimizing the electron-beam welding process / S. O. Kurashkin, V. D. Laptенок, A. V. Murygin, Yu. N. Seregin // IOP conference series: materials science and engineering. IOP Publishing. 2019. Vol. 681, No. 1. P. 012021.
16. Свидетельство № 2021616858 Российской Федерации. Программа для моделирования плотности распределения электронного пучка с использованием различных сканирований при электронно-лучевой сварке: № 2021615834: заяв. 19.04.2021, опубл. 28.04.2021 / Курашкин С. О., Тынченко В. С., Серегин Ю. Н., Мuryгин А. В. 1 с.
17. Сертификат № 2018664000 Российской Федерации. Программа для определения скорости сварки для оптимального нагрева металла в зоне проплавления: № 2018661400: заяв. 19.10.2018; опубл. 08.11.2018 / Серегин Ю. Н., Курашкин С. О., Мuryгин А. В., Тынченко В. С. 1 с.
18. Неровный В. М. Теория сварочных процессов. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. 340 с.
19. Недосека А. Я., Санченко Г. А., Ворона Г. А. Распределение температуры при воздействии концентрированного источника тепла на поверхность пластины // Автоматическая сварка. 1977. № 6. С. 1–4.
20. Недосека А. Я., Чернова О. И. Распределение температуры в пластинах с источником нагрева при сварке на разной глубине // Автоматическая сварка. 1977. № 7. С. 1–4.
21. Башенко В. В., Петров Г. Л. Формирование зоны проплавления при электронно-лучевой сварке // Автоматическая сварка. 1977. № 9. С. 23–27.
22. Михайлов В. Г., Петров П. И. Расчет тепловых процессов при электронно-лучевой сварке // Автоматическая сварка. 1988. № 5. С. 13–15.

References

1. Guoqing, Ch., Junpeng L., Xi S., Hua G. Numerical simulation of keyhole morphology and molten pool flow behavior in aluminum alloy electron-beam welding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019, Vol. 138, P. 879–888.
2. Ziyou, Y., Yuchao F., Jingshan H. Numerical simulation of heat transfer and fluid flow during vacuum electron beam welding of 2219 aluminium girth joints. *Vacuum*. 2020, Vol. 175, P. 109–126.
3. Sanjib J., Dilip K. P. Fuzzy Inference System-Based Neuro-Fuzzy Modeling of Electron-Beam Welding. *Advances in Computational Methods in Manufacturing*. 2019, Vol. 123, P. 839–850.
4. Trushnikov D. N. Koleva E. G., Daviyatshi R. P., Gerasimov R. M., Bayandin Yu. V. Mathematical modeling of the electron-beam wire deposition additive manufacturing by the smoothed particle hydrodynamics method. *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*. 2019, Vol. 5, P. 1–14.
5. Rodyakina R. V., Shcherbakov A. V., Gaponov D. A. [Modeling of the metal ionization process at EBW]. *Elektronno-luchevaya svarka i rodstvennye tekhnologii*. 2020, No. 1, P. 129–136 (In Russ.).
6. Motasov M. I., Dovyodov D. A., Alekseev V. S. [Automation of beam focusing control during electron beam welding]. *Voprosy elektrotekhniki*. 2017, No. 1, P. 127–130 (In Russ.).
7. Drozd A. A. [Numerical study of temperature fields and deformation in the process of spot electron beam welding]. *Prikladnaya matematika i informatika: sovremennyye issledovaniya v oblasti estestvennykh i tekhnicheskikh nauk*. 2018, No. 1, P. 290–294 (In Russ.).
8. Tarasova V. N. [Optimization of the design of electron beam equipment due to computer modeling]. *Nauka i sovremennoe obrazovanie. Materialovedenie, mashinostroenie*. 2021, No. 1, P. 11–13 (In Russ.).
9. Melyukov V. V., Tarabukin D. A., ElectJolisch T. [Determination of welding source parameters depending on the geometric dimensions of the weld]. *Elektronno-luchevaya svarka i smezhnye tekhnologii. Materialovedenie*. 2021, Vol. 63, P. 17–28 (In Russ.).
10. Seregin Yu. N., Murygin A. V., Kurashkin S. O. Features of modeling the electron beam energy distribution for the electron beam welding process. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2020, Vol. 21, No. 2, P. 266–273.
11. Kurashkin S. O., Murygin A. V., Seregin Yu. N., Tynchenko V. S., Lavrishev A. V. Mathematical modelling of waveguide paths by electron-beam welding. *3rd International Conference*

on Industry 4.0 and Smart Manufacturing, ISM 2021. *Procedia Computer Science, Elsevier*. 2022, Vol. 200, P. 83–90.

12. Kurashkin S. O., Tynchenko V. S., Seregin Yu. N., Murygin A. V., Bocharov A. N. Hardware Control of the Electron Beam Energy Density by the Heating Spot. *Proceedings of Sixth International Congress on Information and Communication Technology. Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, Singapore, 2022, P. 71–78.

13. Kurashkin S. O., Seregin Yu. N. Modeling the thermal process using the temperature functional by electron beam welding. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2020, Vol. 734, No. 1, P. 012003.

14. Kurashkin S. O., Seregin Yu. 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.

15. Kurashkin S. O., Laptinok V. D., Murygin A. V., Seregin Yu. N. Analytical characteristics of the electron beam distribution density over the heated spot for optimizing the electron-beam welding process. *IOP conference series: materials science and engineering*. IOP Publishing, 2019, Vol. 681, No. 1, P. 012021.

16. Certificate No. 2021616858 Russian Federation. A program for modeling the electron beam distribution density using various scans during electron beam welding: No. 2021615834 : application 19.04.2021 publ. 28.04.2021 Kurashkin S.O., Tynchenko V.S., Seregin Yu.N., Murygin A.V. 1 p.

17. Certificate No. 2018664000 Russian Federation. The program for determining the welding speed for optimal heating of metal in the area of penetration: No. 2018661400 : application 19.10.2018 : publ. 08.11.2018 Seregin Yu.N., Kurashkin S.O., Murygin A.V., Tynchenko V.S. 1 p.

18. Nerovniy V. M., Konovalov A. V., Yakushin B. F. *Teoriya svarochnykh protsessov* [Theory of welding processes]. Moscow, MGTU im. N. E. Bauman Publ., 2016, 340 p.

19. Nedoseka A. Ya., Sanchenko G. A., Vorona G. A. [Temperature distribution under the action of a concentrated heat source on the plate surface]. *Avtomaticheskaya svarka*. 1977, No. 6, P. 1–4 (In Russ.).

20. Nedoseka A. Ya., Chernova O. I. [Temperature distribution in plates with a welding heating source at different depths]. *Avtomaticheskaya svarka*. 1977, No. 7, P. 1–4 (In Russ.).

21. Bashenko V. V., Petrov G. L. [Formation of the penetration zone during electron beam welding]. *Avtomaticheskaya svarka*. 1977, No. 9, P. 23–27 (In Russ.).

22. Mikhailov V. G., Petrov P. I. [Calculation of thermal processes in electron beam welding]. *Avtomaticheskaya svarka*. 1988, No. 5, P. 13–15 (In Russ.).

© Серегин Ю. Н., Мурыгин А. В., Курашкин С. О., 2023

Серегин Юрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры информационно-управляющих систем; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ius_ceregin@sibsau.ru.

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

Курашкин Сергей Олегович – ассистент кафедры информационно-управляющих систем; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kurashkin_so@sibsau.ru.

Seregin Yuri Nikolaevich – Cand. Sc., Associate Professor of the Department of Information and Control Systems; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: ius_ceregin@sibsau.ru.

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

Kurashkin Sergey Olegovich – Assistant of the Department of Information and Control Systems; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: kurashkin_so@sibsau.ru.

УДК 544.623.032.52

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-751-759

Для цитирования: Трифонов С. В., Тихомиров А. А., Мuryгин А. В. Автоматизированная система очистки жидких продуктов переработки отходов для замкнутых экосистем космического назначения // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 4. С. 751–759. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-751-759.

For citation: Trifonov S. V., Tikhomirov A. A., Murygin A. V. [Automated system for cleaning liquid waste products for closed ecosystems for space purposes]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 4, P. 751–759. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-751-759.

Автоматизированная система очистки жидких продуктов переработки отходов для замкнутых экосистем космического назначения

С. В. Трифонов^{1,2*}, А. А. Тихомиров^{1,2}, А. В. Мuryгин²

¹Институт биофизики ФИЦ КНЦ СО РАН

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50/50

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

*E-mail: trifonov_sergei@inbox.ru

Обеспечение жизнедеятельности человека в течение нескольких лет в изолированных условиях будущих марсианских и лунных баз представляется возможным при организации круговоротного процесса преобразования органических отходов, в том числе экзометаболитов человека (кал, урина), в необходимые ему продукты: воду, кислород и пищу. Перспективным способом организации такого круговоротного процесса является создание трехзвенной замкнутой экосистемы (ЗЭС): человек, звено получения удобрений из органических отходов и растения, где растения синтезируют необходимые человеку продукты. В работе рассмотрена оригинальная схема комплексной установки очистки жидких продуктов переработки экзометаболитов человека от поллютантов в процессе получения питательных растворов для выращивания растений в условиях ЗЭС. Переработку экзометаболитов человека осуществляли в устройстве физико-химического окисления в водной среде перекиси водорода под действием переменного электрического тока – в реакторе «мокрого» сжигания. Подобрано периферийное оборудование для организации системы автоматического управления установкой очистки, выявлены проблемы и разработаны подходы в автоматизации технологических процессов и создании программного обеспечения для взаимодействия человека с предлагаемой установкой. Выполнены эксперименты по выращиванию растений салата, подтверждающие эффективность предлагаемых процессов очистки жидких продуктов переработки экзометаболитов человека. Сделан вывод, что созданная комплексная установка очистки, оснащенная предлагаемым программным обеспечением, может быть использована для научных исследований применительно к тематике ЗЭС, в том числе космического назначения.

Ключевые слова: управление технологическим процессом, системы жизнеобеспечения, утилизация органических отходов, обессоливание, растительное звено.

Automated system for cleaning liquid waste products for closed ecosystems for space purposes

S. V. Trifonov^{1,2*}, A. A. Tikhomirov^{1,2}, A. V. Murygin²

¹Institute of Biophysics SB RAS

50/50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: trifonov_sergei@inbox.ru

Ensuring human life activity for several years in isolated conditions of future Martian and lunar bases is possible with the organization of a circular process of converting organic waste, including human exometabolites (cal, urin), into the products he needs: water, oxygen and food. A promising way to organize such a circular process is to create a three-link closed ecosystem (CES): a person, a link for obtaining fertilizers from organic waste and plants - where plants synthesize the products necessary for a person. The paper considers the original scheme of a complex installation for the purification of liquid products of processing of human exometabolites from pollutants in the process of obtaining nutrient solutions for growing plants in a CES. The processing of human exometabolites was carried out in a device for physicochemical oxidation of hydrogen peroxide in an aqueous medium under the action of alternating electric current – in a “wet” combustion reactor. Peripheral equipment was selected for the organization of the automatic control system of the cleaning plant, problems were identified and approaches were developed in the automation of technological processes and the creation of software for human interaction with the proposed installation. Experiments on the cultivation of lettuce plants have been carried out, confirming the effectiveness of the proposed processes of purification of liquid products of processing of human exometabolites. It is concluded that the created integrated cleaning plant, equipped with the proposed software, can be used for scientific research in relation to the subject of CES, including space purposes.

Keywords: process control, life support systems, utilization of organic waste, desalination, plant link.

Введение

Проблеме создания замкнутых экосистем (ЗЭС) для обеспечения жизнедеятельности человека в условиях длительного космического полета и пребывания на небесных телах (Луна, Марс, астероиды и др.) в настоящее время уделяется все большее внимание ведущими космическими агентствами и другими крупными исследовательскими центрами [1; 2]. В России разработкой замкнутых экосистем космического назначения активно занимается Институт биофизики СО РАН [3]. При этом большое внимание уделяется созданию моделей замкнутых экосистем, на основе которых отрабатываются различные закономерности круговоротных процессов, которые затем могут быть основой для создания полномасштабных замкнутых экосистем с человеком. Будущие замкнутые экосистемы должны включать как биологические, так и физико-химические методы окисления отходов для последующего их включения в круговоротные процессы [4–17]. Для обеспечения эффективной работы физико-химических процессов окисления органических и неорганических отходов в ЗЭС крайне важно создание и устойчивое функционирование комплекса необходимых приборов и оборудования. Неотъемлемой частью такого оборудования является установка очистки жидких продуктов переработки отходов жизнедеятельности человека (кал, урина), поскольку в процессе окисления отходов возникают поллютанты, ингибирующие рост растений. В Институте биофизики СО РАН ведутся исследования по созданию таких методов очистки применительно к замкнутым экосистемам. В частности, разрабатывается программное обеспечение (ПО), позволяющее автоматизировать процессы очистки [17; 18].

Целью данной работы является биотестирование растворов, получаемых после очистки, и разработка цифровой автоматизированной системы управления для установки физико-химической очистки минерализованных экзометаболитов человека.

Методы и подходы

Продолжительное ежедневное прямое внесение минерализованных экзометаболитов в ирригационный раствор вызовет его засоление из-за высокого содержания NaCl в урине человека [19; 20]. Кроме того, метод «мокрого» сжигания практически не способен утилизировать мочевины, что повышает риск развития в системе условно патогенных уробактерий [21] и снижает доступность азота для растительного звена ЗЭС. Поэтому комплекс физико-химической переработки органических отходов включает в себя, помимо «мокрого» сжигания, еще несколько последовательных процессов очистки растворов минерализованных экзометаболитов, для каждого из которых разработан реактор [18]: 1) разложение мочевины; 2) выделение Cl₂; 3) синтез

НСl; 4) выделение щелочи; 5) выделение Na_2CO_3 ; 6) синтез NaCl . В совокупности эти 6 реакторов являются установкой очистки жидких продуктов физико-химической переработки продуктов жизнедеятельности человека.

Для оценки влияния жидких продуктов физико-химического окисления экзометаболитов человека на растения использовали ранее разработанные методические подходы по приготовлению на этой основе питательных растворов для их последующего использования в экспериментальной модели замкнутой экосистемы при условии регулярной (1 раз в 7 сут.) замены 1/8 части питательного раствора водой, т. е. за 8 недель происходила полная смена раствора [22].

Изучение влияния возможных поллютантов в питательном растворе потребовало проверки возможности длительного использования несменяемых растворов, приготовленных на основе жидких продуктов минерализации экзометаболитов человека, для выращивания растений. Объектом исследований являлся салат сорта «Московский парниковый». Растения в условиях экспериментальной модели замкнутой экосистемы выращивали методом гидропоники на керамзите. Технология и условия выращивания аналогична описанным ранее [22; 23]. Длительность выращивания от всходов до состояния технической зрелости 21 сут. В опытном варианте раствор был приготовлен на основе жидких продуктов минерализации. Контрольные варианты – стандартный раствор Кнопа: контроль 1 – несменяемый раствор с коррекцией; контроль 2 – через каждые 7 сут. раствор меняли на свежеприготовленный. В процессе роста растений коррекцию несменяемых поливных растворов проводили исходными растворами на основе содержания доступных форм азота.

При создании системы автоматизированного управления и программного обеспечения для установки очистки желателен единообразный подход, благодаря которому будет осуществлено однотипное отображение параметров процессов и меню программирования реакторов, а также использована однотипная форма алгоритма автоматизации управления всеми реакторами. Это важно, так как реакторы разные и оператору удобнее контролировать и настраивать их при единообразном отображении интерфейса. Кроме того, разрабатываемые система автоматизации и ПО должны быть легко адаптируемы к подключению возможных новых реакторов в структуру установки очистки. Следуя этой логике автоматика и ПО должны быть адаптируемы и к подключению реактора «мокрого» сжигания и остальных реакторов подсистемы физико-химической минерализации отходов [17]. Это представляется возможным, так как схема взаимодействия программ, соответствующая указанным требованиям к автоматике и ПО установки очистки, одинакова и для реактора «мокрого» сжигания (рис. 1).

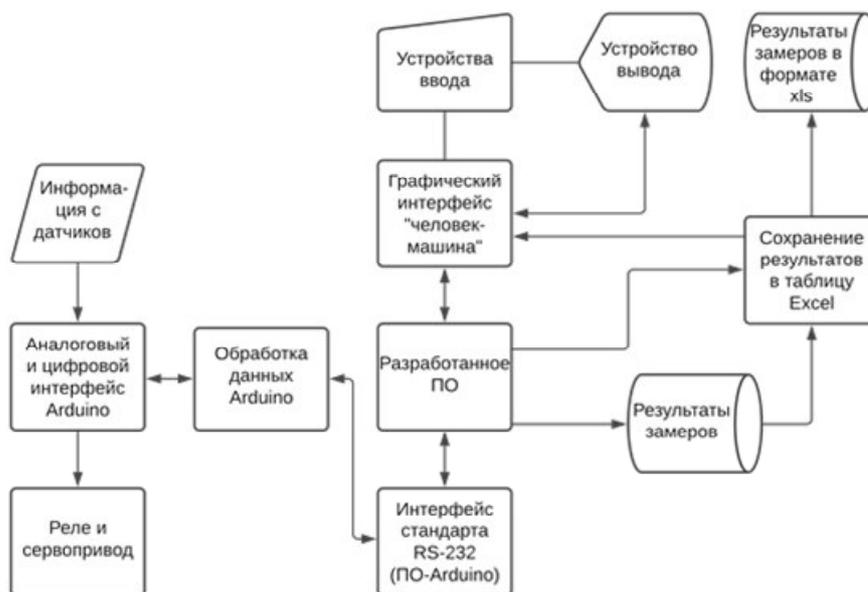


Рис. 1. Схема взаимодействия программ

Fig. 1. Scheme of program interaction

С целью обеспечения взаимодействия с периферийными устройствами, включая датчики, реле, сервоприводы и другие, было принято решение о применении платформы Arduino в связи с ее удобством программирования, широкой поддержкой аппаратных модулей и датчиков. Для программирования Arduino выбрана среда разработки Arduino IDE. Для разработки программного обеспечения с ориентацией на создание удобного интерфейса для конечного пользователя была добавлена дополнительная среда разработки Visual Studio с использованием языка программирования C#.

Алгоритмы работы реакторов

Исследование влияния поллютантов в питательном растворе показало, что биомасса растений салата, выращенных на несменяемых растворах опытного и контрольного вариантов, достоверно не отличалась, как и не было достоверных отличий от биомассы растений, выращенных на контрольных регулярно сменяемых растворах (табл. 1).

Таблица 1

Сухая масса (г) в расчете на одно растение салата сорта «Московский парниковый», выращенное на растворах, приготовленных на основе жидких продуктов минерализации экзометаболитов человека

Тип питательного раствора	Общая биомасса	Биомасса листьев
Несменяемый раствор экзометаболитов	3,3±0,4	2,9±0,3
Несменяемый раствор Кнопа (контроль 1)	2,8±0,5	2,4±0,5
Сменяемый раствор Кнопа (контроль 2)	2,7±0,9	2,1±0,4

Таким образом, экспериментально показана принципиальная возможность длительного использования питательных растворов, приготовленных на основе жидких продуктов минерализации экзометаболитов человека для выращивания растений фототрофного звена замкнутой экосистемы.

Исходя из анализа процессов физико-химического блока переработки отходов жизнедеятельности человека за основу логического управления был взят алгоритм автоматического управления реакторами [18, рис. 2, Б], логика работы которого заключается в поддержании параметров условий технологического процесса в заданных диапазонах и остановке процесса при достижении целевым параметром заданного значения. В работе [18] не раскрывается принцип работы блока корректировки параметров условий, который является проблемным моментом при попытке создания единой структуры алгоритма автоматического управления установки очистки. Это связано с тем, что процессы в реакторах установки разнообразны: протекают в жидкой и газообразной фазе, имеют один или несколько этапов, могут требовать частичного вмешательства оператора. Поэтому поддержание определенных значений параметров условий в конечном счете требует различных аппаратных и логических решений. В итоге, несмотря на возможность единообразного отображения параметров технологических процессов, программные настройки работы разных реакторов и алгоритмы управления будут отличаться друг от друга.

Необходимость индивидуального подхода в настройках к каждому реактору установки очистки указывает на возможность применения общего ПО для всех реакторов подсистемы физико-химической минерализации отходов [17], включая реактор «мокрого» сжигания, алгоритм работы которого отличается от алгоритма работы установки очистки (рис. 2).

В результате было разработано ПО, в котором для удобства пользователя рабочее пространство оператора разбито на вкладки, где каждой вкладке соответствует свой реактор (рис. 3).

Для каждой вкладки предусмотрены поля для вывода показателей в текстовом формате, кнопки для управления реактором, поля для построения графиков по результатам замеров, а также время работы и текущая дата.

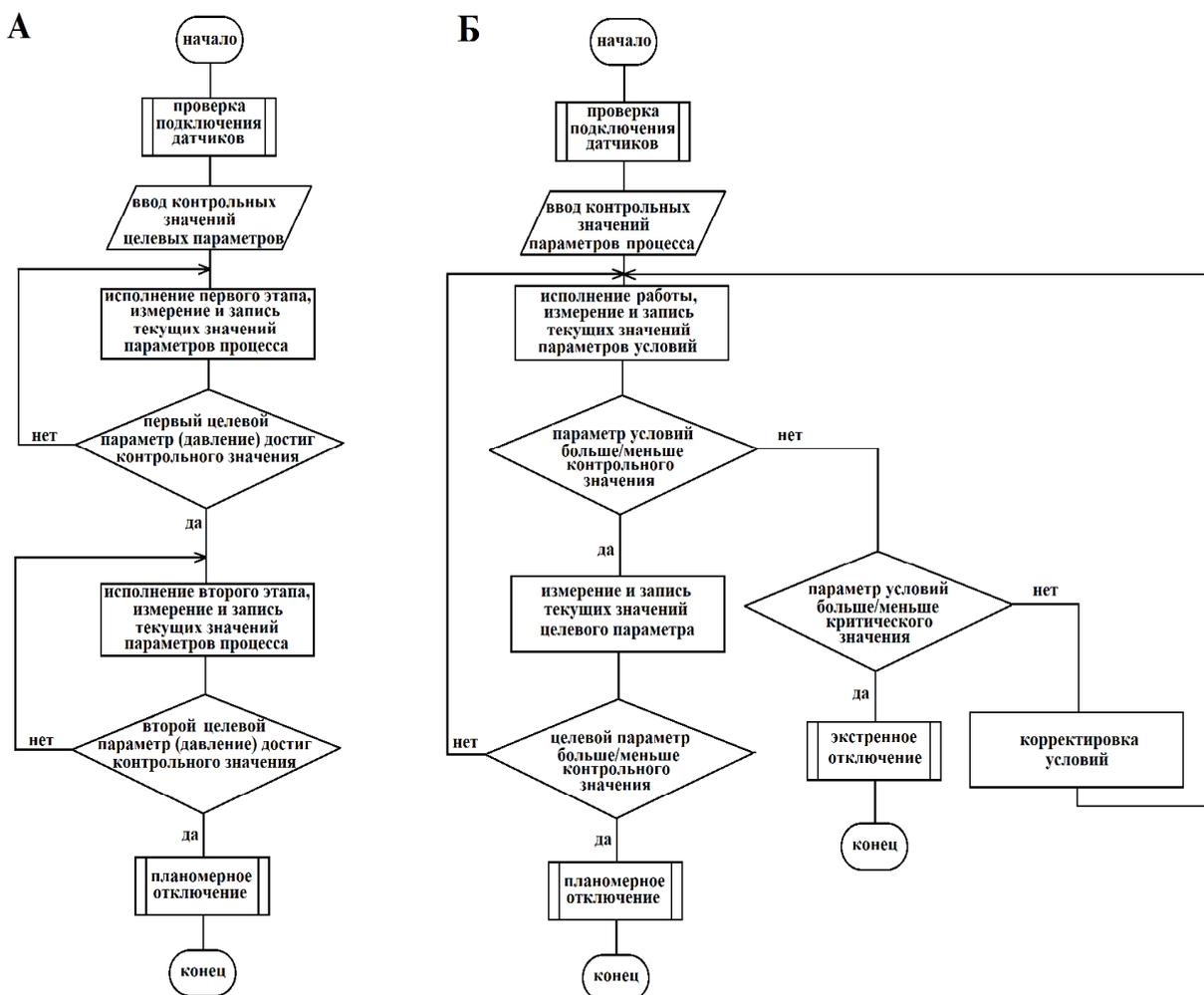


Рис. 2. Алгоритмы работы реакторов:
 А – без контроля параметров условий процесса;
 Б – с контролем параметров условий процесса

Fig. 2. Reactor operation algorithms:
 A – without control of the parameters of the process conditions;
 B – with control of the parameters of the process conditions

По кнопке «Запустить», в порт подключения подается сигнал, далее Arduino начинает передавать показания запущенного процесса. Данные выводятся в соответствующих полях, и по этим данным начинается построение графиков, представленных на рис. 3, где каждой вкладке соответствует реактор / процесс физико-химической переработки продуктов жизнедеятельности человека. Предлагается четырехцветная маркировка вкладок для обозначения состояния процессов: состояние 1 – процесс не запущен, не текущая вкладка; состояние 2 – процесс не запущен, текущая вкладка; состояние 3 – процесс запущен, не текущая вкладка; состояние 4 – процесс запущен, текущая вкладка. Настройки работы реакторов позволяют ввести значения параметров каждого процесса очистки для автоматического поддержания и корректировки условий его протекания.

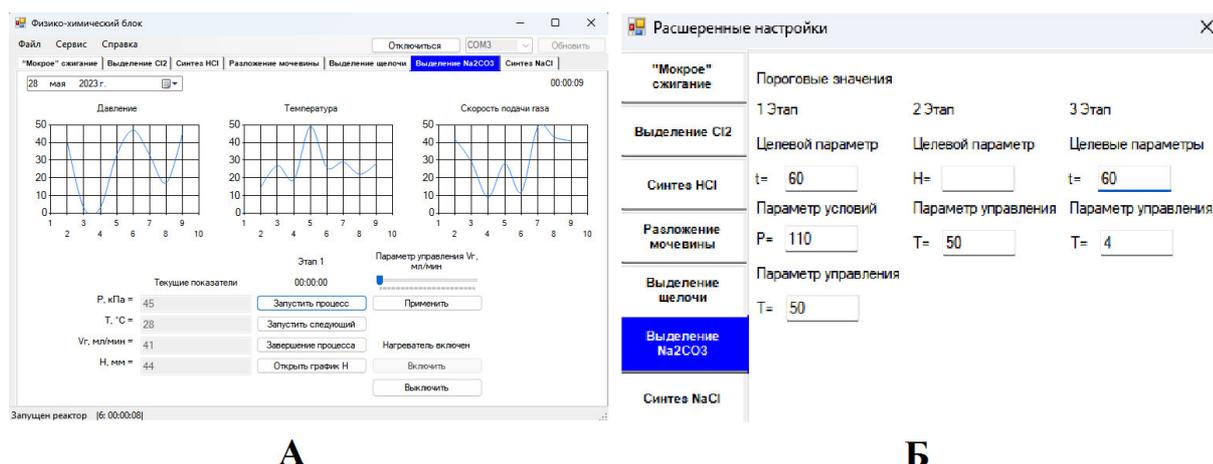


Рис. 3. Окно ПО во время работы:
 А – отображение параметров текущего процесса (выделение Na_2CO_3);
 Б – отображение настроек реактора выделения Na_2CO_3

Fig. 3. The software window during operation:
 А – displaying the parameters of the current process (Na_2CO_3 extraction);
 Б – displaying the settings of the Na_2CO_3 extraction reactor

Когда процесс запущен, помимо вывода данных в текущем времени, осуществляется запись данных в текстовый документ. Все результаты измерений сохраняются в отдельные папки в директории ПО. Названия файлов содержат точную дату запуска. А в самих документах описывается номер запущенного реактора и результаты измерений по времени.

Заключение

Подобрано периферийное оборудование для организации системы автоматического управления, выявлены проблемы и разработаны подходы в автоматизации данных процессов и создании программного обеспечения для взаимодействия человека с предлагаемой установкой. Выполнены эксперименты по выращиванию растений салата, подтверждающие эффективность предлагаемых процессов очистки жидких продуктов переработки экзометаболитов человека.

Таким образом, созданная комплексная установка очистки, оснащенная предлагаемым программным обеспечением, может быть использована для научных исследований применительно к тематике ЗЭС, в том числе космического назначения.

Благодарности. Работы по созданию и апробации установки по очистке от загрязнителей газовой среды были выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 121101300066-7).

Acknowledgements. The study was funded by State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 121101300066-7).

Библиографические ссылки

1. Gitelson J. I., Lisovsky G. M., MacElroy R. D. Manmade Closed Ecological Systems. New York: Taylor and Francis, 2003. 402 p.
2. Wheeler R. M. Agriculture for space: People and places paving the way // Open agriculture, 2017. Vol. 2 (1). P. 14–32.
3. Assessment of the possibility of establishing material cycling in an experimental model of the bio-technical life support system with plant and human wastes included in mass exchange / A. A. Tikhomirov, S. A. Ushakova, V. V. Velichko et al. // J. Acta Astronaut. 2011. Vol. 68. P. 1548–1554.

4. Waste bioregeneration in life support CES: development of soil organic substrate / N. S. Manukovsky, V. S. Kovalev, V. Ye., Rygalov, I. G. Zolotukhin // *Advances In Space Research*. 1997. Vol. 10. P. 1827–1832.
5. Wenting H., Yidong X., Hong L. A technique for preparing soil-like substrate for bioregenerative life support system // 17th IAA Humans in Space Symposium. Moscow, 2009. P. 53.
6. Пат. 2111939 Российская Федерация, МПК С 05 F 3/08. Способ утилизации отходов жизнедеятельности человека и несъедобной биомассы растений, приводящий к получению из них удобрений / Куденко Ю. А., Павленко Р. А. № 96114242/13 ; заявл. 10.07.96 ; опубл. 27.05.98, Бюл. № 15. 4 с.
7. Nelson M., Dempster W. F., Allen J. P. Integration of lessons from recent research for “Earth to Mars” life support systems // *Advances in Space Research*. 2008. Vol. 41. P. 675–683.
8. Canadian advanced life support capacities and future directions / M. Bamsey, T. Graham, M. Stasiak et al. // *Advances in Space Research*, 2009. Vol. 44. P. 151–161.
9. Drysdale A. E., Ewert M. K., Hanford A. J. Life support approaches for Mars missions // *Advances in Space Research*. 2003. Vol. 31 (1). P. 51–61.
10. Farges B., Poughon L., Creuly C., Cornet J.-F., Dussap C.-G., Lasseur C. Dynamic Aspects and Controllability of the MELiSSA Project: A Bioregenerative System to Provide Life Support in Space // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2008. Vol. 151. P. 686–699.
11. Progress and prospect of research on controlled ecological life support technique / S. S. Guo, R. X. Mao, L. L. Zhang et al. // *Reach*, 2017. Vol. 6. P. 1–10.
12. Walker J., Granjou C. MELiSSA the minimal biosphere: Human life, waste and refuge in deep space // *Futures*. 2017. Vol. 92. P. 59–69.
13. Escobar C., Naby J. Past, present, and future of closed human life support ecosystems – a review // 47th International Conference on Environmental Systems. Charleston, 2017. P. 18.
14. Putnam D. F. Composition and Concentrative Properties of Human Urine. NASA contract report. Washington, 1971. 107 p.
15. Kudenko Yu. A., Gribovskaya I. A., Zolotukhin I. G. Physical-chemical treatment of wastes: A way to close turnover of elements in LSS // *Acta Astronautica*, 2000. Vol. 46. P. 585–589.
16. Kudenko Yu. A., Gribovskaya I. A., Pavlenko R. A. Mineralization of wastes of human vital activity and plants to be used in a life support system // *Acta Astronautica*. 1997. Vol. 41. P. 193–196.
17. Подсистема физико-химических реакторов минерализации отходов для биолого-технических систем жизнеобеспечения космического назначения / Е. А. Морозов, С. В. Трифонов, Салтыков М. Ю. и др. // *Сибирский журнал науки и технологии*. 2017. Т. 18, № 3. С. 585–591.
18. Разработка принципов управления блоком обессоливания для замкнутых систем жизнеобеспечения космического назначения / А. А. Тихомиров, С. В. Трифонов, Е. А. Морозов, А. В. Мурыгин // *Сибирский аэрокосмический журнал*. 2022. Т. 23, № 3. С. 551–560.
19. Effect of NaCl concentration on productivity and mineral composition of *Salicornia europaea* as a potential crop for utilization NaCl in LSS / S. A. Ushakova, N. P. Kovaleva, I. V. Gribovskaya et al. // *Adv. Space Res.* 2005. Vol. 36. (7). P. 1349–1353.
20. Effect of NaCl concentration on productivity and mineral composition of *Salicornia europaea* as a potential crop for utilization NaCl in LSS / S. A. Ushakova, N. P. Kovaleva, I. V. Gribovskaya et al. // *Advances in Space Research*. 2005. Vol. 36. P. 1349–1353.
21. Mobley H., Mendz G., Hazell S. *Helicobacter pylori: Physiology and Genetics*. ASM Press, 2001. 626 p.
22. A biological method of including mineralized human liquid and solid wastes into the mass exchange of bio-technical life support systems / S. A. Ushakova, A. A. Tikhomirov, N. A. Tikhomirova et al. // *Advances In Space Research*. 2012. Vol. 50, No. 7. P. 932–940. DOI: 10.1016/j.asr.2012.05.023.
23. Автоматическая система контроля концентраций O_2 и H_2 в технологических газовых контурах биотехнических систем жизнеобеспечения космического назначения / Е. А. Морозов,

Трифонов С. В., Мурыгин А. В. и др. // Сибирский журнал науки и технологии. 2018. Т. 19, № 4. С. 691–697.

References

1. Gitelson J. I., Lisovsky G. M., MacElroy R. D. *Manmade Closed Ecological Systems*. New York, Taylor and Francis, 2003, 402 p.
2. Wheeler R. M. *Agriculture for space: People and places paving the way*. *Open agriculture*. 2017, Vol. 2 (1), P. 14–32.
3. Tikhomirov A. A., Ushakova S. A., Velichko V. V., Tikhomirova N. A., Kudenko Yu. A., Gribovskaya I. V., Gros J.-B., Lasseur Ch. Assessment of the possibility of establishing material cycling in an experimental model of the bio-technical life support system with plant and human wastes included in mass exchange. *J. Acta Astronaut.* 2011, Vol. 68, P. 1548–1554.
4. Manukovsky N. S., Kovalev V. S., Rygalov V. Ye., Zolotukhin I. G. Waste bioregeneration in life support CES: development of soil organic substrate. *Advances In Space Research*. 1997, Vol. 10, P. 1827–1832.
5. Wenting H., Yidong X., Hong L. A technique for preparing soil-like substrate for bioregenerative life support system. *17th IAA Humans in Space Symposium*. Moscow, 2009, P. 53.
6. Kudenko Yu. A., Pavlenko R. A. *Sposob utilizatsii otkhodov zhiznedeyatel'nosti cheloveka i nesjedobnoy biomassy rasteniy, privodyashhiy k polucheniyu iz nih udobreniy* [Way of utilization of human wastes and inedible plant biomass, gaining hydroponic fertilizer]. Patent RF, no. 2111939, 1998.
7. Nelson M., Dempster W. F., Allen J. P. Integration of lessons from recent research for Earth to Mars life support systems. *Advances in Space Research*. 2008, Vol. 41, P. 675–683.
8. Bamsey M., Graham T., Stasiak M. et al. Canadian advanced life support capacities and future directions. *Advances in Space Research*. 2009, Vol. 44, P. 151–161.
9. Drysdale A. E., Ewert M. K., Hanford A. J. Life support approaches for Mars missions. *Advances in Space Research*. 2003, Vol. 31, P. 51–61.
10. Farges B., Poughon L., Creuly C. et al. Dynamic Aspects and Controllability of the MELiSSA Project: A Bioregenerative System to Provide Life Support in Space. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2008, Vol. 151, P. 686–699.
11. Guo S. S., Mao R. X., Zhang L. L. et al. Progress and prospect of research on controlled ecological life support technique. *Reach*. 2017, Vol. 6, P. 1–10.
12. Walker J., Granjou C. MELiSSA the minimal biosphere: Human life, waste and refuge in deep space. *Futures*. 2017, Vol. 92, P. 59–69.
13. Escobar C., Nabity J. Past, present, and future of closed human life support ecosystems – a review. *47th International Conference on Environmental Systems*. Charleston, 2017, P. 18.
14. Putnam D. F. *Composition and Concentrative Properties of Human Urine*. NASA contract report. Washington, 1971, 107 p.
15. Kudenko Yu. A., Gribovskaya I. A., Zolotukhin I. G. Physical-chemical treatment of wastes: A way to close turnover of elements in LSS. *Acta Astronautica*. 2000, Vol. 46, P. 585–589.
16. Kudenko Yu. A., Gribovskaya I. A., Pavlenko R. A. Mineralization of wastes of human vital activity and plants to be used in a life support system. *Acta Astronautica*. 1997, Vol. 41, P. 193–196.
17. Morozov Ye. A., Trifonov S. V., Saltykov M. Yu. et al. [Physico-chemical waste mineralization reactors subsystem for closed bio technical life support systems for space application]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2017, No. 3, P. 585–591 (In Russ.).
18. Tikhomirov A. A., Trifonov S. V., Morozov Ye. A., Murygin A. V. [Development of control principles for the desalination unit for closed life support systems for space purposes]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 3, P. 551–560 (In Russ.).

19. Ushakova S. A., Kovaleva N. P., Gribovskaya I. V. et al. Effect of NaCl concentration on productivity and mineral composition of *Salicornia europaea* as a potential crop for utilization NaCl in LSS. *Adv. Space Res.* 2005, Vol. 36 (7), P. 1349–1353.

20. Ushakova S. A., Kovaleva N. P., Gribovskaya I. V., Dolgushev V. A., Tikhomirova N. A. Effect of NaCl concentration on productivity and mineral composition of *Salicornia europaea* as a potential crop for utilization NaCl in LSS. *Advances in Space Research.* 2005, Vol. 36, P. 1349–1353.

21. Mobley H., Mendz G., Hazell S. *Helicobacter pylori: Physiology and Genetics.* ASM Press, 2001, 626 p.

22. Ushakova S. A., Tikhomirov A. A., Tikhomirova N. A. et al. A biological method of including mineralized human liquid and solid wastes into the mass exchange of bio-technical life support systems *Advances In Space Research.* 2012, Vol. 50, No. 7, P. 932–940. DOI: 10.1016/j.asr.2012.05.023.

23. Morozov Ye. A., Trifonov S. V., Murygin A. V., Tikhomirov A. A. [Automatic Control System of O₂ and H₂ Concentrations in Technological Gas Circuits of BTLSS Space Application]. *Siberian Journal of Science and Technology.* 2018, Vol. 19, No. 4, P. 691–697 (In Russ.).

© Тихомиров А. А., Трифонов С. В., Морозов Е. А., Мурыгин А. В., 2023

Тихомиров Александр Аполлинариевич – доктор биологических наук, профессор, заведующий лабораторией управления биосинтезом фототрофов, Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук; заведующий кафедрой замкнутых экосистем, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: alex-tikhomirov@yandex.ru.

Трифонов Сергей Викторович – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией проблем создания круговоротных процессов искусственных экосистем, Институт биофизики Сибирского отделения Российской Академии наук; доцент кафедры замкнутых экосистем, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: trifonov_sergei@inbox.ru.

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

Tikhomirov Alexander Apollinariievich – Dr. Sc., professor, Head of laboratory of Phototrophic Biosynthesis Control, Institute of Biophysics Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; Head of chair of Closed EcoSystems, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: alex-tikhomirov@yandex.ru.

Trifonov Sergei Viktorovich – Ph. D., head of Laboratory for Problems of Establishing Cycling Processes of Artificial Ecosystems, Institute of Biophysics Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; Associate Professor, Department of Closed Ecosystems, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: trifonov_sergei@inbox.ru.

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

УДК 621.9.048

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-760-767

Для цитирования: Удельные энергозатраты электро-контактно-химической обработки металлов вибрирующим инструментом в электролите / И. Я. Шестаков, В. И. Шестаков, И. В. Трифанов, И. А. Ремизов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 4. С. 760–767. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-760-767.

For citation: Shestakov I. Ya., Shestakov V. I., Trifanov I. V., Remizov I. A. [Specific energy consumption of electro-contact-chemical treatment of metals with a vibrating tool in the electrolyte]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 4, P. 760–767. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-760-767.

Удельные энергозатраты электро-контактно-химической обработки металлов вибрирующим инструментом в электролите

И. Я. Шестаков^{1*}, В. И. Шестаков¹, И. В. Трифанов¹, 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

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

*E-mail: yakovlevish@mail.ru

По удельному расходу энергии процессы формообразования располагаются в трёх энергетических уровнях. Электрофизические и электрохимические методы обработки металлов находятся на третьем уровне, где удельные энергозатраты составляют более $6 \cdot 10^4$ Дж/см³. Анализ литературных данных показал противоречивость удельных затрат некоторых авторов. Удельные энергозатраты электроконтактной обработки (ЭКО) никак не могут быть соизмеримы с затратами при электрохимической обработке (ЭХО) из-за разных размеров удаляемых частиц с поверхности обрабатываемой детали. Литературные данные по удельным энергозатратам электроконтактно-химической обработки металлов вибрирующим инструментом в электролите отсутствуют, поэтому проведены эксперименты с фиксацией осциллограмм тока, напряжения и межэлектродного зазора. Приведена методика расчёта удельных энергозатрат по осциллограммам процесса. Рассчитаны затраты энергии на вибрацию электрода-инструмента, которые на порядок меньше на электро-контактно-химическую обработку. При уменьшении амплитуды вибрации или увеличении напряжения на электродах процесс в межэлектродном зазоре переходит в размерную обработку дугой. При электро-контактно-химической обработке металлов вибрирующим инструментом в воде удельные энергозатраты равны $(3,5-3,8) \cdot 10^5$ Дж/см³, что соответствует электроконтактной обработке. Предполагается, что использование водных растворов нейтральных солей приведёт к снижению затрат энергии.

Ключевые слова: удельные энергозатраты, электро-контактно-химическая обработка, вибрация, амплитуда, частота, осциллограмма, расчёт.

Specific energy consumption of electro-contact-chemical treatment of metals with a vibrating tool in the electrolyte

I. Ya. Shestakov^{1*}, V. I. Shestakov¹, I. V. Trifanov¹, I. A. Remizov²

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

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

*E-mail: yakovlevish@mail.ru

According to the specific energy consumption, the shaping processes are arranged in three energy levels. Electrophysical and electrochemical methods of metal processing are at the third level, where the specific energy consumption is more than $6 \cdot 10^4 \text{ J/cm}^3$. The analysis of the literature data showed the inconsistency of the specific costs of some authors. The specific energy consumption of electrical contact processing cannot be commensurate with the costs of electrochemical processing due to the different sizes of the particles removed from the surface of the workpiece. There are no literature data on the specific energy consumption of electro-contact-chemical treatment of metals with a vibrating instrument in the electrolyte, therefore, experiments have been carried out with the fixation of current, voltage and interelectrode gap oscillograms. The method of calculation of specific energy consumption according to the oscillograms of the process is given. The energy costs for vibration of the electrode-tool are calculated, which are an order of magnitude less for electro-contact-chemical treatment. When the vibration amplitude decreases or the voltage on the electrodes increases, the process in the interelectrode gap turns into dimensional arc processing. When electro-contact-chemical treatment of metals with a vibrating tool in water, the specific energy consumption is equal to $(3.5\text{--}3.8) \cdot 10^5 \text{ J/cm}^3$, which corresponds to electrocontact treatment. It is assumed that the use of aqueous solutions of neutral salts will lead to a reduction in energy costs.

Keywords: specific energy consumption, electro-contact-chemical treatment, vibration, amplitude, frequency, oscillogram, calculation.

Введение

Удельный расход энергии – один из важных показателей, влияющих на экономичность процесса формообразования. Удельный расход энергии определяют в кВт·час/кг, Дж/см³. В [1; 2] рекомендуют при выявлении закономерностей поведения металлов при различных физических процессах свойства металлов определять на единицу объема.

По этому признаку все процессы формообразования располагаются в трех энергетических уровнях. Первый уровень включает процессы, при осуществлении которых необходим минимум энергии для нарушения сил связи только между частью атомов или молекул тела. Этот уровень простирается до энергии плавления металлов (табл. 1), т. е. примерно до 10^4 Дж/см^3 [3].

Второй уровень включает процессы, требующие затрат энергии для нарушения связей между всеми атомами и молекулами тела. Для этого условия характерным процессом является литьё. Непонятно, почему развёртывание и шлифование расположены в этом уровне, ведь там не происходит нарушение связей между всеми атомами и молекулами. Удаление металла происходит в виде стружки [4]. Второй энергетический уровень расположен между энергией плавления 10^4 Дж/см^3 и энергией испарения металлов $6 \cdot 10^4 \text{ Дж/см}^3$.

Таблица 1

Энергетические уровни процессов формообразования

Энергетический уровень	Способ формообразования	Удельный расход энергии, Дж/см ³
I	Холодное деформирование	$1 \cdot 10^1\text{--}4 \cdot 10^1$
	Штамповка	$2 \cdot 10^1\text{--}6,5 \cdot 10^1$
	Холодное выдавливание	$5,5 \cdot 10^2\text{--}8,5 \cdot 10^2$
	Точение	$1,7 \cdot 10^3\text{--}2,5 \cdot 10^3$
	Протягивание	$2,5 \cdot 10^3\text{--}3,7 \cdot 10^3$
	Фрезерование	$5 \cdot 10^3\text{--}7,5 \cdot 10^3$
II	Горячее деформирование	$9 \cdot 10^3\text{--}3,4 \cdot 10^4$
	Литье	$1,4 \cdot 10^4\text{--}2,5 \cdot 10^4$
	Развёртывание	$1,2 \cdot 10^4\text{--}3 \cdot 10^4$
	Шлифование	$5,5 \cdot 10^4\text{--}7 \cdot 10^4$

Энергетический уровень	Способ формообразования	Удельный расход энергии, Дж/см ³
III	Размерная ЭХО	$4,25 \cdot 10^5 - 4,35 \cdot 10^5$
	Обработка:	
	анодно-механическая	$1,7 \cdot 10^5 - 5,2 \cdot 10^5$
	электроконтактная	$2,3 \cdot 10^5 - 4,6 \cdot 10^5$
	электроимпульсная	$3,5 \cdot 10^5 - 7,1 \cdot 10^5$
	электроискровая	$1,1 \cdot 10^6 - 2,9 \cdot 10^6$
	ультразвуковая	$6 \cdot 10^5 - 3,6 \cdot 10^6$
	светолучевая	$2,8 \cdot 10^7 - 4,7 \cdot 10^7$

В третьем энергетическом уровне расположены процессы, при осуществлении которых необходима энергия для полного разрушения сил связи между всеми атомами или молекулами тела. Характерными для этого уровня являются электрохимическая размерная обработка (ЭХРО), электроискровая и электроимпульсная обработки, обработка электронным и световым лучами. Этот уровень расположен выше энергии испарения металлов, т. е. выше $6 \cdot 10^4$ Дж/см³.

С ростом твердости и прочности материалов растут затраты энергии (рис. 1) [4], снижается производительность обработки. Современные металлы и сплавы имеют предел прочности более 200 МПа, поэтому вполне оправданы высокие энергозатраты электрообработки, так как другие способы формообразования становятся неконкурентоспособными по производительности.

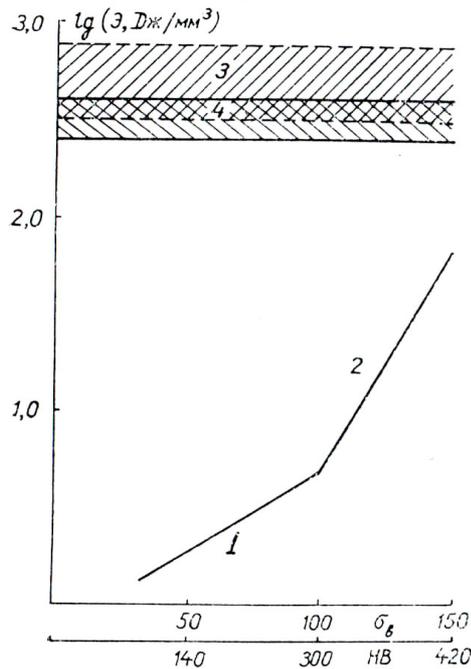


Рис. 1. Энергоёмкость некоторых видов обработки:
1 – обработка лезвийным инструментом; 2 – шлифование;
3 – электроимпульсная; 4 – ЭХО

Fig. 1. Energy intensity of some types of processing
1 – blade tool processing; 2 – grinding; 3 – electric pulse; 4 – ECHO

Анализ

Данные, приведенные в работах [4–6] и табл. 1–3, не согласуются со значениями удельного расхода энергии при электрохимической обработке, представленными авторами [7; 8] (табл. 4).

По мнению этих авторов, затраты при электрохимической обработке в 9–40 раз больше, чем при электроконтактной обработке. Из табл. 1 и 2 видно, что удельные расходы энергии электроконтактной и электрохимической обработок соизмеримы, что не соответствует действительности, так как удаление металла с обрабатываемой поверхности происходит разными размерами частиц: в первом случае – в виде капель расплавленного металла, во втором – в виде ионов металлов.

Подробные показатели разновидностей электрофизических способов обработки приведены в справочнике [6], табл. 3.

Таблица 2

Удельный расход энергии электрических методов обработки

№ п/п	Вид обработки	Удельный расход энергии, Дж/см ³ *10 ⁵
1	Электроискровая	11–29
2	Электроимпульсная	3,5–7,1
3	Электрохимическая	4–6
4	Электроконтактная	2,3–4,6

Таблица 3

Основные показатели электрофизических способов обработки металлов

Вид обработки	Средняя удельная производительность, см ³ /с	Средний удельный расход энергии, Дж/см ³
Электроискровая: черновая чистовая прецизионная	9,3 · 10 ⁻³ –1 · 10 ⁻² 8 · 10 ⁻⁴ –1,6 · 10 ⁻³ 1,7 · 10 ⁻⁶ –1,7 · 10 ⁻⁵	(4,3–7,2) · 10 ⁵ (1,4–2,0) · 10 ⁶ (2,0–2,5) · 10 ⁶
Электроимпульсная: черновая чистовая	1,7 · 10 ⁻² –1,8 · 10 ⁻¹ 8 · 10 ⁻⁴ –8 · 10 ⁻³	(3,5–7,1) · 10 ⁵ (2,6–5,8) · 10 ⁵
Электроконтактная: разрезание точение обдирка прошивание	1,6 · 10 ⁻² –1,3 · 10 ⁻¹ 1,6 · 10 ⁻² –6,5 · 10 ⁻¹ 15–17 8,3 · 10 ⁻³ –2,5 · 10 ⁻²	(0,3–1,2) · 10 ⁵ (1,2–1,4) · 10 ⁵ (2,3–4,6) · 10 ⁵ (0,12–5,8) · 10 ⁴

В табл. 3 вызывают сомнения удельные расходы энергии при электроконтактном прошивании отверстий, которые на порядок меньше, чем остальные виды этой обработки. При электроконтактном прошивании удаление продуктов эрозии из отверстий затруднено, поэтому требуются дополнительные траты энергии.

Таблица 4

Удельный расход энергии некоторых электрических методов обработки

№ п/п	Обработка	Удельный расход энергии, Дж/см ³ *10 ⁵
1	Электрохимическая	2,52–5,61[5]; 5,61–11,2[6]
2	Электроэрозионная	1,68–3,36
3	Электроконтактная	0,28–0,56

Более полные данные по удельным энергозатратам электрохимической обработки в кВт*час/кг имеются в справочнике [9]. С учётом плотности металлов произведён расчёт энергозатрат на единицу объёма обрабатываемого материала. В табл. 5 приведены результаты расчётов удельных энергозатрат для некоторых металлов.

**Удельные энергозатраты электрохимической размерной обработки металлов
в водных растворах нейтральных солей, Дж/см³ 10⁵**

Металл	25%NaCl	30%NaNO ₃	15%Na ₂ SO ₄
Сталь У10	1,96	6,44	70,84
Сталь 35ХГС	3,28	3,84	28,03
Сталь 4Х5В2ФС	3,12	4,37	34
Алюминий	1,55	1,94	65,5
Никель	2,14	22,3	39,2
Титановый сплав ВТ8	3,49	5,33	258

Из табл. 5 следует, что наименьшие удельные энергозатраты характерны для электрохимической обработки в водном растворе хлорида натрия. Это объясняется наличием в электролите активирующего аниона хлора, который способствует образованию промежуточных комплексных соединений [10]. При электрохимической обработке в водном растворе сульфата натрия удельные энергозатраты увеличиваются в 10–15 раз, что объясняется пассивацией анода [11]. Это явление особенно характерно при обработке титанового сплава ВТ8, так как титан активный металл, его стандартный электродный потенциал равен $-1,2$ В [12] и на его поверхности всегда присутствует окисная плёнка.

Методика

Экспериментальные исследования проводились на установке электрообработки с линейным электродинамическим двигателем, описанной в сборнике научных трудов [13]. Для крепления электрода-инструмента было изготовлено приспособление, обеспечивающее проток воды (слабый электролит) через межэлектродный зазор. Методика экспериментальных исследований изложена в работе [14]. Обработываемый металл-сталь ХВГ. Однако в этой статье не приведена методика расчёта удельных энергозатрат электро-контактно-химической обработки металлов в электролите по осциллограммам процесса.

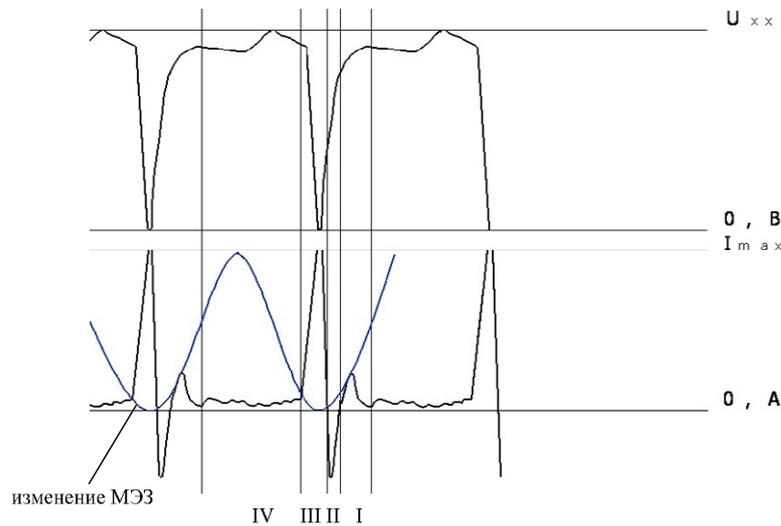


Рис. 2. Осциллограмма напряжения и тока ЭКХО

Fig. 2. Oscillogram of the voltage and current of the ECHO

Расчет удельного расхода энергии по осциллограмме. Типичная осциллограмма тока, напряжения и межэлектродного зазора при электро-контактно-химической обработке вибрирующим электродом-инструментом в воде приведена на рис. 9. Данные получены при среднем напряжении на электродах 16,7 В, амплитуде колебаний инструмента 0,75 мм. При амплитуде колебаний

0,25 мм и средней скорости потока воды в межэлектродном зазоре 1 м/с и менее наблюдается осциллограмма тока и напряжения, характерная для размерной обработки дугой [15; 16].

Осциллограмма разбивается на участки I, II, III, IV. Участок I – это предпробойный период – время образования стримера – канала разряда. Участок II – пробой межэлектродного промежутка, III – контакт электродов, IV – период, когда ток обусловлен анодным растворением обрабатываемого металла (электрохимическая обработка). Определяется площадь каждого треугольника, тем самым будет известно количество электричества, прошедшее в каждый период (участки I – IV). Далее по осциллограмме определяется среднее значение напряжения на каждом участке.

Для участка I имеем

$$q_I = \frac{1}{2} h_I a_I M_I M_\tau,$$

где h_I – высота треугольника участка I; a_I – длина основания треугольника участка I; M_I – масштаб тока, $M_I = 2,5 \text{ A/mm}$; M_τ – масштаб времени, $M_\tau = 0,48 \text{ мс/mm}$.

После расчета количества электричества для всех участков получаем:

$$q_I = 56,25 \cdot 10^{-3} \text{ Кл}; \quad q_{II} = 76,6 \cdot 10^{-3} \text{ Кл};$$

$$q_{III} = 600 \cdot 10^{-3} \text{ Кл}; \quad q_{IV} = 162 \cdot 10^{-3} \text{ Кл}.$$

Среднее напряжение на участках:

$$U_I = 24,3 \text{ В}; \quad U_{II} = 17,5 \text{ В}; \quad U_{III} = 11,3 \text{ В}; \quad U_{IV} = 25,7 \text{ В}.$$

Энергия импульса на участках:

$$Q_I = 1,351 \text{ Дж}; \quad Q_{II} = 1,348 \text{ Дж}; \quad Q_{III} = 6,78 \text{ Дж}; \quad Q_{IV} = 4,155 \text{ Дж}.$$

С учётом частоты колебаний электрода-инструмента (50 Гц), времени обработки и объёма удалённого металла удельные энергозатраты определяются

$$W = [(Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4) * f * t] / V,$$

где f – частота колебаний, с^{-1} ; t – время обработки, с ; V – объём удалённого металла, см^3 .

Удельный расход энергии составляет $W = (3,5-3,8) \cdot 10^5 \text{ Дж/см}^3$.

Кроме затрат электрической энергии, расходуемой на процесс электрообработки, необходимо учитывать затраты энергии на вибрацию электрода-инструмента. Эта энергия определяется по известной формуле:

$$W_B = m * f^2 * A^2,$$

где m – масса электрода-инструмента с приспособлением для его закрепления, кг ; A – амплитуда вибрации электрода-инструмента, м . После подстановки данных в вышеприведённую формулу получается, что энергозатраты на вибрацию электрода-инструмента на порядок меньше, чем на процессы электро-контактно-химической обработки.

Заключение

При выборе метода обработки металлов и сплавов важным показателем являются удельные энергозатраты. Для материалов, труднообрабатываемых механическими способами, альтернативой являются методы электрообработки. Анализ литературных данных показал, что показатели по удельным энергозатратам противоречивые, а для комбинированного электро-контактно-химического способа обработки вибрирующим электродом в воде эта характеристика практически отсутствует. Расчёт по осциллограммам процесса показывает, что удельные энергозатраты электро-контактно-химической обработки вибрирующим электродом в воде соответствуют электроэрозионной обработке и электрохимической обработке в водном растворе хлорида натрия или нитрата натрия. При электро-контактно-химической обработке в водном

растворе вышеуказанных солей следует ожидать снижение удельных энергозатрат, так как уменьшаются потери энергии на нагрев электролита в связи с уменьшением его электрического сопротивления, а ионы хлора и нитрата снижают энергию активации обрабатываемого металла.

Библиографические ссылки

1. Верхотуров А. Д., Шпилёв А. М., Евстигнеев А. И. Основы материаловедения : монография. Т. 1. Владивосток : Дальнаука, 2012. 270 с.
2. Николенко С. В., Верхотуров А. Д. Новые электродные материалы для электроискрового легирования. Владивосток : Дальнаука, 2005. 219 с.
3. Смоленцев Е. В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. М. : Машиностроение, 2005. 511 с.
4. Зубарев Ю., Приемышев А. Теория и практика повышения эффективности шлифования материалов. М. : Лань, 2010. 304 с.
5. Физико-химические методы в производстве газотурбинных двигателей / Ю. С. Елисеев, В. В. Крылов, Б. П. Саушкин и др. ; под ред. Саушкина Б. П. М. : Форум, 2013. 456 с.
6. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / под ред. А. М. Дальского, А. Г. Сулова, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. 5-е изд., испр. М. : Машиностроение, 2003. 944 с.
7. Теоретическое обоснование рациональных параметров режима электроконтактной обработки проволочным инструментом / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, А. В. Москаленко, П. С. Богдан // Вестник Гомельского гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. 2012. № 3. С. 3–11.
8. Орлов В. Ф., Чугунов Б. И. Электрохимическое формообразование. М. : Машиностроение, 1990. 240 с.
9. Справочник по электрофизическим и электрохимическим методам обработки / Г. Л. Амитан и др. ; под общ. ред. В. А. Волосатого Л. : Машиностроение, 1988. 719 с.
10. Житников В. П., Зайцев А. Н. Импульсная электрохимическая размерная обработка. М. : Машиностроение, 2008. 413 с.
11. Саушкин Б. П., Сычков Г. А., Атанасянц А. Г. Современное состояние и перспективы развития электрохимической размерной обработки // Металлообработка. 2002. № 6. С. 9–17.
12. Справочник по электрохимии / под ред. А. М. Сухотина. Л. : Химия, 1981. 488 с.
13. Совершенствование системы управления установки электрообработки металлов на базе линейного электродинамического двигателя / И. Я. Шестаков, В. И. Шестаков, А. А. Фадеев, Н. А. Швалева // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 3. С. 543–549.
14. Шестаков И. Я., Стрюк А. И., Цуканов А. В. Импульсная электро-обработка вибрирующим электродом-инструментом // Вестник СибГАУ. 2004. Вып. 5. С. 253–258.
15. Носуленко В. И. Размерная обработка металлов электрической дугой // Электронная обработка материалов. 2006. № 1. С. 1–10.
16. Саушкин Б. П. Электрический разряд в жидких и газовых средах основа нового поколения методов и технологий машиностроительного производства // Электронная обработка материалов. 2004. № 1. С. 1–14.

References

1. Verkhoturov A. D., Shpil'ov A. M., Evstigneev A. I. *Osnovy materialologii* [Fundamentals of Materialology]. Vol. 1. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2012, 270 p.
2. Nikolenko S. V., Verkhoturov A. D. *Novye elektrodnye materialy dlya elektroiskrovogo legirovaniya*. [New electrode materials for electric spark alloying]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2005, 219 p.
3. Smolentsev E. V. *Proektirovanie elektricheskikh i kombinirovannykh metodov obrabotki*. [Design of electrical and combined processing methods]. Moscow, Mechanical Engineering Publ., 2005, 511 p.
4. Zubarev Yu., Priemyshev A. *Teoriya i praktika povysheniya effektivnosti shlifovaniya materialov* [Theory and practice of improving the efficiency of grinding materials]. Moscow, Lan Publ., 2010, 304 p.

5. Eliseev Ju. S., Krylov V. V., Saushkin B. P. *Fiziko-himicheskie metody v proizvodstve gazoturbinnykh dvigateley* [Physico-chemical methods in the production of gas turbine engines]. Moscow, Forum Publ., 2013, 456 p.
6. *Spravochnik tehnologa-mashinostroitelya* [Handbook of a mechanical engineer]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003, 944 p.
7. Kiselev M. G., Drozdov A.V., Moskalenko A.V., Bogdan P. S. [Theoretical substantiation of rational parameters of the mode of electrocontact processing with a wire tool]. *Vestnik Gomel'skogo gos. tekhn. un-ta im. P. O. Sukhogo*. 2012, No. 3, P. 3–11 (In Russ.).
8. Orlov V. F., Chugunov B. I. *Elektrokhimicheskoe formoobrazovanie* [Electrochemical shaping]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990, 240 p.
9. *Spravochnik po elektrofizicheskim i elektrokhimicheskim metodam obrabotki* [Handbook of electrophysical and electrochemical processing methods]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988, 719 p.
10. Zhitnikov V. P., Zaitsev A. N. *Impul'snaya jelektrokhimicheskaja razmernaja obrabotka* [Pulsed electrochemical dimensional processing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008, 413 p.
11. Saushkin B. P., Suchkov G. A., Atanasyants A. G. [Current state and prospects of development of electrochemical dimensional processing]. *Metallobrabotka*. 2002, No. 6, P. 9–17 (In Russ.).
12. *Spravochnik po elektrokhimii* [Handbook of Electrochemistry]. Leningrad, Khimiya Publ., 1981, 488 p.
13. Shestakov I. Ya., Stryuk A. I., Bez'yazykov S. A. [Electrical treatment plant with linear electrodynamic motor]. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 3, P. 543–549 (In Russ.).
14. Shestakov I. Ya., Stryuk A. I., Tsukanov A. V. [Impul'snaya elektroobrabotka vibriruyushchim elektrodom-instrumentom]. *Vestnik SibGAU*. 2004, No. 5, P. 253–258 (In Russ.).
15. Nosulenko V. I. [Dimensional processing of metals by electric arc]. *Elektronnaya obrabotka materialov*. 2006, No. 1, P. 1–10 (In Russ.).
16. Saushkin B.P. [Electric discharge in liquid and gas media is the basis of a new generation of methods and technologies of machine-building production]. *Elektronnaya obrabotka materialov*. 2004, No. 1, P. 1–14 (In Russ.).

© Шестаков И. Я., Шестаков В. И., Трифанов И. В., Ремизов И. А., 2023

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 – аспирант кафедры технического регулирования и метрологии; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: pn3vm4t@gmail.com.

Трифанов Иван Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технического регулирования и метрологии; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: sibgau-uks@mail.ru.

Ремизов Игорь Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры технической механики; Сибирский федеральный университет. E-mail: 2remizov@mail.ru.

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 – graduate student of the Department of Technical Regulation and Metrology; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: pn3vm4t@gmail.com.

Trifanov Ivan Vasilievich – Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Technical Regulation and Metrology; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: sibgau-uks@mail.ru.

Remizov Igor Anatolyevich – Cand. Sc., associate professor of the department of technical mechanics; Siberian Federal University. E-mail: 2remizov@mail.ru.

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Файлы со статьей принимаются по электронной почте vestnik@sibsau.ru.

Электронная копия. Статья набирается в программе Microsoft Office Word 2003 (**расширение имени файла DOC!**)

Объем статьи: 5–20 страниц (включая рисунки, таблицы и библиографические ссылки), краткое сообщение – 4–5 страниц, обзорная статья – до 20 страниц.

Параметры страницы. Формат А4 (210×297). Поля: правое и левое – 2 см, верхнее и нижнее – 2,5 см.

Текст. Шрифт Times New Roman 11. Подзаголовки: шрифт Times New Roman 11 bold.

Межстрочный интервал – одинарный, межбуквенный и междусловный интервал – нормальный, перенос слов не допускается.

Абзацный отступ равен 0,5 см.

Не допускается (!) набирать тексты прописными (заглавными) буквами и жирным шрифтом (кроме названия), а также размещать все указанные элементы в рамках и имитировать оформления набора, выполняемого в журнале.

Статья должна содержать предмет, тему, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

Страницы не нумеруются.

СТРУКТУРА СТАТЬИ:

1) **Индекс УДК** предшествует названию статьи, соответствует заявленной теме и проставляется в верхнем левом углу листа.

2) **Название статьи:** не более 15 слов. Аббревиатуры и сокращения в названии не допускаются.

3) **Авторы.** Инициалы и фамилия. Количество авторов одной статьи не более пяти. Автор имеет право публиковаться в выпуске один раз, второй в соавторстве.

4) **Аффилиация автора при публикации:** название и адрес организации, а также электронная почта автора-корреспондента. Если авторов несколько, у каждой фамилии и соответствующей организации проставляется цифровой верхний индекс. Если все авторы статьи работают в одной организации, она указывается один раз;

5) **Аннотация:** минимум 230–250 слов (следует ориентироваться на объем англоязычной аннотации). Структура аннотации: цель исследования, методы, результаты, заключение. Курсивом.

6) **Ключевые слова:** не более 5–7 слов или словосочетаний. Курсивом.

7) **Название статьи** на английском языке.

8) **Авторы** на английском языке.

9) **Аффилиация автора** на английском языке.

10) **Аннотация** на английском языке.

11) **Ключевые слова** (Keywords) на английском языке.

12) **Основной текст** строится по следующей схеме и содержит обязательные подзаголовки:

– Введение

– Тематические подзаголовки по основной части текста.

– Заключение.

13) **Благодарности** (если есть указание на источники финансирования, гранты).

14) **Acknowledgements** (Благодарности дублируются на английском языке).

15) **Библиографические ссылки.** Библиографические ссылки должны содержать не менее 15 источников! Библиографические ссылки оформляются на русском языке по ГОСТ Р 7.0.5-2008. Ссылки на источники расставляются по тексту в квадратных скобках в порядке нумерации по мере цитирования.

16) **References.** Библиографические ссылки в романском алфавите оформляются по требованиям, представленным на сайте. Используется система транслитерации BGN (translit.net)

17) **Сведения об авторах на русском и английском языках.** сведения указывается ФИО автора, ученая степень, ученое звание, должность, название организации. Например:

Сенашов Сергей Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой ИЭС; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: sen@sibsau.ru.

Senashov Sergei Ivanovich – Dr. Sc, Professor, Head of the Department of IES; Siberian State University of Science and Technology. E-mail: sen@sibsau.ru.

