

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия

**Юго-Западного
государственного
университета**

Научный журнал

Том 25 № 2 / 2021



Proceedings

**of the Southwest
State University**

Scientific Journal

Vol. 25 № 2 / 2021



**Известия Юго-Западного
государственного университета
(Izvestiya Yugo-Zapadno gosudarstvennogo universiteta)**

Научный рецензируемый журнал

Основан в 1997 г.

До 2011 года журнал издавался под названием
«Известия Курского государственного технического университета».

Цель издания – публичное представление научно-технической общественности научных результатов фундаментальных, проблемно-ориентированных научных исследований в таких областях, как технология и оборудование механической и физико-технической обработки, сварка, роботы, мехатроника и робототехнические системы, управление в социальных и экономических системах, методы и системы защиты информации, информационная безопасность, автоматизация и управление технологическими процессами, строительные конструкции, теплоснабжение, вентиляция, газоснабжение и освещение, строительная механика.

В журнале публикуются оригинальные работы, обзорные статьи, рецензии и обсуждения, соответствующие тематике издания.

Публикация статей в журнале для авторов бесплатна.

Целевая аудитория: научные работники, профессорско-преподавательский состав образовательных учреждений, экспертное сообщество, молодые ученые, аспиранты, заинтересованные представители широкой общественности.

Журнал придерживается политики открытого доступа. Полнотекстовые версии статей доступны на сайте журнала, научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU.

Журнал включен в перечень ведущих научных журналов и изданий ВАК Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора наук, кандидата наук по следующим научным специальностям:

Машиностроение и машиноведение: 05.02.05; 05.02.07; 05.02.10.

Строительство: 05.23.01; 05.23.03; 05.23.17.

Информатика, вычислительная техника и управление: 05.13.01; 05.13.05; 05.13.06; 05.13.10; 05.13.18; 05.13.19.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

Емельянов Сергей Геннадьевич, д-р техн. наук, профессор, чл.-кор. Российской академии архитектуры и строительных наук, Лауреат премии правительства РФ в области науки и техники, ректор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г.Курск, Россия)

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

Бредихин Владимир Викторович, д-р экон. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г.Курск, Россия)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Агеев Евгений Викторович, д-р техн. наук, профессор; Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Алексеев Юрий Владимирович, д-р архитектуры, профессор; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (г. Москва, Россия);

Бобырь Максим Владимирович, д-р техн. наук, доцент; Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Бок Томас, д-р техн. наук, профессор, Мюнхенский технический университет (г.Мюнхен, Германия);

Бьянко Лино, д-р философии (PhD), профессор международной академии архитектуры, профессор Университета архитектуры, строительства и геодезии (г. София, Болгария), старший преподаватель Университета Мальты (Мальта);

Дегтярев Сергей Викторович, д-р техн. наук, профессор; Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Димитров Любомир Ванков, д-р техн. наук, профессор, Технический университет Софии (г.София, Болгария);

Жусубалиев Жаныбай Турсунбаевич, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Колчунов Виталий Иванович, д-р техн. наук, профессор, академик Российской академии архитектуры и строительных наук, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Кузнецов Сергей Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (г. Воронеж, Россия);

Кукарас Даниэль, д-р философии (PhD), профессор, факультет гражданского строительства, Нови-Садский университет (г.Суботица, Сербия);

Куц Вадим Васильевич, д-р техн. наук, доцент,
Юго-Западный государственный университет
(г.Курск, Россия);

Пановко Григорий Яковлевич, д-р техн. наук,
профессор, Институт машиноведения
Российской академии наук (г.Москва, Россия);

Сизов Александр Семенович, д-р техн. наук,
профессор, Юго-Западный государственный
университет (г.Курск, Россия);

Смирнов Игорь Михайлович, д-р техн. наук,
доцент, АО «Научно-исследовательский
инженерный институт» (г. Балашиха, Россия);

Сотникова Ольга Анатольевна, д-р техн. наук,
профессор, Воронежский государственный
технический университет (г.Воронеж, Россия);

Титов Виталий Семенович, д-р техн.наук,
профессор, заслуженный деятель науки России,
Юго-Западный государственный
университет (г.Курск, Россия);

Турков Андрей Викторович, д-р техн. наук,
профессор, Орловский государственный университет
им. И.С.Тургенева (г.Орел, Россия);

Щербаков Владимир Иванович, д-р техн. наук,
доцент, Воронежский государственный технический
университет (г.Воронеж, Россия);

Яцун Сергей Федорович, д-р техн. наук, профессор,
Заслуженный деятель науки России,
Юго-Западный государственный университет
(г.Курск, Россия).

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Емельянов Сергей Геннадьевич, (председатель)
д-р техн.наук, профессор, чл.-кор. Российской академии
архитектуры и строительных наук, Лауреат
премии правительства РФ в области науки и техники,
ректор, Юго-Западный государственный университет»
(г.Курск, Россия)

Бертрам Торстен, д-р техн. наук, профессор, Институт
теории управления и системного проектирования
Технического университета (г. Дортмунд, Германия);

Гриднев Сергей Юрьевич, д-р техн. наук, доцент,
Воронежский государственный технический
университет (г.Воронеж, Россия);

Ежов Владимир Сергеевич, д-р техн. наук,
профессор, Изобретатель СССР, Юго-Западный
государственный университет (г.Курск, Россия);

Зотов Игорь Валерьевич, д-р техн. наук, профессор,
Юго-Западный государственный университет
(г.Курск, Россия);

Ивахненко Александр Геннадьевич, д-р техн. наук,
профессор, Юго-Западный государственный
университет (г.Курск, Россия);

Колмыков Валерий Иванович, д-р техн. наук,
профессор, Юго-Западный государственный университет
(г.Курск, Россия);

Колчунов Владимир Иванович, д-р техн.наук,
профессор, член Российской академии архитектуры
и строительных наук, Юго-Западный государственный
университет (г.Курск, Россия);

Корневский Николай Алексеевич, д-р техн. наук,
профессор, Заслуженный деятель науки России, Юго-
Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Латыпов Рашид Абдулхакович, д-р техн. наук,
профессор, Московский политехнический университет
(г.Москва, Россия);

Локтионова Оксана Геннадьевна, д-р техн. наук,
профессор, Юго-Западный государственный
университет (г.Курск, Россия);

Шах Райнер, д-р техн. наук, профессор, Дрезденский
технический университет (г.Дрезден, Германия).

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

Адрес учредителя, издателя и редакции:

305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94

Телефон: +7(4712) 22-25-26,

Факс: +7(4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:

Журнал зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций
(ПИ №ФС77-42691 от 16.11.10).

ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

Префикс DOI:10.21869

Сайт журнала: <https://science.swsu.ru>

© Юго-Западный государственный университет, 2021



Материалы журнала доступны
под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Типография:

Полиграфический центр
Юго-Западного государственного
университета, 305040, г.Курск,
ул. 50 лет Октября, д. 94

Подписка и распространение:

журнал распространяется
по подписке.

Подписной индекс журнала 41219
в объединенном каталоге
«Пресса России».

Периодичность: четыре выпуска в год

Свободная цена

Оригинал-макет подготовлен Е.В. Мельник

Подписано в печать 24.08.2021.

Дата выхода в свет 30.08.2021. Формат 60x84/8.

Бумага офсетная. Усл.печ.л. 16.2.

Тираж 1000 экз. Заказ 41.

16+

Proceedings of the Southwest State University



Peer-reviewed scientific journal

Published since 1997

Before 2011

“Proceedings of the Kursk State Technical University”

These Proceedings present the results of scientific fundamental and applied research in such areas as mechanical technologies and equipment; machine building; physical and engineering processing of materials; welding; robotics, mechatronics and robot systems, management and administration of social and economic systems; information protection methods and systems; information security; production process automation and control; building structures; heat supply; ventilation; gas supply and lightning systems; construction mechanisms and machines.

The journal publishes scientific articles, critical reviews, reports and discussions in the above mentioned areas.

All papers are published free of charge.

Target readers are scientists, university professors and teachers, experts, young scholars, graduate and post-graduate students, stakeholders and interested public.

The Editorial Board of the journal pursues open access policy. Complete articles are available at the journal web-site and at eLIBRARY.RU.

The journal is included into the Register of the Top Scientific Journals of the Higher Attestation Commission of the Russian Federation as a journal recommended for the publication of the findings made by the scientists working on a doctoral or candidate thesis in the following areas:

Mechanical engineering and machine science: 05.02.05; 05.02.07; 05.02.10.

Construction: 05.23.01; 05.23.03; 05.23.17.

Computer science, computer engineering and control: 05.13.01; 05.13.05; 05.13.06; 05.13.10; 05.13.18; 05.13.19.

EDITOR-IN-CHIEF

Sergei G. Emelianov, Dr. of Sci. (Engineering), Correspondent Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, a Holder of the Russian Government Prize in the Field of Science and Engineering, Rector of the Southwest State University (Kursk, Russia)

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

Vladimir V. Bredikhin, Dr. of Sci. (Economic), Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia)

EDITORIAL BOARD

Yevgenii V. Ageev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Yurii V. Alekseev, Dr. of Sci. (Architecture), Professor, Moscow State National Research University of Civil Engineering (Moscow, Russia);

Maksim V. Bobyr, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Thomas Bock, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Technical University of Munich (Munich, Germany);

Lino Bianco, Dr. of Sci. (Philosophy), Professor of IAA, Visiting Professor at University of Architecture, Civil Eng. and Geodesy (Sofia), Senior Lecturer, University of Malta (Malta);

Sergey V. Degtyarev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Lyubomir V. Dimitrov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Technical University of Sofia (Sofia, Bulgaria);

Zhanybaj T. Zhusubaliyev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Vitalii I. Kolchunov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Academician of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Southwest State University (Kursk, Russia);

Sergey N. Kuznetsov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia);

Vadim V. Kuts, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Danijel Kukaras, Associate Professor, PhD, University of Novi Sad, Faculty of Civil Engineering (Subotica, Serbia);

Grigorii Ya. Panovko, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Mechanical Engineering Research Institute
of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia);

Alexander S. Sizov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor,
Southwest State University (Kursk, Russia);

Igor M. Smirnov, Dr. of Sci. (Engineering),
Associate Professor, JSC "Research engineering
Institute» (Balashikha, Russia);

Olga A. Sotnikova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor,
Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia);

Vitalii S. Titov, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Andrey V. Turkov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor,
Orel State University named after I.S. Turgenev (Orel, Russia);

Vladimir I. Shcherbakov, Dr. of Sci. (Engineering),
Associate Professor, Voronezh State Technical University
(Voronezh, Russia);

Sergey F. Yatsun, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Southwest State University (Kursk, Russia)

EDITORIAL COUNCIL

Sergei G. Emelianov, Chairman, Dr. of Sci. (Engineering),
Correspondent Member of the Russian Academy
of Architecture and Construction Sciences, a Holder
of the Russian Government Prize in the Field of Science
and Engineering, Rector of the Southwest State
University (Kursk, Russia)

Torsten Bertram, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Institute of Control Theory and System Design,
Technical University of Dortmund (Dortmund, Germany);

Sergey Yu. Gridnev, Dr. of Sci. (Engineering),
Associate Professor, Voronezh State Technical
University (Voronezh, Russia);

Vladimir S. Ezhov, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Igor V. Zotov, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Alexander G. Ivakhnenko, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Valerii I. Kolmykov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor,
Southwest State University (Kursk, Russia);

Vladimir I. Kolchunov, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Russian Academy of Architecture
and Construction Sciences Advisor, Southwest State
University (Kursk, Russia);

Nikolay A. Korenevskii, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Rashit A. Latypov, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Moscow Polytechnic University (Moscow, Russia);

Oksana G. Loktionova, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Shah R., Dr. of Sci. (Engineering), Professor,
Technical University of Dresden (Dresden, Germany)

Founder and Publisher:
"Southwest State University"

Official address of the Founder, Publisher and Editorial Office:

50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

Phone: +7 (4712) 22-25-26,

Fax: +7 (4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

The Journal is officially registered by:

The Federal Supervising Authority in the Field of Communication,
Information Technology and Mass media
(ПИ №ФС77-42691 of 16.11.10).

ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

DOI Prefix:10.21869

Web-site: <https://science.swsu.ru>

Printing office:

Printing Center

of the Southwest State University,

50 Let Oktyabrya str. 94,

Kursk 305040, Russian Federation

Subscription and distribution:

the journal is distributed by subscription.

Subscription index 41219

in the General Catalogue "Pressa Rossii"

Publication frequency: quarterly

Free price

Original lay-out design: E. Mel'nik

16+

© Southwest State University, 2021



Publications are available in accordance with
the Creative Commons Attribution 4.0 License

Singed to print 24.08.2021.

Release date 30.08.2021. Format 60x84/8.

Offset paper. Printer's sheets 16.2.

Circulation 1000 copies. Order 41.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Консервационные смазки и масла, применяемые для защиты изделий техники	8
<i>Лаврушин А. В., Стариков Н. Е., Науменко И. С., Кутепов С. Н., Гвоздев А. Е., Агеев Е. В.</i>	

СТРОИТЕЛЬСТВО

Свалочный газ как альтернативный источник энергии	23
<i>Рамазанов Р.С.</i>	
Моделирование деформаций предварительно напряженных стальных ферм при аварийных ситуациях	35
<i>Серпик И. Н., Тарасова Н. В.</i>	

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Рекурсивный алгоритм формирования структурированных множеств информационных блоков для повышения скорости выполнения процедур определения их источника	51
<i>Таныгин М. О., Алшааи Х. Я. А., Добрица В. П., Добросердов О. Г.</i>	
Математическая модель определения состава бинарных отношений и алгоритм умножения бинарных матриц	65
<i>Гвоздева С.Н.</i>	
О двухчастотных колебаниях электропривода постоянного тока с импульсным управлением	83
<i>Яночкина О.О.</i>	
Композиция моделей классификации для распознавания скорости течения жидкостей в капиллярах	93
<i>Корнаева Е. П., Стебаков И. Н., Ставцев Д. Д., Дремин В. В., Корнаев А. В.</i>	
Особенности поддержки принятия управленческих решений в системе управления логистическими потоками транспортно-складского комплекса	107
<i>Аверченков А. В., Аверченкова Е. Э., Ковалев В. В.</i>	
Разработка нейронной модели полупроводникового датчика газа	123
<i>Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Андреев К. Г., Поляков Н. В.</i>	

CONTENT

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original articles

Preservative Lubricants and Oils Used to Protect Equipment Products.....	8
<i>Lavrushin A. V., Starikov N. E., Naumenko I. S., Kutevov S. N., Gvozdev A. Y., Ageev E. V.</i>	

CONSTRUCTION

Original articles

Landfill Gas as an Alternative Energy Source	23
<i>Ramazanov R. S.</i>	
Simulation of Deformations of Pre-Stressed Steel Trusses in Emergency Situations.....	35
<i>Serpik I. N., Tarasova N. V.</i>	

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Original articles

Recursive Algorithm for Forming Structured Sets of Information Blocks to Increase the Speed of Their Source Determination Procedures	51
<i>Tanygin M. O., Alshaea H. Y. A., Dobritsa V. P., Dobroserdov O. G.</i>	
A Mathematical Model for Determining the Composition of Binary Relations and an Algorithm for Binary Matrices Multiplication	65
<i>Gvozdeva S. N.</i>	
On Two-Frequency Oscillations of a DC Electric Drive with Pulse Control.....	83
<i>Yanochkina O. O.</i>	
Composition of Classification Models for Recognizing the Flow Velocity of Liquids in Capillaries.....	93
<i>Kornaeva E. P., Stebakov I. N., Stavtsev D. D., Dremine V. V., Kornaev A. V.</i>	
Characteristic Features of Support for Making Managerial Decisions in the Management System of Logistics Flows of Transportation and Storage Complex	107
<i>Kovalev V. V., Averchenkov A. V., Averchenkova E. E.</i>	
Development of a Neural Model of a Semiconductor Gas Sensor.....	123
<i>Bondar O. G., Brezhneva E. O., Andreev K. G., Polyakov N. V.</i>	

Консервационные смазки и масла, применяемые для защиты изделий техники

А. В. Лаврушин¹, Н. Е. Стариков², И. С. Науменко³, С. Н. Кутепов⁴,
А. Е. Гвоздев⁴, Е. В. Агеев⁵ ✉

¹ Рязанское высшее воздушно-десантное командное училище имени генерала армии В.Ф. Маргелова
пл. генерала армии В.Ф. Маргелова 1, г. Рязань 390031, Российская Федерация

² Тульский государственный университет
пр. Ленина 92, г. Тула 300026, Российская Федерация

³ Министерство обороны РФ
Фрунзенская наб. 22/2, г. Москва 119160, Российская Федерация

⁴ Тульский государственный педагогический университет имени Л.Н. Толстого
пр. Ленина 125, г. Тула 300026, Российская Федерация

⁵ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Анализ средств консервации для защиты изделий техники для определения направления для модификации консервационных материалов.

Методы. Для достижения поставленной цели применялся обзор современной научно-технической литературы в данной области. Для поддержания хранящихся изделий в работоспособном состоянии, в готовности к использованию по назначению применяется метод консервации с использованием смазочных материалов. Смазочные материалы различного назначения принято подразделять на смазки, масла и специальные жидкости.

Результаты. Применяемые в настоящее время средства консервации не только не обеспечивают в полной мере надежной защиты материалов изделий, но в большинстве случаев сами являются источниками питания для микроорганизмов, провоцируя развитие микробиологических и коррозионных повреждений. Одним из новых направлений при модификации консервационных материалов является использование альтернативных источников для модификации на основе материалов растительного происхождения (эфирные масла). Проведенный анализ свидетельствует о том, что многие из предусмотренных средств консервации по объективным причинам не производятся, а использование других средств зачастую оказывается малоэффективным. Решение этой проблемы связано с применением эфирных масел для модификации существующих консервационных материалов, которые должны повысить их защитные свойства от воздействия микроорганизмов-биодеструкторов, и как следствие, создать эффективную защиту от процессов коррозии и биологических повреждений.

Заключение. Представленные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих процессов обработки, фрикционного взаимодействия, хранения и консервации металлических систем с учетом условий эксплуатации конкретной детали для различных погодных условий.

Ключевые слова: изделия техники; метод консервации; хранение; консервационные материалы; эфирные масла.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Консервационные смазки и масла, применяемые для защиты изделий техники / А. В. Лаврушин, Н. Е. Стариков, И. С. Науменко, С. Н. Кутепов, А. Е. Гвоздев, Е. В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(2): 8-22. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-2-8-22>.

Поступила в редакцию 15.04.2021

Подписана в печать 01.06.2021

Опубликована 24.08.2021

Preservative Lubricants and Oils Used to Protect Equipment Products

Alexei V. Lavrushin ¹, Nikolai E. Starikov ², Igior S. Naumenko ³,
Sergei N. Kutepov ⁴, Alexander Y. Gvozdev ⁴, Evgeny V. Ageev ⁵ ✉

¹ Ryazan Higher Airborne Command School named after General of the Army V. F. Margelov,
1 General of the Army V. F. Margelov Square, Ryazan 390031, Russian Federation

² Tula State University
92 Lenin Ave., Tula 30026, Russian Federation

³ Ministry of Defense of the Russian Federation
22/2 Frunzenskaya nab., Moscow 119160, Russian Federation

⁴ Tula State Pedagogical University named after L. N. Tolstoy
125 Lenin Ave., Tula 300026, Russian Federation

⁵ Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Abstract

Purpose of research. Analysis of preservation agents for the protection of technical products to determine the direction for the modification of preservation materials.

Methods. To achieve this goal, we have reviewed the modern scientific and technical literature in this area.

The conservation method using lubricants is used to maintain the stored products in working order and use them as intended. Lubricants for various purposes are usually subdivided into lubricants, oils and specialty liquids.

Results. The currently used preservatives not only fails to provide reliable protection of the materials of products, but in most cases they themselves are power sources for microorganisms, provoking the development of microbiological and corrosive damage. One of the new directions in the modification of preservation materials is the use of alternative sources for modification based on plant origin materials (essential oils). The conducted analysis shows that many of the foreseen means of conservation are not produced for objective reasons, and the use of other means is often ineffective. The solution to this problem is associated with the use of essential oils for modifying existing preservation materials. which should increase their protective properties against the effects of biodegradable microorganisms, and, as a result, create effective protection against corrosion and biological damage.

Conclusion. *The presented results can be used to create resource-saving processing processes, frictional interaction, storage and preservation of metal systems, taking into account the operating conditions of a particular part for various weather conditions.*

Keywords: *technical products; conservation method; storage; preservation materials; essential oils.*

Conflict of interest. *The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Lavrushin A. V., Starikov N. E., Naumenko I. S., Kutepov S. N., Gvozdev A. Y., Ageev E. V. Preservative Lubricants and Oils Used to Protect Equipment Products. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(2): 8-22 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-2-8-22>.

Received 15.04.2021

Accepted 01.06.2021

Published 24.08.2021

Введение

Одним из важных путей обеспечения работоспособного состояния хранящихся изделий техники является совершенствование системы их защиты от внешних воздействующих факторов (ВВФ).

Сведения о существующих средствах и методах защиты обобщены в ряде работ Герасименко А.А., Виноградова П.А., Зарубиной Л.П., Козлова В.А., Мальцевой Г.Н. [1, 2, 3, 4, 5]. Наиболее эффективная защита от ВВФ, обуславливающих развитие процессов коррозии и биоповреждений, достигается при использовании рационального сочетания различных мероприятий, охватывающих все этапы жизненного цикла изделий (проектирование, производство и эксплуатацию, включая хранение).

Из работы Герасименко А.А. известно [3], что эффективность защиты изделий техники может быть повышена несколькими способами: применение более стойких к коррозии и биоповреждениям материалов и покрытий; хранение изделий в замкнутых (герметичных) объемах с регулируемым составом ат-

мосферы [6, 7] – в среде с повышенным содержанием сухого азота и пониженным – кислорода, или осушенного воздуха. Осушка воздуха может осуществляться методом статического осушения, для чего в объем вводят рассчитанное количество силикагеля. При этом происходит резкое (до 30 %) снижение относительной влажности воздуха, которое затем, по мере диффузии влаги в объеме и исчерпания сорбционной емкости осушителя, будет возрастать. Поэтому необходим периодический контроль за обводненностью силикагеля и его замена при необходимости.

Может использоваться также метод динамического осушения воздуха, заключающийся в изоляции защищаемого объекта (образца вооружения) от атмосферного воздуха и поддержания в изолированной емкости пониженной относительной влажности за счет периодической циркуляции заключенного в этой емкости воздуха через осушивающие средства (адсорберы) или продувки через гермоукупорку сухого воздуха; использование эффективных средств дополнительной защиты изделий от воз-

действия внешних факторов окружающей среды.

Первый способ можно применить только при изготовлении изделий техники, при этом резко возрастает их стоимость.

Использование атмосфер с регулируемым составом резко повышает стоимость хранения, в том числе за счет сооружения герметизированных объемов. Так как на хранении находится очень большое количество изделий, имеющих относительно невысокую стоимость, применение этого метода экономически нецелесообразно.

Цель настоящей работы – анализ средств консервации для защиты изделий техники и определение направления для модификации консервационных материалов.

Методы исследования

Для достижения поставленной цели применялся обзор современной научно-технической литературы в данной области.

Для поддержания хранящихся изделий в работоспособном состоянии, в готовности к использованию по назначению, используется метод консервации с использованием смазочных материалов. Смазочные материалы различного назначения принято подразделять на смазки, масла и специальные жидкости.

Результаты и их обсуждение

Для консервации изделий, в основном, применяют консервационные (защитные) пластичные смазки, которые

по назначению подразделяются [8] на три основные группы: антифрикционные, защитные и уплотнительные.

Антифрикционные смазки предназначены для снижения изнашивания и трения в механизмах, для герметизации и защиты от коррозии узлов трения изделий. К основным антифрикционным смазкам относятся: литол-24, солидол С, ЦИАТИМ-201, ГОИ-54п, МС-70.

Кроме пластичных различают жидкие консервационные смазки¹ [9], номенклатура которых весьма ограничена.

В настоящее время, согласно ограничительному перечню на топлива, масла, смазки и специальные жидкости² [10] консервационные масла, допускаемые к производству и применению для изделий техники в качестве основных, дублирующих и резервных масел, представлены в табл. 1.

Консервационное масло К-17 предназначено для временной противокоррозионной защиты наружных и внутренних поверхностей изделий из черных и цветных металлов (кроме внутренних поверхностей летательных аппаратов), хранящихся в условиях без непосредственного воздействия атмосферных факторов. В виде 30%-ного раствора в дизельном топливе допуска-

¹ ГОСТ В 18241-85. Масла, смазки, специальные жидкости для военной техники. Ограничительный перечень и порядок назначения. М., 1985. 100 с.

² ГОСТ РВ 50920-2005. Топлива, масла, смазки и специальные жидкости. Ограничительный перечень и порядок назначения для вооружения и военной техники. М., 2005.

ется для временной консервации внутренних поверхностей (не имеющих антикоррозионных покрытий) технических средств службы горючего. Представляет собой смесь масел индустриального И-12 (или трансформаторного Т-1500У) и

авиационного МС-20с с добавлением петролатума окисленного, каучука СКБ-45 и присадки на базе сульфоната кальция. Рекомендуются для консервации наружных и внутренних поверхностей систем, агрегатов, узлов и деталей.

Таблица 1. Консервационные масла и ингибиторы коррозии

Table 1. Preservative oils and corrosion inhibitors

Марка консервационных материалов / Brand of conservation materials		Применение основной марки для изделий техники / Application of the main brand for engineering products		
основная / main	дублирующие и резервные / backup and backup	наземная / ground	авиационная / aviation	морская / marine
Масло К-17 по ГОСТ 10877	НГ-203Р по ТУ 38.1011273; Моторные и другие масла на нефтяной основе с 15-25 % АКОР-1	+	+	+
Масло КРМ по ТУ 38.1011315	РЖ по ТУ 38.101135	+	+	+
Ингибитор коррозии АКОР-1 по ГОСТ 8313	Ингибитор коррозии Мифол по ТУ 0257-002-001148820	+	+	+

В зависимости от условий хранения, конструктивных особенностей и вариантов упаковки объектов консервации обеспечивает их защиту от коррозии от 1 года до 10 лет и ввод изделий техники в эксплуатацию без расконсервации.

Производство консервационного масла К-17 ранее было организовано ПО «Пермнефтеоргсинтез» и Оренбургским ОПНМЗ. В его состав входил окисленный петролатум, изготавливаемый Гроз-

ненским НПЗ на основе петролатума селективной очистки или изготавливаемый Оренбургским ОПНМЗ на основе петролатума, получаемого на Бакинском НПЗ в результате сернокислотной очистки дистиллятов Сураханской нефти.

В настоящее время масло К-17 указанной рецептуры не производится в связи с отсутствием сырьевой базы.

Консервационное масло НГ-203Р (дублирующая марка) применяется для защиты наружных и внутренних по-

верхностей деталей машин и механизмов, как из черных, так и из цветных металлов. Изготавливают из смеси индустриального масла И-20А, концентрата сульфоната кальция (КСК), октадециламина, алкилфенола и окисленного петролатума. По назначению, области применения и защитной эффективности аналогично маслу К-17. Кроме того, может применяться как присадка к дизельным топливам для судовых двигателей (0,001 % на топливо). В настоящее время не производится.

Технология производства консервационного масла НГ-203Р была освоена на Оренбургском ОПНМЗ и Рязанском НПЗ. В настоящее время не производится.

Ружейное масло КРМ (основная марка) предназначено для смазки, очистки и защиты от атмосферной коррозии изделий во всех климатических зонах в качестве всесезонного рабоче-консервационного масла. Работоспособно при температурах окружающего воздуха от минус 50 °С до плюс 50 °С. Представляет собой смесь веретенного масла АУ либо гидравлического масла МГЕ-10А и высокоочищенной маловязкой масляной фракции с комплексом рабочих и защитных присадок. В сочетании с упаковочной бумагой обеспечивает хранение изделий более 10 лет и ввод их в эксплуатацию без расконсервации.

В настоящее время заводом-дублиром ООО «Квалитет-Авиа» (г. Москва) освоена технология производства масла

КРМ на основе полиальфаолефинового масла взамен масел АУ и МГЕ-10А.

Ружейное масло РЖ (дублирующая марка) предназначено для смазки, очистки и защиты изделий от атмосферной коррозии. Применяется при понижении температуры окружающего воздуха до минус 50 °С. Представляет собой смесь топлива Т-1 и индустриального масла И-20А с защитной присадкой МНИ-7 и вязкостной присадкой ВИНПОЛ ВБ-2. В сочетании с упаковочной бумагой обеспечивает хранение изделий до 10 лет и ввод их в эксплуатацию без расконсервации.

В настоящее время в связи с прекращением производства присадки МНИ-7 масло РЖ выпускается с присадкой АКОР-1. Производство ружейного масла РЖ организовано на предприятии ООО «Квалитет-Авиа».

Ингибитор коррозии АКОР-1 (основная марка) предназначен для улучшения защитных (консервационных) свойств смазочных минеральных масел различного назначения и топлив. Ингибитор коррозии АКОР-1 представляет собой нитрованное минеральное масло, нейтрализованное гидроокисью кальция в присутствии стеариновой кислоты.

Условия применения АКОР-1 устанавливаются в нормативно-технической документации по эксплуатации машин, механизмов и другого оборудования. Обычно АКОР-1 применяют в концентрации от 5 до 10 % для рабоче-консервационных масел или в концентрации от 15 до 25 % для консервационных масел.

В настоящее время АКОР-1 (ГОСТ 15171) является одним из наиболее распространенных ингибиторов коррозии и выпускается как товарный продукт предприятиями ООО «АНВЕК», г. Нижний Новгород; ООО «РУСМА», завод им. Шаумяна, Санкт-Петербург; ЗАО НПО «Промэкология», г. Омск. АКОР-1 входит в состав ружейного масла РЖ [9].

Ингибиторы коррозии Мифол-1 и Мифол-2 имеют одинаковую область применения, но различаются по составу. Обе марки ингибитора коррозии Мифол обладают высокими бактерицидными свойствами и стойкостью к микробиологическим поражениям за счет наличия в их составе фенольной смолы. Это позволяет рекомендовать их для консервации изделий, поставляемых в страны с тропическим климатом. Рекомендуются применять в концентрации от 8 до 10 %. Производство ингибитора коррозии Мифол организовано на заводе им. Шаумяна (г. Санкт-Петербург). Прогнозируемые сроки защиты смазочным маслом с ингибитором коррозии Мифол составляют в легких условиях – до 10 лет, в средних условиях – до 8 лет.

Из вышеперечисленного ассортимента консервационных материалов в настоящее время к применению для изделий допущены ружейные масла РЖ и КРМ.

Масла К-17, НГ-203Р, ингибитор коррозии Мифол к применению не допущены ввиду отсутствия отечественного производства компонентов, входящих

в их состав, и существенного изменения компонентного состава^{1,2}.

Применение консервационных материалов производится в соответствии с химмотологической картой (ХК) – это нормативный документ (НД), устанавливающий номенклатуру, массу (объем) ГСМ, а также сроки смены конкретных марок этой продукции в изделиях техники различного назначения. В ХК, кроме основной марки ГСМ, указываются дублирующие, резервные и зарубежные марки ГСМ, которые допускается применять в особых условиях или при отсутствии основной марки.

ХК является составной частью конструкторской документации на изделие техники. Порядок составления и согласования ХК устанавливает ГОСТ РВ 9100-2011³.

В соответствии с ХК для консервации некоторых изделий техники основной маркой является пластичная смазка ГОИ-54п, дублирующей – рабоче-консервационное масло РЖ.

Анализ ранее проведенных исследований Афолина И. З., Старикова Н.Е., Семенова С. А. [7, 10, 11, 12] показывает, что причиной возникновения неис-

¹ Отчет о НИР «Резерв-12». Люберцы: НИЦ ЦНИИ ВВС Минобороны России, 2015. 146 с. Инв. № 4148.

² Отчет о НИР «Резерв-15». Люберцы: НИЦ ЦНИИ ВВС Минобороны России, 2017. 146 с.

³ ГОСТ РВ 9100-001-2011. Топлива, масла, смазки, специальные жидкости и ингибированные пленкообразующие нефтяные составы. Химмотологическая карта для вооружения и военной техники. Порядок составления и согласования. М., 2011.

правностей материалов вооружения являются процессы коррозии и биоповреждений, вызванные воздействием факторов окружающей среды. Применяемые в настоящее время средства консервации не только не обеспечивают в полной мере надежной защиты материалов изделий, но в большинстве случаев сами являются источниками питания для микроорганизмов, провоцируя развитие микробиологических и коррозионных повреждений.

Одним из новых направлений при модификации консервационных материалов является использование альтернативных источников для модификации на основе материалов растительного происхождения (эфирные масла).

В настоящее время известно около 3000 наименований эфирных масел (ЭМ), из которых в медицинской, ветеринарной практике, пищевой и (косметической промышленности) широко используется около 300. ЭМ – жидкости от светло-желтого до коричневого цвета, почти нерастворимые в воде (0,05 %), но хорошо испаряющиеся даже при комнатной температуре, как правило, имеют приятный запах. Компонентами ЭМ являются эфиры, спирты, фенолы и циклические ароматические соединения.

Эфирные масла активны против бактерий, микоплазм, грибов, вирусов, простейших и паразитов, обладают противовоспалительными, антиоксидантными, антимутагенными свойствами, замедляют процессы старения, активируют регенерационные процессы в органах и тканях, активируют иммунную

систему, препятствуют образованию и росту злокачественных новообразований, снижают токсическое воздействие ксенобиотиков, ионизирующего излучения и др. ЭМ оптимизируют работу всех систем организма, проявляя свойства адаптогенов и улучшая качество жизни.

В работе Алинкиной Е. С.¹ говорится, что эфирные масла гвоздики, орегано или лимона при их систематическом приеме в небольших количествах действуют как биоантиоксиданты, то есть задерживают или ингибируют окисление в организме.

В работе Маркеловой Н. Н.² приводится, что эфирные масла (эвкалипта, цитраля и др.) проявляют высокую антимикробную активность и могут служить перспективным дополнением к антибактериальным средствам, целенаправленно воздействуя на антибиотикорезистентные грамотрицательные бактерии.

Источники сырья растительного происхождения и продукты на их основе находят широкое применение для противокоррозионной защиты металлов как в России, так и за рубежом. Консервационные материалы на базе источников растительного происхождения и продуктов их переработки относятся к биоразлагаемым и экологически чи-

¹ Алинкина Е. С. Антиоксидантные и антирадикальные свойства эфирных масел *in vivo* и *in vitro*: дис. ... канд. биол. наук. М., 2013. 148 с.

² Маркелова Н. Н. Полиантибиотикорезистентность некоторых грамотрицательных бактерий и возможность ее преодоления с помощью эфирных масел : дис. ... канд. биол. наук. М., 2016. 194 с.

стым веществам (Отчет о НИР «Резерв-15». Люберцы: НИЦ ЦНИИ ВВС Минобороны России, 2017. 146 с.). Представленные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих процессов обработки, фрикционного взаимодействия, хранения и консервации металлических систем с учетом рекомендаций работ [13-29].

Выводы

Проведенный анализ свидетельствует о том, что многие из предусмотр-

ренных средств консервации по объективным причинам не производятся, а использование других средств зачастую оказывается малоэффективным. Решение этой проблемы связано с применением эфирных масел для модификации существующих консервационных материалов, которые должны повысить их защитные свойства от воздействия микроорганизмов-биодеструкторов, и как следствие, создать эффективную защиту от процессов коррозии и биологических повреждений.

Список литературы

1. Герасименко А. А. Защита машин от биоповреждений. М.: Машиностроение, 1984. 111 с.
2. Зарубина Л. П. Защита зданий, сооружений, конструкций и оборудования от коррозии. Биологическая защита. Материалы, технологии, инструменты и оборудование. М.: «Инфра-Инженерия», 2015. 225 с.
3. Защита от коррозии, старения и биоповреждения машин, оборудования и сооружений: в 2 т. / под ред. А.А. Герасименко. М.: Машиностроение, 1987. Т. 1. 688 с., Т. 2. 784 с.
4. Козлов В. А., Месник М. О. Основы коррозии и защиты металлов. Иваново, 2011. 177 с.
5. Мальцева Г. Н. Коррозия и защита оборудования от коррозии. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2000. 211 с.
6. Переведенцев Ю. П. Гидрометеорологические основы охраны окружающей среды. Казань: Казан. гос. ун-т, 2004. 133 с.
7. Биоразрушение материалов и техники / С. А. Семенов, К. З. Гумаргалиева [и др.] // Вестник МИТХТ. 2007. Т. 2. № 6. С. 3–26.
8. Виноградов П.А. Консервация изделий машиностроения. Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1986. 270 с.
9. Тишина Е. А., Вижанков Е. М., Поплавский И. В. Организация производства ружейного масла РЖ // Труды 25 ГосНИИ МО РФ. 2016. Вып. 57. С. 267–270.
10. Афонин И. З. Защита вооружения от коррозии. Пенза: ВАИУ, 1984. 115 с.
11. Стариков Н.Е., Беляев В.Б. Защита металлов от коррозии. Тула: ТВАИУ, 1995. 31 с.

12. Стариков Н. Е., Гвоздев А. Е., Фомичева Н. Б. Микробная коррозия сталей в присутствии консервационных составов // Коррозия: материалы, защита. 2005. № 1. С. 37–40.

13. Комплексный подход к моделированию ресурсосберегающих процессов обработки и фрикционного взаимодействия металлических систем / А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, И.В. Минаев, А.Н. Сергеев, А.Д. Бреки, Д.В. Малий, А.А. Калинин, С.В. Сапожников, С.Н. Кутепов, Д.А. Провоторов.; под ред. д-ра техн. наук, проф. А.Е. Гвоздева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 232 с.

14. О состоянии предпревращения металлов и сплавов / О.В. Кузовлева, А.Е. Гвоздев, И.В. Тихонова, Н.Н. Сергеев, А.Д. Бреки, Н.Е. Стариков, А.Н. Сергеев, А.А. Калинин, Д.В. Малий, Ю.Е. Титова, С.Е. Александров, Н.А. Крылов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 245 с.

15. Моделирование процессов ресурсосберегающей обработки слитковых, порошковых, наноструктурных и композиционных материалов / М.Х. Шоршоров, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, О.В. Кузовлева, Е.М. Селедкин, Д.С. Клементьев, А.А. Калинин. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. 359 с.

16. Технология конструкционных, эксплуатационных и инструментальных материалов / А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Н.Н. Сергеев, В.И. Золотухин, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Д. Бреки.; под ред. проф. Н.Н. Сергеева. 2 изд. доп. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. 406 с.

17. Моделирование микропластичности и механического поведения пористых материалов / И.К. Архипов, В.И. Абрамова, А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, А.В. Панин // Деформация и разрушение материалов. 2021. № 1. С. 29-33.

18. Эффективные характеристики вязкоупругости металлических и полимерных композитов / И.К. Архипов, В.И. Абрамова, О.М. Губанов, А.Е. Гвоздев, С.Н. Кутепов // Технология металлов. 2020. № 10. С. 14-18.

19. Механизмы водородного растрескивания металлов и сплавов. Ч.I (обзор) / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Г. Колмаков, А.Е. Гвоздев // Материаловедение. 2018. № 3. С. 27-33.

20. Mechanism of the hydrogen cracking of metals and alloys, part II (review) / N.N. Sergeev, A.N. Sergeev, S.N. Kutepov, A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov // Inorganic Materials: Applied Research. 2019. Vol. 10. № 1. P. 32-41.

21. Физико-механические и коррозионные свойства металлических материалов, эксплуатируемых в агрессивных средах / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, М.В. Ушаков, В.В. Извольский. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. 553 с.

22. Структура и свойства коррозионностойких и износостойких биметаллических композиционных материалов / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Д.С. Клементьев. Тула: Изд-во ТулГУ, 2021. 120 с.

23. Принятие решений по статистическим моделям в управлении качеством продукции / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, С.В. Сапожников, С.Н. Кутепов, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017; Т. 21, № 5(74). С. 78-92. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2017-21-5-78-92>.

24. Диффузия водорода в сварных соединениях конструкционных сталей / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 6(75). С. 85-95. . <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2017-21-6-85-95>

25. Проведение рентгеноспектрального микроанализа твердосплавных электроэрозионных порошков / Е.В. Агеев, Г.Р. Латыпова, А.А. Давыдов, Е.В. Агеева // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 5-2 (44). С. 99-102.

26. Оценка эффективности применения твердосплавных электроэрозионных порошков в качестве электродного материала / Е.В. Агеев, Г.Р. Латыпова, А.А. Давыдов, Е.В. Агеева // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2012. № 1. С. 19-22.

27. Порошки, полученные электроэрозионным диспергированием отходов твердых сплавов - перспективный материал для восстановления деталей автотракторной техники / Е.В. Агеев, В.Н. Гадалов, Е.В. Агеева, Р.В. Бобрышев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 1-1 (40). С. 182-189.

28. Исследование химического состава порошков, полученных электроэрозионным диспергированием твердого сплава / Е.В. Агеев, Б.А. Семенихин, Е.В. Агеева, Р.А. Латыпов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. №5 (38). С. 138-144.

29. Получение твердосплавных изделий холодным изостатическим прессованием электроэрозионных порошков и их исследование / Е.В. Агеева, Р.А. Латыпов, П.И. Бурлак, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. № 5 (50). С. 116-125.

References

1. Gerasimenko A. A. *Zashchita mashin ot biopovrezhdenii* [Protection of machines from biological damage]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 111 p. (In Russ.).

2. Zarubina L. P. *Zashchita zdaniy, sooruzhenii, konstruktsii i oborudovaniya ot korrozii. Biologicheskaya zashchita. Materialy, tekhnologii, instrumenty i oborudovanie* [Protection of buildings, structures, structures and equipment from corrosion. Biological protection Materials, technologies, tools and equipment]. Moscow, Infra-Engineering Publ., 2015. 225 p. (In Russ.).

3. Gerasimenko A. A. *Zashchita ot korrozii, stareniya i biopovrezhdeniya mashin, oborudovaniya i sooruzhenii* [Protection from corrosion, aging and bio-damage of machinery, equipment and structures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987, vol. 1, 688 p., vol. 2, 784 p. (In Russ.).
4. Kozlov V. A., Mesnik M. O. *Osnovy korrozii i zashchity metallov* [Fundamentals of corrosion and protection of metals]. Ivanovo, 2011. 177 p. (In Russ.).
5. Maltseva G. N. *Korroziya i zashchita oborudovaniya ot korrozii* [Corrosion and protection of equipment from corrosion]. Penza, 2000. 211 p. (In Russ.).
6. Perevedentsev Yu. P. *Gidrometeorologicheskie osnovy okhrany okruzhayushchei sredy* [Hydrometeorological bases of environmental protection]. Kazan, Kazan State University Publ., 2004. 133 p. (In Russ.).
7. Semenov S. A., Gumargalieva K. Z. [et al.]. Biorazrushenie materialov i ki [Biodegradation of materials and equipment]. *Vestnik MITHT*, 2007, vol. 2, no. 6, pp. 3-26 (In Russ.).
8. Vinogradov P. A. *Konservatsiya izdelii mashinostroeniya* [Conservation of mechanical engineering products]. Leningrad, Mashinostroenie, Leningradskoe otdelenie Publ., 1986. 270 p.
9. Tishina E. A., Vizhankov E. M., Poplavsky I. V. Organizatsiya proizvodstva ruzheinogo masla RZh [Organization of the production of gun oil RJ]. *Trudy 25 GosNII MO RF = Proceedings of the 25th state research Institute of the defense Ministry*, 2016, vol. 57, pp. 267-270 (In Russ.).
10. Afonin I. Z. *Zashchita vooruzheniya ot korrozii* [Protection of weapons from corrosion]. Penza, VAIU Publ., 1984. 115 p. (In Russ.).
11. Starikov N. E., Belyaev V. B. *Zashchita metallov ot korrozii* [Protection of metals from corrosion]. Tula, TVAAIU Publ., 1995. 31 p. (In Russ.).
12. Starikov N. E., Gvozdev A. E., Fomicheva N. B. Mikrobnaya korroziya stalei v prisutstvii konservatsionnykh sostavov [Microbial corrosion of steels in the presence of conservation compositions]. *Korroziya: materialy, zashchita = Corrosion: Materials, Protection*, 2005, no. 1, pp. 37-40 (In Russ.).
13. Gvozdev A. E., Sergeev N. N., Minaev I. V., Sergeev A. N., Breki A.D., Maliy D. V., Kalinin A. A., Sapozhnikov S. V., Kutepov S. N., Provotorov D. A. *Kompleksnyi podkhod k modelirovaniyu resursosberegayushchikh protsessov obrabotki i friktsionnogo vzaimodeistviya metallicheskih sistem* [Complex approach to modeling of resource-saving processes of processing and frictional interaction of metal systems]. Tula, TulSU Publ., 2017. 232 p. (In Russ.).
14. Kuzovleva O. V., Gvozdev A. E., Tikhonova I. V., Sergeev N. N., Breki A.D., Starikov N. E., Sergeev A. N., Kalinin A. A., Maliy D. V., Titova Yu.E., Alexandrov S. E.,

Krylov N. A. *O sostoyanii predprevrashcheniya metallov i splavov* [On the state of pre-conversion of metals and alloys]. Tula, TulSU Publ., 2016. 245 p. (In Russ.).

15. Shorshorov M. H., Gvozdev A. E., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Kuzovleva O. V., Seledkin E. M., Klementyev D. S., Kalinin A. A. *Modelirovanie protsessov resursos-beregayushchei obrabotki slitkovykh, poroshkovykh, nanostrukturnykh i kompozitsionnykh materialov* [Modeling of processes of resource-saving processing of ingot, powder, nanostructured and composite materials]. Tula, TulSU Publ., 2018. 359 p. (In Russ.).

16. Gvozdev A. E., Starikov N. E., Sergeev N. N., Zolotukhin V. I., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Breki A.D. *Tekhnologiya konstruksionnykh, ekspluatatsionnykh i instrumental'nykh materialov* [Technology of structural, operational and instrumental materials]. Tula, TulSU Publ., 2018. 406 p. (In Russ.).

17. Arkhipov I. K., Abramova V. I., Gvozdev A. E., Kolmakov A. G., Panin A.V. *Modelirovanie mikroplastichnosti i mekhanicheskogo povedeniya poristykh materialov* [Modeling of microplasticity and mechanical behavior of porous materials]. *Deformatsiya i razrushenie materialov = Deformation and Destruction of Materials*, 2021, no. 1, pp. 29-33 (In Russ.).

18. Arkhipov I. K., Abramova V. I., Gubanov O. M., Gvozdev A. E., Kutepov S. N. *Effektivnye kharakteristiki vyazkouprugosti metallicheskih i polimernykh kompozitov* [Effective characteristics of viscoelasticity of metal and polymer composites]. *Tekhnologiya metallov = Technology of Metals*, 2020, no. 10, p. 14-18 (In Russ.).

19. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Kolmakov A. G., Gvozdev A. E. *Mekhanizmy vodorodnogo rastreskivaniya metallov i splavov* [Mechanisms of hydrogen cracking of metals and alloys]. Ch. I (review). *Materialovedenie = Materials Science*, 2018, no. 3, pp. 27-33 (In Russ.).

20. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Kolmakov A. G. *Mechanism of the hydrogen cracking of metals and alloys, part II (review)*. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 32-41 (In Russ.).

21. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Ushakov M. V., Izvolsky V. V. *Fiziko-mekhanicheskie i korrozionnye svoistva metallicheskih materialov, ekspluatiruemykh v agressivnykh sredakh* [Physico-mechanical and corrosion properties of metallic materials operating in aggressive environments]. Tula, TulSU Publ., 2019. 553 p. (In Russ.).

22. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Klementyev D. S. *Struktura i svoistva korrozionnostoikikh i iznosostoikikh bimetallicheskih kompozitsionnykh materialov* [Structure and properties of corrosion-resistant and wear-resistant bimetallic composite materials]. Tula, TulSU Publ., 2021. 120 p. (In Russ.).

23. Zhuravlev G. M., Gvozdev A. E., Sapozhnikov S. V., Kutepov S. N., Ageev E. V. *Prinyatie reshenii po statisticheskim modelyam v upravlenii kachestvom produktsii* [Decision-making based on statistical models in quality management].

sions on statistical models in quality control of products]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2017, vol. 21, no. 5 (74), pp. 78-92 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2017-21-5-78-92>.

24. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Ageev E. V. Diffuziya vodoroda v svarnykh soedineniyakh konstruktsionnykh stalei [Diffusion of Hydrogen In Welded Joints of Structural Steels]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2017, vol. 21, no. 6 (75), pp. 85-95 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2017-21-6-85-95>

25. Ageev E. V., Latypova G. R., Davydov A. A., Ageeva E. V. Provedenie rentgeno-spektral'nogo mikroanaliza tverdosplavnykh elektroerozionnykh poroshkov [Conducting X-ray spectral microanalysis of hard-alloy electroerosive powders]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 5-2 (44), pp. 099-102 (In Russ.).

26. Ageev E. V., Latypova G. R., Davydov A. A., Ageeva E. V. Otsenka effektivnosti primeneniya tverdosplavnykh elektroerozionnykh poroshkov v kachestve elektrodno materiala [Evaluation of the effectiveness of the use of hard-alloy electroerosive powders as an electrode material]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2012, no. 1, pp. 19-22 (In Russ.).

27. Ageev E. V., Gadlov V. N., Ageeva E. V., Bobryshev R. V. Poroshki, poluchennye elektroerozionnym dispergirovaniem otkhodov tverdykh splavov - perspektivnyi material dlya vosstanovleniya detalei avtotraktornoj tekhniki [Powders obtained by electroerosive dispersion of solid alloy waste-a promising material for restoring parts of automotive equipment]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 1-1 (40), pp. 182-189 (In Russ.).

28. Ageev E. V., Semenikhin B. A., Ageeva E. V., Latypov R. A. Issledovanie khimicheskogo sostava poroshkov, poluchennykh elektroerozionnym dispergirovaniem tverdogo splava [A study of the chemical composition of powders obtained by electroerosive dispersion of a hard alloy]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2011, no. 5-1 (38), pp. 138-144 (In Russ.).

29. Ageeva E. V., Latypov R. A., Burak P. I., Ageev E. V. Poluchenie tverdosplavnykh izdelii kholodnym izostaticheskim pressovaniem elektroerozionnykh poroshkov i ikh issledovanie [Obtaining hard-alloy products by cold isostatic pressing of electroerosive powders and their research]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2013, no. 5 (50), pp. 116-125 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Лаврушин Алексей Валентинович, кандидат технических наук, доцент кафедры вооружения и стрельбы, Рязанское высшее воздушно-десантное командное училище имени генерала армии В.Ф. Маргелова, г. Рязань, Российская Федерация, e-mail: lavruchin.78@mail.ru, ORCID: <http://0000-0002-9292-1813>

Alexei V. Lavrushin, Cand. of Sci. (Engineering), Professor, Associate Professor, Armament and Shooting Department, Ryazan Higher Airborne Command School named after General of the Army V. F. Margelov, Ryazan, Russian Federation, e-mail: lavruchin.78@mail.ru, ORCID: <http://0000-0002-9292-1813>

Стариков Николай Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, начальник военно-научного центра, Тульский государственный университет, г. Тула, Российская Федерация, e-mail: starikov_tai@mail.ru, ORCID: <http://0000-0002-9292-1813>

Nikolai E. Starikov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Military Research Center, Tula State University, Tula, Russian Federation, e-mail: starikovtai@mail.ru, ORCID: <http://0000-0002-9292-1813>

Науменко Игорь Семенович, военнослужащий, Министерство обороны РФ, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: starikov_tai@mail.ru

Igor S. Naumenko, Serviceman of the Defense Ministry of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation, e-mail: starikov_tai@mail.ru

Кутепов Сергей Николаевич, кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, г. Тула, Российская Федерация, e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Sergei N. Kutepov, Cand. of Sci. (Pedagogical), Associate Professor, Technology and Service Department, Tula State Pedagogical University named after L. N. Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Гвоздев Александр Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, г. Тула, Российская Федерация, e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru, ORCID: <http://0000-0002-9292-1813>

Alexander A.Y. Gvozdev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Chief Researcher, Tolstoy Tula State Pedagogical University, Tula, Russian Federation, e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru, ORCID: <http://0000-0002-9292-1813>

Агеев Евгений Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии материалов и транспорта Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ageev_ev@mail.ru, ORCID: <http://0000-0002-3862-8624>

Evgeny V. Ageev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Materials Technology and Transport Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ageev_ev@mail.ru, ORCID: <http://0000-0002-3862-8624>

Свалочный газ как альтернативный источник энергии

Р.С. Рамазанов ¹

¹ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
ул. Костюкова 4, г. Белгород 308012, Российская Федерация

✉ e-mail: boss.rafshan@mail.ru

Резюме

Цель исследования. С ростом численности населения Земли, увеличением числа мегаполисов растёт потребление различных товаров, отходы которых со временем превращаются в мусор. Растущее с каждым годом количество всевозможных отходов и их негативное воздействие на окружающую среду является проблемой мирового масштаба. Однако при всех существующих способах утилизации отходов в нашей стране применяется наименее экологичный способ утилизации отходов – утилизация по средствам захоронения на полигонах ТБО, ТКО. Полигоны ТБО, ТКО являются источником свалочного газа неконтролируемые выбросы которого оказывают негативное влияние на экологию. При этом свойства свалочного газа позволяют использовать его в качестве источника энергии. Проведённый анализ проблем показал актуальность направления использования свалочного газа как альтернативного вида газового топлива, а также разработки устройств для его эффективного сжигания.

Методы. В статье рассмотрено влияние, оказываемое на биосферу Земли свалками твёрдых бытовых отходов (ТБО). Проведён анализ мировой проблемы утилизации отходов, рассмотрены пути решения. На основе методики, указанной в ГОСТ 33998-2016 «Приборы газовые бытовые для приготовления пищи. Общие технические требования, методы испытаний и рациональное использование энергии» проведено исследование эффективности процесса сжигания свалочного газа в разработанной конструкции газогорелочного устройства, оснащённого тепловым рассекателем.

Результаты. На основании экспериментальных исследований для газогорелочного устройства разработанной конструкции получены значения КПД, % горелки и содержание угарного газа (CO, мг/м³) в продуктах сгорания в зависимости от длины теплового рассекателя.

Заключение. Результаты экспериментальных исследований показали высокую эффективность оригинального газогорелочного устройства при сжигании свалочного газа.

Ключевые слова: полигон ТБО; утилизация отходов; свалочный газ; сжигание; газовая горелка.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Рамазанов Р.С. Свалочный газ как альтернативный источник энергии // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(2): 23-34. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-2-23-34>.

Поступила в редакцию 15.03.2021

Подписана в печать 28.04.2021

Опубликована 24.08.2021

Landfill Gas as an Alternative Energy Source

Rafshan S. Ramazanov¹

¹ Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova
4 Kostyukova str., Belgorod 308012, Russian Federation

✉ e-mail: boss.rafshan@mail.ru

Abstract

Purpose of research. With the increase of population and number of megacities, the consumption of various goods increases and the waste of which eventually turns into garbage. The growing amount of all kinds of waste every year and their negative impact on the environment is a global problem. However, with all existing methods of waste disposal, the least environmentally friendly method of waste disposal is used in our country - disposal by means of burial ground disposal at solid waste landfills. Landfills of solid waste are a source of landfill gas, the uncontrolled emissions of which have a negative impact on the environment. At the same time, the properties of landfill gas make it possible to use it as an energy source. The analysis of the problems pфmy showm the relevance of the direction of using landfill gas as an alternative type of gas fuel, as well as the development of devices for its efficient combustion.

Methods. The article discusses the impact of solid domestic waste (MSW) on the Earth's biosphere. The analysis of the global problem of waste disposal is carried out, solutions are considered. Based on the methodology specified in GOST 33998-2016 "Gas household appliances for cooking. General technical requirements, test methods and rational use of energy", we have carried out a study of the efficiency of the landfill gas combustion process in the developed design of a gas burner device equipped with a thermal splitter.

Results. On the basis of experimental studies for a gas burner device of the developed design, the values of efficiency, % of the burner and the content of carbon monoxide (CO, mg / m³) in the combustion products have been obtained, depending on the length of the thermal divider.

Conclusion. The results of experimental studies have shown the high efficiency of the original gas burner device when burning landfill gas.

Keywords: solid waste landfill; waste utilization; landfill gas; burning; gas-burner.

Conflict of interest. The author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Ramazanov R. S. Landfill Gas as an Alternative Energy Source. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(2): 23-34 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-2-23-34>.

Received 15.03.2021

Accepted 28.04.2021

Published 24.08.2021

Введение

С ростом численности населения Земли, которое приближается к восьми миллиардам, увеличением числа мегаполисов растёт потребление различных товаров, отходы которых со временем превращаются в мусор.

С середины 1980-х годов биосфере Земли стало сложно нейтрализовать ядовитые отходы деятельности человечества. В 2000-е годы для такой нейтрализации требовалось 1,2 поверхности земного шара, а в 2019 г – 1,6. Созданная человечеством проблема крайне серьёзна, и

если её не решать, то в ближайшие десятилетия может произойти одноразовая биосферная катастрофа, после которой жизнь на Земле исчезнет [1-2].

Современные крупные города ежегодно производят миллионы тонн разнообразных отходов, а в мире ежегодно образуется около 420 млрд т твёрдых коммунальных отходов (ТКО), при этом объём их образования со временем только возрастает.

В основном компонентами отходов потребления являются: использованная упаковка, пищевые остатки, отработанные товары и материалы (в том числе опасные – аккумуляторы, батарейки, ртутные и обычные лампы накаливания,

бытовая химия), изношенные автомобильные шины, уличный мусор, срезанные ветви, листья и т.п. [3-5].

На рис. 1 представлено мировое распределение ежегодного объема твердых коммунальных отходов, образующихся на душу населения [6].

Крупнейшим производителем отходов на душу населения во всём мире является Канада - 36,1 тонн на человека в год, в США данный показатель составляет 26 тонн на человека в год [7]. Для Российской Федерации данный показатель равен 450 кг на человека в год, а годовой объём производимых твёрдых коммунальных отходов в России около 65 млн т в год [8-9].

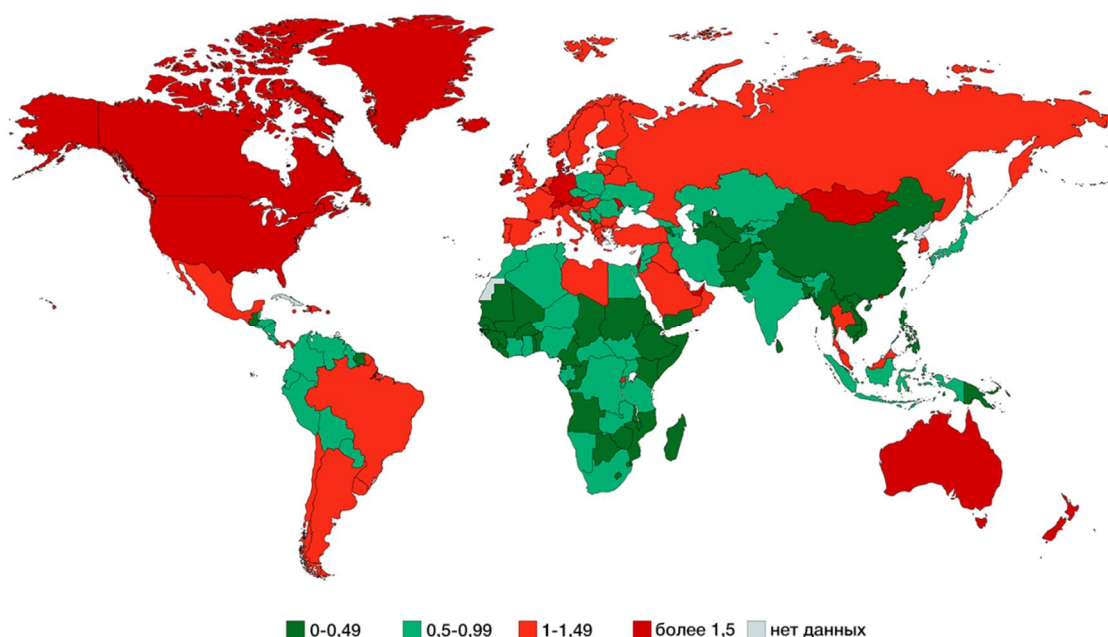


Рис. 1. Мировое распределение объема твердых коммунальных отходов, (килограммы / на душу населения / день)

Fig. 1. World distribution of municipal solid waste volume, (kilograms / per capita / day)

Различают три основных подхода к утилизации и переработке отходов: захоронение, сжигание и вторичная переработка.

Способ вторичной переработки заключается в повторном использовании отходов. Важнейшим условием при этом является тщательная сортировка, это поз-

воляет экономить энергию, снизить объем потребления природных ресурсов и значительно сократить негативное воздействие на окружающую среду.

Сжигание представляет собой способ утилизации отходов на мусоросжигательных заводах за счёт воздействия высоких температур (около 1200-1700 °С). Данный метод позволяет значительно сократить массу отходов, однако при этом образуется дым, который загрязняет атмосферу так как содержит углекислый газ, диоксины, канцерогены, пыль, тяжелые металлы и оксид азота.

В настоящее время технология вторичной переработки мусора наиболее развита в странах Европейского союза (30% отходов повторно используется в различных отраслях производства). Технологическим лидером в сфере обращения с отходами является Япония, 80% отходов утилизируется посредством

сжигания с одновременным получением энергии, а остальная часть отходов проходит вторичную переработку или подвергается компостированию. На рис. 2 представлена диаграмма по распределению видов обработки мусора в некоторых странах [10-12].

Наиболее распространённым и наименее экологичным способом избавления от ТКО является его захоронение (депонирование) – организованный сбор и складирование на специальных полигонах.

В России 94 % ТКО подвергается захоронению на полигонах, для Китая данный показатель составляет 60 %, США – 53 %, среднее значение для стран Европейского союза – 24 %, в Японии подвергается захоронению только зола и пепел, образуемый в результате сжигания отходов на мусороперерабатывающих заводах [13, 14].

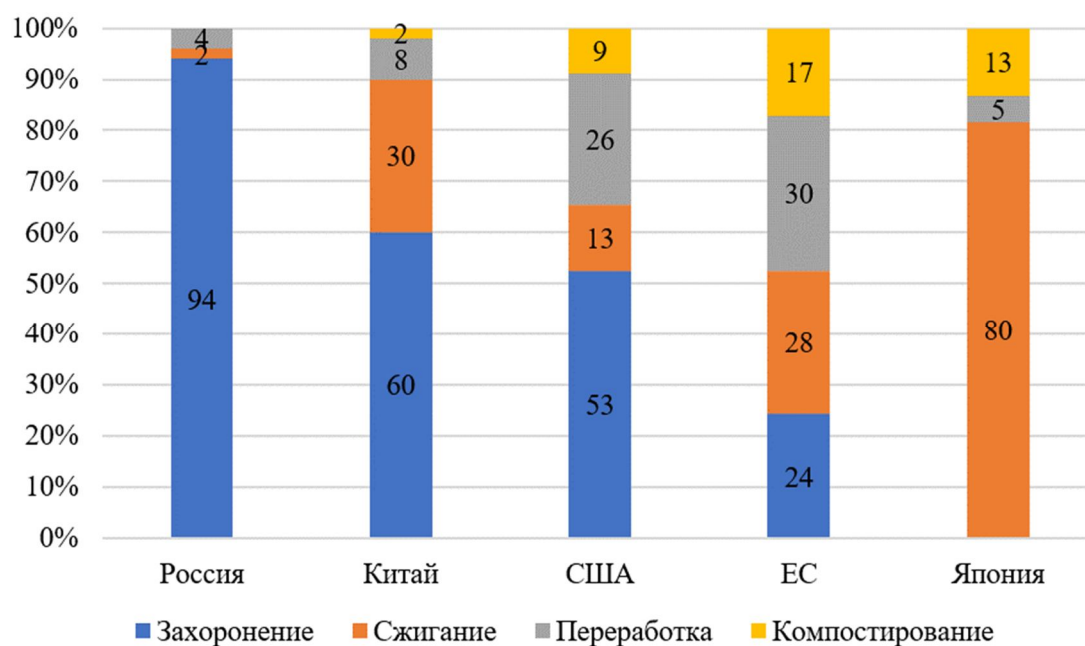


Рис. 2. Виды обработки мусора по странам, %

Fig. 2. Types of waste processing by country, %

По данным открытых информационных источников площадь мусорных полигонов в России составляет более 4 млн. га, в США суммарная площадь полигонов около 3 млн. га [11].

В Российской Федерации проблема утилизации твёрдых коммунальных отходов весьма актуальна. Проект утилизации ТКО города Москвы на территории Архангельской области вызвал многочисленные гражданские протесты. Аналогичные протесты происходили на территории Московской области.

Свалочный газ имеет следующий примерный состав: 35-65% метана, 25-50% двуокиси углерода, не более 3% кислорода и водорода, до 10% азота, присутствует сероводород до 5%, а также пары воды¹ [15-17].

Наличие сероводорода и других токсичных компонентов в составе свалочного газа придает ему характерный неприятный запах. При продолжительном воздействии оказывает на организм человека негативное влияние, вызывая затруднённое дыхание, заболевания органов дыхания, нарушение кровообращения, головные боли.

На территории полигонов не редки случаи самовозгорания отходов, при этом образуется едкий токсичный дым, подхваченный ветром, может разноситься к близлежащим населённым пунктам, что оказывает негативное влияние на самочувствие, и наносит вред здоровью проживающего там населения, а скопления

свалочного газа приводят к угрозе пожара или взрывообразования как на самих полигонах ТКО, так и в близлежащих зданиях и сооружениях.

В Российской Федерации реализованных проектов по утилизации свалочного газа с использованием его энергетического потенциала очень мало. Среди наиболее известных можно выделить: полигон «Ядрово» Московской области площадью 10 га, производит 1400 м³/ч свалочного газа, который сжигается в факеле, полигон «Кучино» Московской области площадью 50 га производит 2500 м³/ч свалочного газа, который подаётся на теплоэлектростанции, а излишки сжигаются в факеле, полигон «Преображенка» Самарская область, площадь газосбора составляет 6000 м² объёмы свалочного газа 245 м³/ч газа который подаётся на теплоэлектростанции, а излишки сжигаются в факеле.

Свалочный газ относится к числу парниковых газов, так как метан, имеющийся в его составе, гораздо эффективнее поглощает солнечное тепло и по разным данным оказывает в 25 раз большее влияние, по сравнению с диоксидом углерода, на процесс глобального потепления [18].

Одной из проблем утилизации свалочного газа является организация процесса его сжигания. Так свалочный газ имеет сравнительно невысокое содержание метана CH₄, содержит балластные газы, пары тяжелых металлов, CO, CO₂. Возникают большие трудности с его сжиганием, а предварительная очистка свалочного газа от примесей требует значительных материальных затрат. Поэтому

¹ Свалочный газ // Википедия. Свободная энциклопедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Свалочный_газ (дата обращения 23.02.2021).

му применение типовых газогорелочных устройств для эффективного сжигания свалочного газа затруднительна.

Материалы и методы

Нами предложена оригинальная конструкция газогорелочного устройства, общий вид которого представлен на рис. 3 (Патент РФ № 198280 опубл. 29.06.2020) [19].

Основным отличием разработанного газогорелочного устройства является наличие теплового рассекателя, который обеспечивает предварительный подогрев газозвушной смеси в корпусе.

В Белгородской области сбор, обработку и утилизацию отходов осуществляет ООО «ТК «Экотранс», которое ввела в эксплуатацию систему сбора свалочного газа на полигоне ТКО в Белгородском районе. Суммарная площадь газосбора составляет 1,75 га, производительность образования свалочного газа – 1600 м³/ч [20]. Получаемый газ расходуется на: питание газопоршневой станции, которая генерирует 130 кВт электроэнергии, котельного агрегата для отопления производственного здания площадью 1500 м², а также линии сушки древесины.

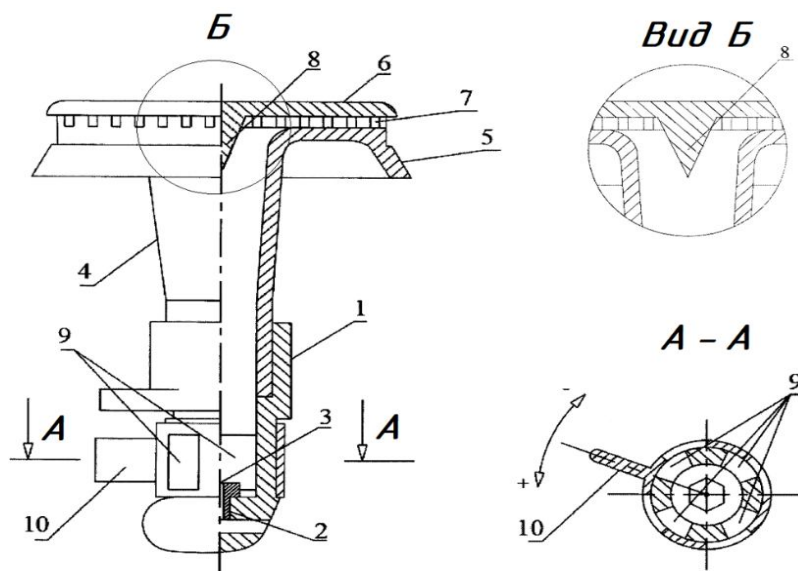


Рис. 3. Конструкция газогорелочного устройства: 1 – корпус; 2 – газовое сопло; 3 – аксиальное выходное отверстие; 4 – смеситель; 5 – выходной торец смесителя; 6 – крышка; 7 – огневые отверстия; 8 – тепловой рассекатель; 9 – отверстия подачи первичного воздуха; 10 – регулятор подачи первичного воздуха

Fig. 3. The design of the gas burner device: 1 – body; 2 – gas nozzle; 3 – axial outlet; 4 – mixer; 5 – mixer outlet end; 6 – cover; 7 – firing holes; 8 – thermal divider; 9 – openings for primary air supply; 10 – primary air supply regulator

На существующей технологической площадке мусороперерабатывающего завода ООО «ТК «Экотранс» была разработана экспериментальная установка для исследования процесса сжигания свалочного газа в бытовом газовом обо-

рудовании, оснащённом оригинальным газогорелочным устройством.

На рис. 4 представлена принципиальная схема экспериментальной установки по сжиганию свалочного газа.

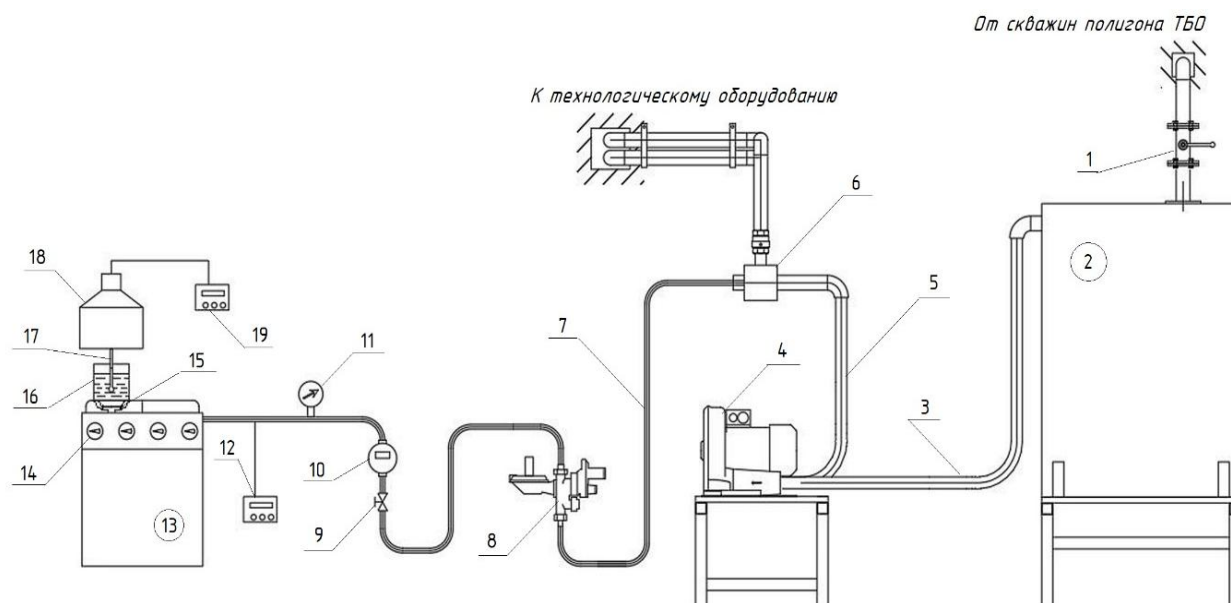


Рис. 4. Принципиальная схема экспериментальной установки по сжиганию свалочного газа:

- 1 – основной запорный кран; 2 – конденсатосборник; 3 – всасывающий газопровод;
 4 – вихревая газодувка GreenTech 2RB 710-040; 5 – нагнетающий газопровод;
 6 – газовый распределительный узел; 7 – шланг подвода свалочного газа; 8 – регулятор давления газа РДГК-10; 9 – кран шаровый; 10 – счётчик газовый; 11 – газовый манометр;
 12 – газоанализатор (CH₄); 13 – плита газовая бытовая; 14 – ручка крана горелки стола;
 15 – газовая горелка; 16 – испытательный сосуд; 17 – термометр; 18 – зонд отбора CO;
 19 – газоанализатор дымовых газов (CO)

Fig. 4. Schematic diagram of a landfill gas incineration pilot plant: 1 – main shut-off valve;
 2 – condensate collector; 3 – suction gas pipeline; 4 – vortex gas blower GreenTech 2RB 710-040; 5 – injection gas pipeline; 6 – gas distribution unit; 7 – landfill gas supply hose;
 8 – gas pressure regulator RDGK-10; 9 – ball valve; 10 – gas meter; 11 – gas pressure gauge;
 12 – gas analyzer (CH₄); 13 – household gas stove; 14 – handle of the table burner tap;
 15 – gas burner; 16 – test vessel; 17 – thermometer; 18 – CO sampling probe;
 19 – flue gas analyzer (CO)

Исследование эффективности процесса сжигания свалочного газа в газогорелочном устройстве производилось на основе методики, указанной в ГОСТ 33998-2016 (EN 30-1-1+A3:2013, EN 30-2-1:2015)¹.

Средний состав исследуемого свалочного газа CH₄ = 52%, CO₂ = 48 %,

геометрические параметры теплового расщепителя: диаметр основания конической части $d = 6$ мм, длина $l = 6, 12, 18, 24$ мм.

Результаты и их обсуждение

Экспериментальные исследования позволили установить зависимость КПД горелки от длины расщепителя, которая представлена на рис. 5. Содержание угарного газа (CO, мг/м³) в продуктах сгорания представлено на рис. 6.

Из анализа полученных данных возрастание КПД наблюдается при увели-

¹ ГОСТ 33998-2016. Приборы газовые бытовые для приготовления пищи. Общие технические требования, методы испытаний и рациональное использование энергии. М.: Стандартинформ, 2017. 119 с.

чении длины рассекателя, что вызвано более интенсивным подогревом газовой смеси внутри корпуса горелки. Некоторое увеличение содержания угарного газа (CO , мг/м^3) при росте

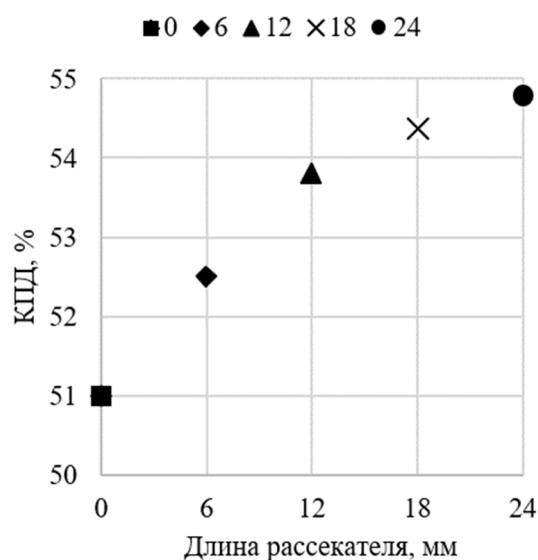


Рис. 5. Зависимость КПД, % горелки от длины рассекателя

Fig. 5. Dependence of efficiency, % of burner on the length of the splitter

КПД вызвано недожогом газовой смеси за счёт поднятия пламени из-за форсирования потока газовой смеси на выходе из огневых отверстий.

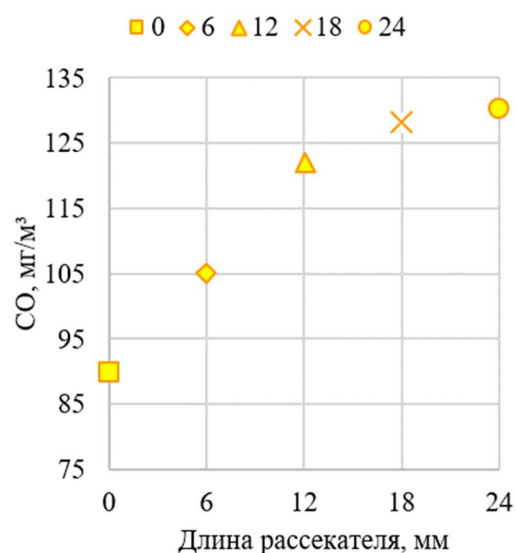


Рис. 6. Зависимость CO , мг/м^3 от длины рассекателя

Fig. 6. Dependence of CO , mg / m^3 on the length of the splitter

Выводы

Результаты экспериментальных исследований показали высокую эффективность оригинального газогорелочного устройства при сжигании свалочного газа на полигоне ТБО г. Белгорода ООО «ТК «Экотранс».

Полученные зависимости отражают положительное влияние конструктивных особенностей предлагаемого газогорелочного устройства (применения теплового рассекателя) для предварительного подогрева свалочного газа на эффективность его сжигания.

Список литературы

1. Ильичев В.А., Колчунов В.И., Бакаева Н.В. Архитектура градоустройства // Научный журнал строительства и архитектуры. 2020. №4. С. 121-129.
2. Зубаков В. А. Глобальный пик эндоэкологического отравления – биологический предел существования человечества // Успехи современного естествознания. 2003. № 5. С. 103-104.

3. Мирный А.Н. Санитарная очистка и уборка населенных мест. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1990. 413 с.
4. Cho H.S., Kim J.Y., Moon H.S. Effect of quantity and composition of waste on the prediction of annual methane potential from landfills // Elsevier Science Publishing Company, Inc.: Bioresource technology. 2012. Vol. 109. P. 86-92.
5. Management of municipal solid waste methane potential by using preliminary treatment / N. Sliusar, A. Pukhnyuk, V. Korotaev, Y. Matveev // 15th International multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2015. Albena, Bulgaria, 2015. P. 483-490.
6. Шилкина С.В. Мировые тенденции управления отходами и анализ ситуации в России // Отходы и ресурсы: интернет-журнал. 2020. №1. URL: <https://resources.today/PDF/05ECOR120.pdf> (дата обращения 23.02.2021).
7. Estimated annual waste per capita of the leading waste producing countries worldwide as of 2019 // Energy & Environment, Waste Management – 2021. URL: <https://www.statista.com/statistics/1168066/largest-waste-producing-countries-worldwide-per-capita/>. (дата обращения 23.02.2021).
8. Арсентьев В.А., Михайлова Н.В. Переработка отходов: использование ресурсного потенциала // Твердые бытовые отходы. 2007. № 8. С. 60-63.
9. Утилизация мусора в России. Как реформируют отрасль // Информационное агентство ТАСС: 2019. URL: [https://tass.ru/info/6000776#:~:text=Объем%20твердых%20коммунальных%20отходов%20\(ТКО,%20Твердые%20бытовые%20отходы%20\)](https://tass.ru/info/6000776#:~:text=Объем%20твердых%20коммунальных%20отходов%20(ТКО,%20Твердые%20бытовые%20отходы%20)). (дата обращения 23.02.2021).
10. Мировой рынок мусора: захоронение отходов — удел отстающих стран // Интернет-газета «Реальное время». 2020. URL: <https://realnoevremya.ru/articles/166395-mirovoy-musornyy-rynok-poka-v-peredovyh-stranah-szhigayut-i-sortiruyut-v-rossii-plodyat-poligony> (дата обращения 23.02.2021).
11. Системы управления бытовыми отходами разных стран: рецепты для России // Институт экономики роста им. Столыпина П.А.. 2019. URL: <https://stolypin.institute/analytics/sistemy-upravleniya-bytovymi-othodami-raznyh-stran-retsepty-dlya-rossii/> (дата обращения 23.02.2021).
12. Европа из 249 млн тонн отходов 47 % сжигает и 24 % отправляет на свалку // Научно-практический журнал: Твёрдые бытовые отходы. Новости Отрасли. 2019. URL: <https://news.solidwaste.ru/2019/02/evropa-pererabatyvaet-szhigaet-i-opravlyaet-na-svalku/> (дата обращения 23.02.2021).
13. Хорошавин Л.Б., Беляков В.А., Свалов Е. А. Основные технологии переработки промышленных и твердых коммунальных отходов / науч. ред. А. С. Носков. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. 220 с.

14. Оценка качества техногенно-нарушенных земель территории полигона ТБО г. Белгорода / Е.А. Пендюрин, Л.М. Смоленская, И.В. Старостина, С.Ю. Рыбина // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. № 4. С. 173-176.
15. Tchobanoglous G., Kreith F. Handbook of solid waste management. (2nd ed.), McGraw-Hill, New York, United States, 2002. 834 p.
16. Energy efficiency and environmental impact of biogas utilization in landfills / E.S. Karapidakis, A.A. Tsavre, P.M. Soupios, Y.A. Katsigiannis // Int. J. Environ. Sci. Tech., 2010. Vol. 7. No 3. Pp. 599-608.
17. Park J.W., Shin H.C. Surface emission of landfill gas from solid waste landfill // Elsevier Science Publishing Company, Inc.: Atmospheric environment. 2001. Vol. 35. No 20. Pp. 3445-3451.
18. Carbon Dioxide, Methane, Nitrous Oxide, and the Greenhouse Effect // Conservation in a Changing Climate. 2020. URL: <https://climatechange.lta.org/get-started/learn/co2-methane-greenhouse-effect/> (дата обращения 23.02.2021).
19. Пат. № 198280 РФ. МПК F23D 14/00 Газовая горелка / Р. С. Рамазанов, Д. Ю. Суслов, Л. А. Кущев, Д. О. Темников, И. В. Лобанов. № 2020107280; заявл. 17.02.2020; опубл. 29.06.2020, Бюл. №19. 6 с.
20. Мониторинг выхода биогаза с тела полигона ТКО / П.А. Трубаев, А.С. Клепиков, О.В. Веревкин, Б.М. Гришко, Д.Ю. Суслов, Р.С. Рамазанов // Энергетические системы: сб. тр. II Межд. науч.-техн. конф. Белгород: Изд-во БГТУ, 2017. С. 436-443.

References

1. Il'ichev V.A., Kolchunov V.I., Bakaeva N.V. Arkhitektura gradoustrojstva [Urban planning architecture]. *Nauchnyj zhurnal stroitel'stva i arkhitektury = Russian Journal of Building Construction and Architecture*, 2020, no.4, pp. 121-129 (In Russ.).
2. Zubakov V. A. Global'nyj pik ehndoeologicheskogo otravleniya – biologicheskij predel sushhestvovaniya chelovechestva [The global peak of endoecological poisoning is the biological limit of human existence]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences*, 2003, no. 5, pp. 103-104 (In Russ.).
3. Mirnyj A.N. *Sanitarnaya ochildka i uborka naseleennykh mest* [Sanitary cleaning and cleaning of populated areas]. Moscow, Strojizdat Publ., 1990. 413 p. (In Russ.).
4. Cho H.S., Kim J.Y., Moon H.S. Effect of quantity and composition of waste on the prediction of annual methane potential from landfills. *Elsevier Science Publishing Company, Inc.: Bioresource technology*, 2012, vol. 109, pp. 86-92.
5. Sliuser N., Pukhnyuk A., Korotaev V., Matveev Y. Management of municipal solid waste methane potential by using preliminary treatment. *15th International multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2015*. Albena, Bulgaria, 2015, pp. 483-490.

6. Shilkina S.V. Mirovye tendentsii upravleniya otkhodami i analiz situatsii v Rossii [World trends in waste management and analysis of the situation in Russia]. *Otkhody i resursy = Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*, 2020, no. 1. (In Russ.). Available at: <https://resources.today/PDF/05ECOR120.pdf> (accessed 23.02.2021).

7. Estimated annual waste per capita of the leading waste producing countries worldwide as of 2019. *Energy & Environment, Waste Management*. 2021. Available at: <https://www.statista.com/statistics/1168066/largest-waste-producing-countries-worldwide-per-capita/>. (accessed 23.02.2021)

8. Arsent'ev V.A., Mikhajlova N.V. Pererabotka otkhodov: ispol'zovanie resursnogo potentsiala [Waste recycling: using resource potential]. *Tverdye bytovye otkhody = Municipal Solid Waste*, 2007, no. 8, pp. 60-63 (In Russ.).

9. Utilizatsiya musora v Rossii. Kak reformiruyut otrasl' [Waste disposal in Russia. How the industry is being reformed]. *Informatsionnoe agentstvo TASS* [TASS News Agency] 2019. Available at: [https://tass.ru/info/6000776#:~:text=Ob'em%20tverdykh%20kommunal'nykh%20otkhodov%20\(TKO,%22Tverdye%20bytovye%20otkhody%22\)](https://tass.ru/info/6000776#:~:text=Ob'em%20tverdykh%20kommunal'nykh%20otkhodov%20(TKO,%22Tverdye%20bytovye%20otkhody%22).). (accessed 23.02.2021)

10. Mirovoj rynek musora: zakhoroneniye otkhodov — udel otstayushhikh stran [The global garbage market: landfill is the lot of lagging countries]. *Internet-gazeta «Real'noe vremya»* [Internet newspaper "Realnoe Vremya"]. 2020. Available at: <https://realnoevremya.ru/articles/166395-mirovoy-musornyy-rynok-poka-v-peredovyh-stranah-szhigayut-i-sortiruyut-v-rossii-plodyat-poligony> (accessed 23.02.2021).

11. Sistemy upravleniya bytovymi otkhodami raznykh stran: retsepty dlya Rossii [Household waste management systems in different countries: recipes for Russia]. *Institut ehkonomiki rosta im. Stolypina P.A.* [Institute for the Economics of Growth named after Stolypina P.A.]. 2019. Available at: <https://stolypin.institute/analytics/sistemy-upravleniya-bytovymi-otkhodami-raznyh-stran-retsepty-dlya-rossii/> (accessed 23.02.2021).

12. Evropa iz 249 mln tonn otkhodov 47 % szhigaet i 24 % otpravlyayet na svalku [Europe burns 47% of 249 million tons of waste and sends 24% to landfills]. *Tvyordye bytovye otkhody. Novosti Otrastli* [Municipal Solid Waste]. 2019. Available at: <https://news.solidwaste.ru/2019/02/evropa-pererabatyvaet-szhigaet-i-opravlyayet-na-svalku/> (accessed 23.02.2021).

13. Khoroshavin L.B., Belyakov V.A., Svalov E. A. *Osnovnye tekhnologii pererabotki promyshlennykh i tverdykh kommunal'nykh otkhodov* [Basic technologies for processing industrial and solid municipal waste]. Ekaterinburg, 2016. 220 p. (In Russ.).

14. Pendyurin E.A., Smolenskaya L.M., Starostina I.V., Rybina S.Yu. Otsenka kachestva tekhnogenno-narushennykh zemel' territorii poligona TBO g. Belgoroda [Assessment of the quality of technogenically disturbed lands in the territory of the solid waste landfill in Belgorod]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova = Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*, 2012, no 4, pp. 173-176 (In Russ.).

15. Tchobanoglous G., Kreith F. Handbook of solid waste management. (2nd ed.), McGraw-Hill, New York, United States, 2002. 834 p.
16. Karapidakis E.S., Tsavre A.A., Soupios P.M., Katsigiannis Y.A. Energy efficiency and environmental impact of biogas utilization in landfills. *Int. J. Environ. Sci. Tech.*, 2010, vol. 7, no 3, pp. 599-608.
17. Park J.W., Shin H.C. Surface emission of landfill gas from solid waste landfill. *Elsevier Science Publishing Company, Inc.: Atmospheric environment*, 2001, vol. 35, no 20, pp. 3445-3451.
18. Carbon Dioxide, Methane, Nitrous Oxide, and the Greenhouse Effect. *Conservation in a Changing Climate*: 2020. Available at: <https://climatechange.lta.org/get-started/learn/co2-methane-greenhouse-effect/> (accessed 23.02.2021).
19. Ramazanov R. S., Suslov D. Yu., Kushhev L. A., Temnikov D. O., Lobanov I. V. *Gazovaya gorelka* [Gas-burner]. Patent RF, no. 198280, 2020.
20. Trubaev P.A., Klepikov A.S., Verevkin O.V., Grishko B.M., Suslov D.Yu., Ramazanov R.S. Monitoring vykhoda biogaza s tela poligona TKO [Monitoring of biogas output from the solid waste landfill]. *Ehnergeticheskie sistemy. Sb. tr. II Mezhd. nauchno-tekhn. konf.* Belgorod, BGTU Publ., 2017, pp. 436-443 (In Russ.).

Информация об авторе / Information about the Author

Рамазанов Рафшан Салманович,
ассистент кафедры «Теплогазоснабжение
и вентиляция», Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова,
г. Белгород, Российская Федерация,
e-mail: boss.rafshan@mail.ru

Rafshan S. Ramazanov, Assistant, Heat, Gas
Supply and Ventilation Department, Belgorod
State Technological University named
after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation,
e-mail: boss.rafshan@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-2-35-50>

Моделирование деформаций предварительно напряженных стальных ферм при аварийных ситуациях

И. Н. Серпик¹ ✉, Н. В. Тарасова¹

¹ Брянский государственный инженерно-технологический университет
пр. Станке Димитрова 3, г. Брянск 241037, Российская Федерация

✉ e-mail: inserpik@gmail.com

Резюме

Цель исследования – построение методологии и алгоритма для конечноэлементного моделирования в единой вычислительной схеме деформирования плоских стальных ферм, предварительно напряженных с помощью высокопрочных канатов, в соответствии с хронологией воздействий на объект в виде преднапряжений, нормативных нагрузок и аварийного разрушения одного из несущих элементов.

Методы. Решение задачи осуществляется в геометрически нелинейной постановке с помощью численного интегрирования на основе подхода метода Ньюмарка с построением уравнений равновесия конечноэлементной модели конструкции в деформированном состоянии на каждом шаге интегрирования. Учитывается конструктивная нелинейность, связанная со структурными перестройками и рассмотрением работы канатов только на растяжение. Прослеживается приложение сил тяжести несущей системы, последовательное введение затяжек и их преднапряжение, приложение полезной нагрузки и аварийное воздействие в форме мгновенного локального разрушения. При этом до возникновения разрушения моделируется условие статического нагружения с использованием метода динамической релаксации. Сформулирована методология учета в рамках численного интегрирования аварийного воздействия путем приложения фиктивных сил, значения которых вычисляются в исключаемом конструктивном элементе на момент времени перед его разрушением.

Результаты. Работоспособность представленной вычислительной процедуры иллюстрируется на примере расчета плоской стальной фермы пролетом 54 м, включающей два каната. Рассмотрено поведение объекта с учетом обрыва одного из канатов, подвергавшегося предварительному напряжению. Установлено, что исследуемая аварийная ситуация не приводит к разрушению второго каната и возникновению пластических деформаций в стержнях фермы.

Заключение. Выполненные разработки могут быть использованы для обеспечения живучести предварительно напрягаемых стальных ферм при запроектных воздействиях, приводящих к разрушениям отдельных конструктивных элементов.

Ключевые слова: стальные плоские фермы; предварительное напряжение; канаты; аварийные ситуации; динамика; численное интегрирование; геометрическая и конструктивная нелинейность.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта РФФИ в рамках научного проекта №18-08-00567.

Для цитирования: Серпик И. Н., Тарасова Н. В. Моделирование деформаций предварительно напряженных стальных ферм при аварийных ситуациях // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(2): 35-50. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-2-35-50>.

Поступила в редакцию 20.01.2021

Подписана в печать 28.05.2021

Опубликована 24.08.2021

Simulation of Deformations of Pre-Stressed Steel Trusses in Emergency Situations

Igor N. Serpik ¹ ✉, Natalya V. Tarasova ¹

¹ Bryansk State Engineering Technological University
3 Stanke Dimitrov Ave. Bryansk 241037, Russian Federation

✉ e-mail: inserpik@gmail.com

Abstract

Purpose of research is to make methodology and algorithm for finite element modeling in a single computational scheme of deformation of flat steel trusses, previously stressed using high-strength ropes, in accordance with the chronology of impacts on the object in the form of prestresses, normative loads and emergency destruction of one of the bearing elements.

Methods. The solution of the problem is carried out in geometrically nonlinear staging using numerical integration based on Newmark approach with the construction of equilibrium equations of the finite element model of the structure in a deformed state at each integration step. Structural nonlinearity related to structural restructuring and consideration of ropes operation for tension only is described. The application of gravity forces of the carrier system, sequential introduction of tightening and their prestress, the application of payload and emergency impact in the form of instantaneous local destruction are traced. Before failure occurs, static loading condition is simulated using dynamic relaxation method. Methodology of accounting within numerical integration of emergency impact is formulated by application of dummy forces, values of which are calculated in excluded structural element before its destruction.

Results. Performance of presented computational procedure is illustrated by the example of a flat steel truss calculation with a span (54 m), including two ropes. Object behavior is considered considering the break of one of the ropes subjected to preliminary stress. It was revealed that the investigated emergency does not lead to the destruction of the second rope and the occurrence of plastic deformations in the truss rods.

Conclusion: Completed developments can be used to ensure the survivability of pre-stressed steel trusses under beyond design basis effects, leading to the destruction of individual structural elements.

Key words: steel flat trusses; preliminary stress; ropes; emergency situations; dynamics; numerical integration; geometric and structural nonlinearity.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding: The study was carried out with the financial support of RFFI Grant as part of scientific project No. 18-08-00567.

For citation: Serpik I. N., Tarasova N. V. Simulation of Deformations of Pre-Stressed Steel Trusses in Emergency Situations. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(2): 35-50 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-2-35-50>.

Received 20.01.2021

Accepted 28.05.2021

Published 24.08.2021

Введение

Согласно СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения», строительные конструкции повышенного уровня ответственности должны быть рассчитаны с учетом условий возможных локальных разрушений вследствие аварийных воздействий. В современной научной литературе уделяется большое внимание разработке методического обеспечения для выполнения расчетов такого типа [1, 2]. В работах [3-12] рассматриваются алгоритмы оценки динамических догрузений стальных и железобетонных конструкций при возможных локальных повреждениях на основе квазистатических подходов. В ряде публикаций [13-19] выполняются исследования деформаций строительных объектов при аварийных ситуациях в динамической постановке. В статье [20] предложена процедура анализа устойчивости железобетонных каркасных конструкций к прогрессирующему разрушению на основе сочетания динамического и нелинейного статического анализа. В работе [21] сопоставлены подходы к оценке деформаций стальных рамных конструкций при разрушении некоторых несущих элементов на основе линейно упругого и нелинейно упругого расчета в статической постановке, а также проведения нелинейного динамического анализа. Отмечается важность выполнения расчета конструкций для условий возникновения

аварийных ситуаций с учетом протекания процессов во времени.

Аварийные воздействия на предварительно напряженные конструкции рассмотрены в работах [22-24]. В статье [22] в качестве объекта исследования представлен многоэтажный железобетонный рамно-связевой каркас с предварительно напряженными ригелями, который подвергается аварийному воздействию, приводящему к разрушению колонны крайнего ряда на первом этаже здания. Оценка результатов запроектного воздействия выполнялась на основе нелинейного анализа процессов деформирования и разрушения подконструкции в виде двухэтажной двухпролетной рамы, выделенной из каркаса здания методом декомпозиции. В работе [23] представлено численное исследование прогрессирующего обрушения при столкновении с судном многопролетного моста с надстройками из предварительно напряженного бетона. Изучен механизм разрушения моста в динамической постановке с помощью конечноэлементной модели. В исследовании [24] выполнялся расчет стальной конструкции вантового моста с предварительно напряженными канатами при аварийном разрыве одного из канатов. Несущая система конструкции рассматривалась как система, образуемая двумя ригелями, колонной и канатами. Представлена методология такого анализа в квазистатической и динамической постановках. В то же время вопросы расчета предваритель-

но напряженных стальных конструкций при локальных разрушениях еще требуют разработки подходов, учитывающих историю нагружения деформируемой системы. Целью настоящей работы является построение методологии и алгоритма для конечноэлементного моделирования в единой вычислительной схеме деформирования плоских стальных ферм, предварительно напряженных с помощью высокопрочных канатов, в соответствии с хронологией воздействий на объект в виде преднапряжений, нормативных нагрузок и аварийного разрушения одного из несущих элементов.

Материалы и методы

При исследовании нагруженности стальных ферм принимаем во внимание геометрическую нелинейность задачи с точки зрения возможности учета больших перемещений и конструктивную нелинейность, обусловленную работой канатов только на растяжение, а также последовательным включением канатов в деформируемую систему и исключением из объекта несущего элемента при аварийной ситуации. Расчеты показывают, что при анализе переходных динамических процессов, связанных с внезапными структурными перестройками, использование в качестве начальных условий перемещений, получаемых при решении задачи в статической постановке от преднапряжений и нормативных нагрузок, может приводить к нарушению устойчивости численного

интегрирования дифференциальных уравнений. Поэтому все этапы нагружения объекта рассматриваем как нестационарные. При этом до локального разрушения используем метод динамической релаксации, воспроизводя условия статического нагружения с помощью быстро затухающих фиктивных динамических процессов.

Пусть исходная конструкция нагружена системой сил, которые в рамках метода конечных элементов приводятся к вектору обобщенных узловых сил $\{Q(t)\}$, в общем случае зависящих от времени t . Считаем, что изменение этих сил вследствие перемещений системы является несущественным. Рассмотрим случай мгновенного разрушения одного из конструктивных элементов фермы. В соответствии с принципом Даламбера запишем систему уравнений динамического равновесия конечноэлементной модели объекта в деформированном состоянии в виде

$$\begin{aligned} &\{R^*(\{\delta\}, t)\} + \chi(\tau)\{R^{\oplus}(\{\delta\}, t)\} + \\ &+ \{\Phi(\{\delta\}, \{\ddot{\delta}\}, t)\} + \\ &+ \{L(\{\delta\}, \{\dot{\delta}\}, t)\} = \{Q(t)\}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\{R^*(\{\delta\}, t)\}$ – вектор приведенных к узлам реакций от конечных элементов без учета жесткости устранимого в момент времени $t = t_0$ несущего элемента; $\{\delta\}$ – вектор узловых перемещений; $\chi(\tau)$ – функция Хэвисайда от аргумента $\tau = t - t_0$ ($\chi(\tau) = 0$, если $\tau < 0$;

$\chi(\tau) = 1$, если $\tau \geq 0$); $\{R^\oplus(\{\delta\}, t)\}$ – вектор узловых реакций от конечных элементов удаляемой части конструкции; $\{\Phi(\{\delta\}, \{\ddot{\delta}\}, t)\}$, $\{L(\{\delta\}, \{\dot{\delta}\}, t)\}$ – векторы приведенных к узлам сил инерции и сил вязкого сопротивления, для которых учитывается фактор перестройки расчетной схемы при отражении запроектного воздействия.

Решаем задачу Коши для системы уравнений (1) при нулевых начальных условиях на основе численного интегрирования. Используем подход метода Ньюмарка, предусматривающий учет постоянных значений ускорений на каждом шаге вычислительного процесса [25], и методику исследования геометрически нелинейных задач, изложенную в работе [14].

На основании матриц $[K_{\text{ст}}]$ может быть сформирована касательная матрица $[K_\tau]$ для конечноэлементной модели объекта в целом. Согласно процедуре метода конечных элементов [26] принимаем

$$\begin{aligned} \{\Phi(\{\delta\}, \{\ddot{\delta}\}, t)\} &= -[M]\{\ddot{\delta}\}; \\ \{L(\{\delta\}, \{\dot{\delta}\}, t)\} &= -[C]\{\dot{\delta}\}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $[M]$, $[C]$ – матрица масс и матрица демпфирования системы конечных элементов для деформированного состояния.

Полагаем, что на каждом шаге по времени Δt численного интегрирования решается линейная задача. Для начального времени t_{n-1} некоторого шага n

рассматриваем матрицу масс $[M(t_{n-1})]$, матрицу демпфирования $[\tilde{N}(t_{n-1})]$ и касательную матрицу жесткости $[K_\tau(t_{n-1})]$. Векторы $\{R^*(\{\delta\}, t)\}$, $\{R^\oplus(\{\delta\}, t)\}$ для момента времени t_n окончания этого шага, приближенно определяем с помощью зависимостей

$$\{R^*(\{\delta\}, t_n)\} = \sum_{k=1}^n [K_\tau^*(t_{k-1})] \{\Delta\delta_k\}; \quad (3)$$

$$\{R^\oplus(\{\delta\}, t_n)\} = \sum_{k=1}^n [K_\tau^\oplus(t_{k-1})] \{\Delta\delta_k\}, \quad (4)$$

где $[K_\tau^*(t_{k-1})]$ – касательная матрица на шаге t_{k-1} без учета жесткости разрушаемого конструктивного элемента; $[K_\tau^\oplus(t_{k-1})]$ – составляющая касательной матрицы на шаге t_{k-1} , связанная с жесткостью данного элемента; $\{\Delta\delta_k\}$ – вектор приращений перемещений на k -м шаге:

$$\{\Delta\delta_k\} = \{\delta(t_k)\} - \{\delta(t_{k-1})\}. \quad (5)$$

Учитывая зависимости (2)-(5), запишем уравнение (1) для момента времени t_n следующим образом:

$$\begin{aligned} [M(t_{n-1})]\{\ddot{\delta}(t_n)\} + [C(t_{n-1})]\{\dot{\delta}(t_n)\} + \\ + \sum_{k=1}^n [K_\tau^*(t_{k-1})]\{\Delta\delta_k\} + \\ + \chi(\tau_n) \sum_{k=1}^n [K_\tau^\oplus(t_{k-1})]\{\Delta\delta_k\} = \{Q(t_k)\}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для расчета при $t_n > t_o$ преобразуем равенство (6) к виду

$$\begin{aligned} [M(t_{n-1})]\{\ddot{\delta}(t_n)\} + [C(t_{n-1})]\{\dot{\delta}(t_n)\} + \\ + \{R(t_n)\} = \{Q(t_k)\} - \{\tilde{R}\}, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\{R(t_n)\} = \{R^*(\{\delta\}, t_n)\} + \{R^\oplus(\{\delta\}, t_m)\}, \quad (8)$$

m – номер шага по времени, окончание которого соответствует моменту аварийной ситуации; $\{\tilde{R}\}$ – вектор, включающий силы в устраняемом несущем элементе перед его локальным разрушением и определяемый зависимостью

$$\{\tilde{R}\} = \sum_{k=1}^m [K_\tau^\oplus] \{\Delta\delta_k\}. \quad (9)$$

Учитываем демпфирование с помощью формулы Релея [26]:

$$[\tilde{N}(t_{n-1})] = \alpha [M(t_{n-1})] + \beta [K_\tau(t_{n-1})], \quad (10)$$

где α , β – задаваемые коэффициенты соответственно инерционного и конструкционного демпфирования.

Принимаем во внимание только энергетические потери, обусловленные действием сил сухого трения. При этом $\alpha = 0$, а коэффициент конструкционного демпфирования при анализе последствий аварийного воздействия можно приближенно вычислять с помощью выражения [27]

$$\beta = \frac{\xi}{\pi f_1}, \quad (11)$$

где ξ – коэффициент затухания; f_1 – первая частота собственных колебаний.

В соответствии с подходом метода Ньюмарка имеем [25]

$$\{\dot{\delta}(t_n)\} = b_1 (\{\delta(t_n)\} - \{\delta(t_{n-1})\}) - \{\dot{\delta}(t_{n-1})\}; \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \{\ddot{\delta}(t_n)\} = & b_0 (\{\delta(t_n)\} - \{\delta(t_{n-1})\}) - \\ & - b_2 \{\dot{\delta}(t_{n-1})\} - \{\ddot{\delta}(t_{n-1})\}, \end{aligned} \quad (13)$$

где параметры интегрирования

$$b_0 = 4/\Delta t^2; \quad b_1 = 2/\Delta t; \quad b_2 = 4/\Delta t.$$

В результате для процесса, протекающего после локального разрушения, получим следующую систему линейных алгебраических уравнений, решаемую на каждом шаге интегрирования:

$$\begin{aligned} \Omega_n \{\Delta\delta_n\} = & \{Q(t_n)\} - \sum_{k=1}^{n-1} [K_\tau^*(t_{k-1})] \{\Delta\delta_k\} + \\ & + \Psi_n \{\dot{\delta}(t_{n-1})\} + [M(t_{n-1})] \{\ddot{\delta}(t_{n-1})\} - \{\tilde{R}\}, \end{aligned} \quad (14)$$

где

$$\begin{aligned} \Omega_n = & b_0 [M(t_{n-1})] + b_1 [\tilde{N}(t_{n-1})] + [K_\tau^*(t_{n-1})]; \\ \Psi_n = & b_2 [M(t_{n-1})] + [\tilde{N}(t_{n-1})]. \end{aligned}$$

При построении касательной матрицы $[K_{et}]$ конечного элемента e с учетом геометрической нелинейности используем следующее выражение для вектора его узловых реакций [26] в отклоненном состоянии:

$$\{R_e\} = \int_{V_e} [B_e]^T \{S_e\} dV, \quad (15)$$

где матрица $[B_e]$ связывает виртуальные приращения вектора обобщенных деформаций $\{\varepsilon_e\}$ и вектора виртуальных приращений обобщенных узловых перемещений $\{\delta_e\}$ конечного элемента:

$$\tilde{d}\{\varepsilon_e\} = [B_e] \tilde{d}\{\delta_e\}, \quad (16)$$

$\{S_e\}$ – вектор обобщенных напряжений; V_e – объем конечного элемента; $\tilde{d}$ – обозначение дифференциала характеристик напряженно-деформированного состояния объекта.

Связь виртуальных приращений узловых реакций и узловых перемещений будет определяться зависимостью

$$\tilde{d}\{R_e\} = [K_{et}] \tilde{d}\{\delta_e\}. \quad (17)$$

Из соотношения (15) следует, что

$$\begin{aligned} \tilde{d}\{R_e\} = & \int_{V_e} \tilde{d}[B_e]^T \{S_e\} dV + \\ & + \int_{V_e} [B_e]^T \tilde{d}\{S_e\} dV. \end{aligned} \quad (18)$$

Первый интеграл в выражении (18) обычно представляется в виде [26]

$$\int_{V_e} \tilde{d}[B_e]^T \{S_e\} dV = [K_{es}] \tilde{d}\{\delta_e\}, \quad (19)$$

где $[K_{es}]$ – матрица начальных напряжений.

Для второго интеграла принимаем, что матрица $[B_e]$ определяет бесконечно малые деформации в отклоненном состоянии. Тогда запишем

$$\int_{V_e} [B_e]^T \tilde{d}\{S_e\} dV = [K_{eo}] \tilde{d}\{Z_e\}, \quad (20)$$

где $[K_{eo}]$ – построенная для этого состояния матрица жесткости бесконечно малых деформаций конечного элемента.

Учитывая соотношения (15)-(20), будем иметь

$$[K_{et}] = [K_{eo}] + [K_{es}]. \quad (21)$$

Матрицы $[K_{eo}]$, $[K_{es}]$ могут определяться с помощью известных процедур конечноэлементного анализа [26]. При этом следует использовать матрицы $[B_e]$ с учетом корректировки координат узлов конечных элементов.

Рассмотрим условие аварийной ситуации при внезапном разрыве предварительно напряженного каната. Считаем, что его преднапряжение осуществляется на конструкцию, когда ферма установлена на сооружении. Предусматриваем в общем случае использование i_o затяжек с помощью домкратов. Для случая разрушения затяжки $T_i (i=1, \dots, i_o)$ систему воздействий на ферму представляем следующим образом:

1. Приложение к стержневой системе сил тяжести конструктивных элементов фермы.

2. Включение в объект затяжки T_1 и приложение сил P_1 к затяжке и ферме, соответствующих воздействию домкрата (рис. 1,а).

3. Введение условного элемента H_1 большой жесткости, имитирующего анкер (рис. 1,б).

4. Удаление сил P_1 , соответствующее устранению домкрата.

5. Выполнение при $i_o > 1$ действий 2-4 для каждой из остальных затяжек с использованием сил P_i и элементов $H_i (i=2, \dots, i_o)$.

6. Приложение полезной нагрузки.

7. Исключение элемента H_i и приложение в соответствии с равенством (8) сил F_i (рис. 1в), каждая из которых равна по модулю и противоположна по направлению силе, с которой эта затяжка действовала на стержневую систему до момента разрыва.

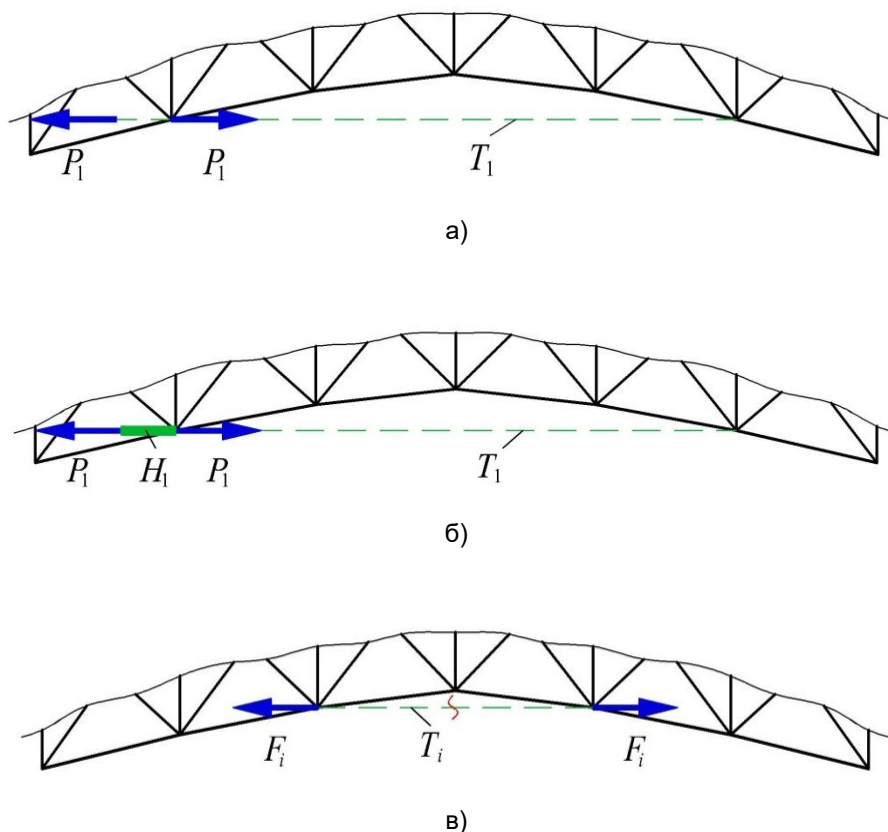


Рис. 1. Схемы учета введения и разрыва канатов: **а** – приложение сил P_1 ;

б – постановка элемента H_1 ; **в** – приложение сил F_i

Fig. 1. Rope Insertion and Rupture Accounting Diagrams: **a** – application of forces P_1 ;

б – setting an element H_1 ; **в** – application of forces F_i

Результаты и их обсуждение

Рассматривалась двухопорная плоская ферма стального каркаса одноэтажного здания с двумя высокопрочными канатами T_1 , T_2 (рис. 2). Полагалось, что ферма раскреплена из своей плоскости по узлам соединения стержней. Материал стержней – сталь С245 (СП 16.13330.2017. «Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*»). Стержни изготовлены из квадратных труб по ГОСТ 32931-2015 «Трубы стальные профильные для металлоконструкций. Технические условия» со следующими разме-

рами поперечных сечений ($A \times s$, мм): стержни 1, 2 – 250×9 ; 3, 12 – 300×10 ; 4 – 11 – 300×10 ; 13–22 – 350×12 ; 23–31 – 200×10 ; 32–41 – 250×12 , где A – наружный размер профиля (сторона квадрата); s – толщина стенки. Затяжки выполнены по ГОСТ 14954-80 «Канат двойной свивки типа ЛК-Р конструкции 6 19 (1+6+6/6)+7 7(1+6). Сортамент» диаметром 25 мм, маркировочная группа – 1670 Н/мм². Разрывные силы для этих канатов должно быть не менее 395 кН. Модуль упругости для материала канатов $E_K = 1,47 \cdot 10^5$ МПа (СП 16.13330.2017).

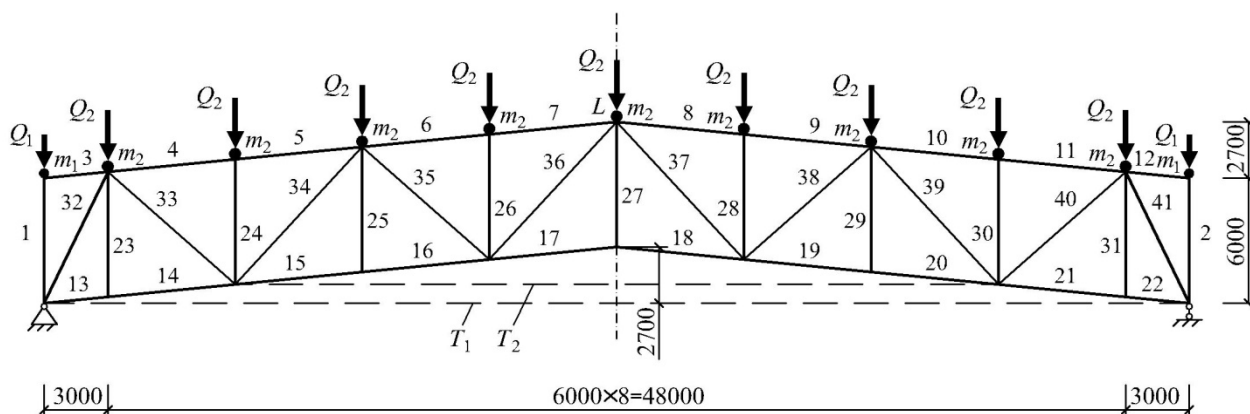


Рис. 2. Плоская ферма: 1-41 – стержни; T_1 , T_2 – канаты

Fig. 2. Flat truss: 1-41 – bars; T_1 , T_2 – cables

Полезная нагрузка от покрытия и снега представлена системой сил $Q_1=120$ кН, $Q_2=2Q_1$. Учтены соответствующие этим силам сосредоточенные массы m_1 , m_2 . Принимались также во внимание силы тяжести и массы для стержней и канатов, распределенные по конструктивным элементам. Предусматривалось, что на стержневую конструкцию, установленную на строительном объекте, последовательно вводятся с преднапряжением канаты T_1 и T_2 с достижением в них соответственно сил 300 и 250 кН.

Вводилось 235 конечных элементов для стержней и по одному конечному элементу для канатов. Согласно работе [27], для рассматриваемой стальной конструкции принималось $\xi=0,02$. Для условия динамики фермы без затяжки T_1 учитывалась полученная расчетным путем величина $f_1=2,2$ с⁻¹. До этапа воздействия 7 временные интервалы рассматривались как условные. Их величины и коэффициент конструкционного демпфирования для динамической ре-

лаксации задавались в соответствии с выполненными в данной работе численными экспериментами по оценке условий достижения состояний, близких к стационарным. Установлено, что для имитации статического нагружения целесообразно увеличить значение β , вычисленное с помощью формулы (11), в 50 раз. При этом для практического устранения динамических эффектов после приложения сил тяжести от элементов несущей конструкции достаточно использовать временной интервал, равный 10-ти периодам первой формы собственных колебаний. После каждого преднапряжения каната или приложения полезной нагрузки целесообразно проводить расчет до следующего воздействия в течение интервала времени, равного 20-30 таким периодам. Расчеты показали обеспечение при выполнении этих условий устойчивости процесса численного интегрирования в методе Ньюмарка для задач рассматриваемого типа.

На рис. 3 приведен полученный график изменения вертикального пере-

мещения W_L узла L в зависимости от времени при шаге интегрирования $\Delta t=0,01$ с, рис. 4, 5 – соответствующие графики для сил в затяжках. Отметим, что уменьшение шага интегрирования в 10 раз не приводило к сколько-нибудь существенной корректировке результатов расчетов. В динамическом процессе силы в канате T_2 не превысили разрывного усилия, а напряжения в стержнях – предела текучести материала, что указывает на обеспечение ремонтпригодности конструкции по результатам аварийного воздействия.

Как видно из рис. 3-5, вычислительный процесс позволил оценить влияние на деформирование конструкции всех рассматриваемых силовых воздействий. На графиках, приведенных на этих рисунках, указаны участки достижения установившихся результатов для следующих процессов: 1 – действие сил тяжести фермы; 2 – преднапряжение затяжки T_1 ; 3 – преднапря-

жение затяжки T_2 ; 4 – приложение полезной нагрузки. Позиция 1 для затяжки T_1 и позиции 1, 2 для затяжки T_2 отражают отсутствие этих элементов в несущей системе. Позициями 5 обозначены затухающие колебательные движения, вызванные обрывом каната T_1 .

Выводы

Предложенная вычислительная схема позволяет рассчитать деформации плоских стальных ферм, предварительно напрягаемых с помощью высокопрочных затяжек, с учетом возможности возникновения аварийной ситуации в виде локального разрушения. Методология исследований предполагает математическое моделирование с помощью метода конечных элементов преднапряжений, приложений нормативных нагрузок и динамического поведения несущей системы при запроектном воздействии.

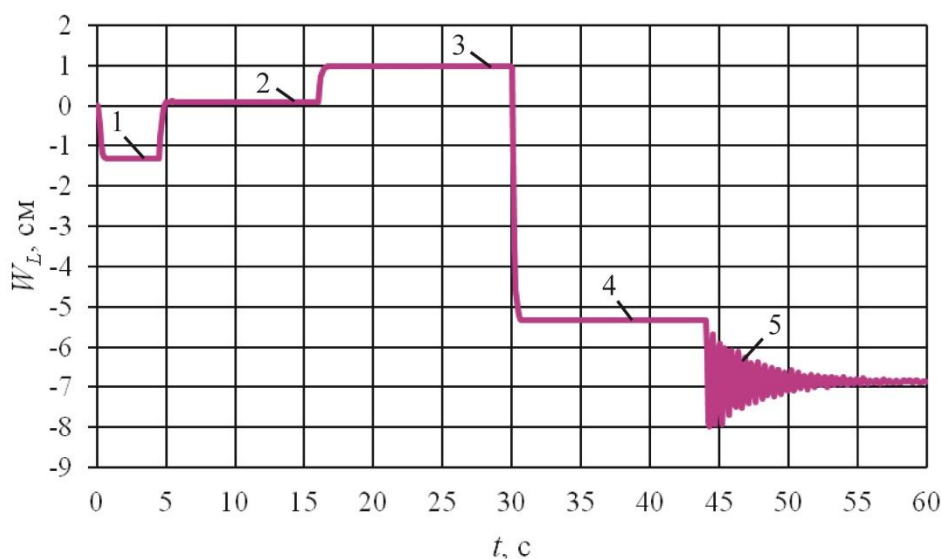


Рис. 3. Вертикальное перемещение узла L в зависимости от времени

Fig. 3. Vertical movement of node L depending on the time

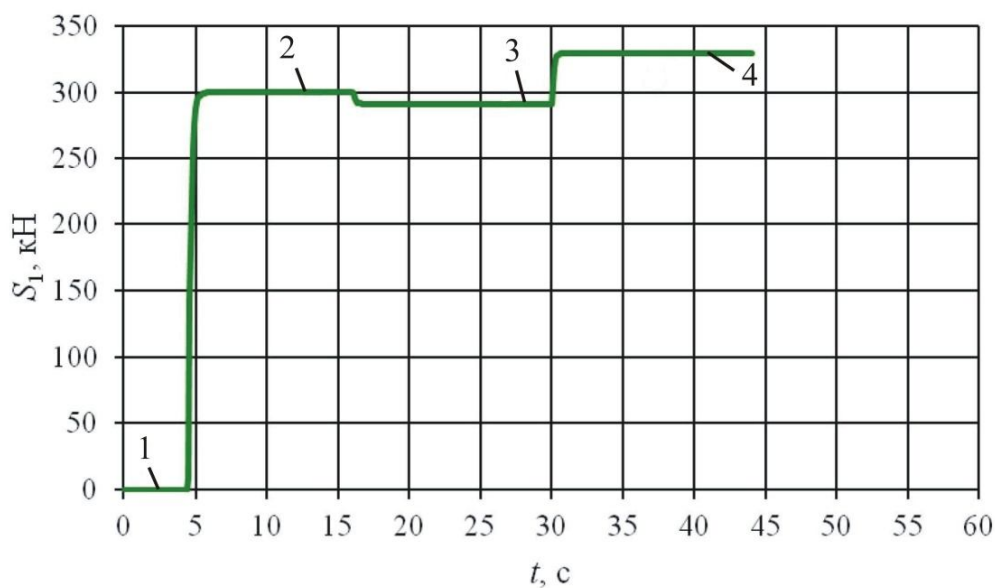


Рис. 4. Изменение силы S_1 в затяжке T_1 в зависимости от времени

Fig. 4. Changing of force S_1 in cable T_1 depending on the time

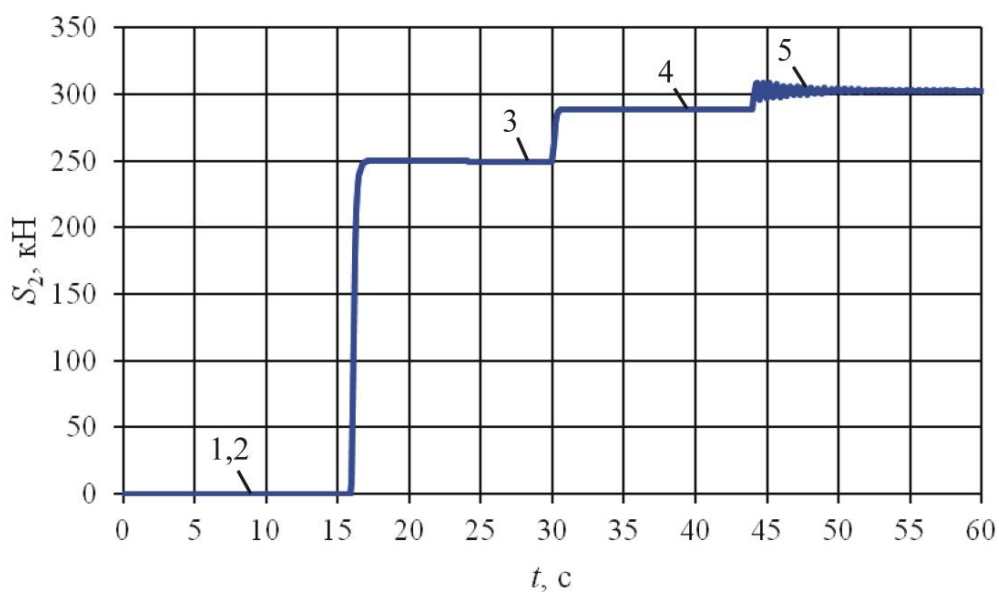


Рис. 5. Изменение силы S_2 в затяжке T_2 в зависимости от времени

Fig. 5. Changing of force S_2 in cable T_2 depending on the time

На основе метода Ньюмарка построена процедура численного интегрирования уравнений динамического равновесия конструктивной системы с рассмотрением ее положений в отклоненных состояниях. При этом принимается во внимание геометрически и конструк-

тивно нелинейное поведение объекта. Работоспособность сформулированного алгоритма подтверждена на основе численного эксперимента для аварийной ситуации в двухопорной ферме, снабженной двумя затяжками.

Список литературы

1. Abdelwahed B. A review on building progressive collapse, survey and discussion // *Case Studies in Construction Materials*. 2019. №11. P. e00264. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00264>.
2. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century / F. Parisi, J.M. Adam, J. Sagaseta, X. Lu // *Engineering Structures*. 2018. № 173. P. 122-149. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.082>.
3. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях / Г.А. Гениев, В.И. Колчунов, Н.В. Ключева, А.И. Никулин, К.П. Пятикрестовский. М.: АСВ, 2004. 216 с.
4. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях / В.И. Колчунов, Н.Б. Андросова, Н.В. Ключева, А.С. Бухтиярова. М.: АСВ, 2014. 208 с.
5. Fengwei S., Wang L., Dong S. Progressive collapse assessment of the steel moment-frame with composite floor slabs based on membrane action and energy equilibrium // *The Open Construction and Building Technology Journal*. 2017. №11(1). P. 200-215. <https://doi.org/10.2174/1874836801711010200>.
6. Kolchunov V.I., Savin S.Yu. Survivability criteria for reinforced concrete frame at loss of stability // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. №80(4). P. 73-80. <https://doi.org/10.18720/MCE.80.7>.
7. Напряженно-деформированное состояние высотного здания при ветровом воздействии и прогрессирующем обрушении / А.А. Семенов, И.А. Порываев, Д.В. Кузнецов, Т.Х. Нгуен, А.С. Саитгалина, Е.С. Трегубова // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2017. №59(8). С. 7-26. <https://doi.org/10.18720/CUBS.59.1>.
8. Travush V.I., Fedorova N.V. Survivability of structural systems of buildings with special effects // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. 81(5). P. 73–80. <https://doi.org/10.18720/MCE.81.8>.
9. Серпик И.Н., Мироненко И.В. Методика оценки нагруженности конструкций при запроектных воздействиях с учетом нелинейной работы материалов // *Строительство и реконструкция*. 2012. №42(4). С. 54-60.
10. Progressive collapse analysis of steel frame structure based on the energy principle / C.H. Chen, Y.F. Zhu, Y. Yao, Y. Huang // *Steel and Composite Structures*. 2016. №21(3). P. 553-571. <http://dx.doi.org/10.12989/scs.2016.21.3.553>.
11. Szyniszewski S., Krauthammer T. Energy flow in progressive collapse of steel framed buildings // *Engineering Structures*. 2012. №42. P. 142-153. <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.04.014>.
12. Gerasimidis S., Sideri J. A new partial-distributed damage method for progressive collapse analysis of steel frames // *Journal of Constructional Steel Research*. 2016. №119. P. 233-245. <http://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.12.012>.

13. Kim H.S., Ahn J.G., Ahn H.S. Numerical simulation of progressive collapse for a reinforced concrete building // *Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2013. №7(4). P. 272-275. <http://doi.org/10.5281/zenodo.1060737>.

14. Анализ в геометрически, физически и конструктивно нелинейной постановке динамического поведения плоских рам при запроектных воздействиях / И.Н. Серпик, Н.С. Курченко, А.В. Алексейцев, А.А. Лагутина // *Промышленное и гражданское строительство*. 2012. №10. С. 49-51.

15. An evaluation of modeling approaches and column removal time on progressive collapse of building / D. Stephen, D. Lam, J. Forth, J. Ye, K.D. Tsavdaridis // *Journal of Constructional Steel Research*. 2019. №153. P. 243-253. <http://doi.org/10.1016/J.JCSR.2018.07.019>.

16. Серпик И.Н., Алексейцев А.В. Оптимизация рамных конструкций с учетом возможности запроектных воздействий // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. №44(9). С. 23-29. <http://doi.org/10.5862/MCE.44.3>.

17. Elsanadedy H.M., Almusallam T.H., Al-Salloum Y.A., Abbas H. Investigation of precast RC beam-column assemblies under column-loss scenario // *Construction and Building Materials*. 2017. №142. P. 552-571. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.120>.

18. Tsai M.-H. An approximate analytical formulation for the rise-time effect on dynamic structural response under column loss // *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2018. №18(3). P. 1850038. <http://doi.org/10.1142/s0219455418500384>.

19. Feng D.-C., Wang Z., Wu G. Progressive collapse performance analysis of precast reinforced concrete structures // *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2019. №28(5). P. e1588. <https://doi.org/10.1002/tal.1588>.

20. Ventura A., De Biagi V., Chiaia B. Structural robustness of RC frame buildings under threat-independent damage scenarios // *Structural Engineering and Mechanics*. 2018. № 6(65). P. 689-698. <https://doi.org/10.12989/sem.2018.65.6.689>.

21. Mohamed O., Khattab R. Assessment of progressive collapse resistance of steel structures with moment resisting frames // *Buildings*. 2019. №9(1). P. 19. <https://doi.org/10.3390/buildings9010019>.

22. Failure simulation of a RC multi-storey building frame with prestressed girders / V.I. Kolchunov, N.V. Fedorova, S.Yu. Savin, V.V. Kovalev, T.A. Iliushchenko // *Magazine of Civil Engineering*. 2019. №92(8). P. 155-162. <https://doi.org/10.18720/MCE.92.13>.

23. Numerical investigation of progressive collapse of a multispan continuous bridge subjected to vessel collision / H. Jiang, J. Wang, M.G. Chorzepa, J. Zhao // *Journal of Bridge Engineering*. 2017. №22(5). P. 04017008. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001037](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001037).

24. Comparison of various procedures for progressive collapse analysis of cable-stayed bridges / J. Cai, Y. Xu, L. Zhuang, J. Feng, J. Zhang // *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*. 2012. №13(5). P. 323-334. <https://doi.org/10.1631/jzus.a1100296>.

25. Bathe K.J. Finite element procedures. Watertown, MA, USA, 2016.

26. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Fox D. The finite element method for solid and structural mechanics. Elsevier, Oxford, 2014.

27. Papageorgiou A.V., Gantes C.J. Equivalent modal damping ratios for concrete/steel mixed structures // *Computers & Structures*. 2010. № 88(19-20). P. 1124-1136. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruc.2010.06.014>.

References

1. Abdelwahed B. A review on building progressive collapse, survey and discussion. *Case Studies in Construction Materials*, 2019, no. 11, pp. e00264. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00264>.

2. Parisi F., Adam J.M., Sagaseta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Engineering Structures*, 2018, no. 173, pp. 122-149. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.082>.

3. Geniyev G.A., Kolchunov V.I., Klyuyeva N.V., Nikulin A.I., Pyatikrestovskiy K.P. *Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnykh konstruktsov pri zaproektnykh vozdeistviyakh* [Strength and deformability of reinforced concrete structures under design impacts]. Moscow, ASV Publ., 2004. 216 p. (In Russ.).

4. Kolchunov V.I., Androsova N.B., Klyuyeva N.V., Bukhtiyarova A.S. *Zhivuchest' zdaniy i sooruzheniy pri zaproektnykh vozdeistviyakh* [Survivability of buildings and structures under beyond design impacts]. Moscow, ASV Publ., 2014. 208 p. (In Russ.).

5. Fengwei S., Wang L., Dong S. Progressive collapse assessment of the steel moment-frame with composite floor slabs based on membrane action and energy equilibrium. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 2017, no. 11(1), pp. 200-215. <https://doi.org/10.2174/1874836801711010200>.

6. Kolchunov V.I., Savin S.Yu. Survivability criteria for reinforced concrete frame at loss of stability. *Magazine of Civil Engineering*, 2018, no. 80(4), pp. 73-80. <https://doi.org/10.18720/MCE.80.7>.

7. Semenov A.A., Poryvayev I.A., Kuznetsov D.V., Nguyen T.Kh., Saitgalina A.S., Tregubova Ye.S. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie vysotnogo zdaniya pri vetrovom vozdeistvii i progressiruyushchem obrushenii [Stress-strain state of high-rise building under wind load and progressive collapse]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy = Construction of Unique Buildings and Structures*, 2017, no. 59(8), pp. 7-26 (In Russ). <https://doi.org/10.18720/CUBS.59.1>.

8. Travush V.I., Fedorova N.V. Survivability of structural systems of buildings with special effects. *Magazine of Civil Engineering*, 2018, no. 81(5), pp. 73-80. <https://doi.org/10.18720/MCE.81.8>.

9. Serpik I.N., Mironenko I.V. Metodika otsenki nagruzhennosti konstruktsov pri zaproektnykh vozdeistviyakh s uchetom nelineinoy raboty materialov [The method for esti-

mation of stress loading of structures at emergency actions with account of materials nonlinearity]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya = Construction and Reconstruction*, 2012, no. 42(4), pp. 54-60 (In Russ).

10. Chen C.H., Zhu Y.F., Yao Y., Huang Y. Progressive collapse analysis of steel frame structure based on the energy principle. *Steel and Composite Structures*, 2016, no. 21(3), pp. 553-571. <http://dx.doi.org/10.12989/scs.2016.21.3.553>.

11. Szyniszewski S., Krauthammer T. Energy flow in progressive collapse of steel framed buildings. *Engineering Structures*, 2012, no. 42, pp. 142-153. <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.04.014>.

12. Gerasimidis S., Sideri J. A new partial-distributed damage method for progressive collapse analysis of steel frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, no. 119, pp. 233-245. <http://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.12.012>.

13. Kim H.S., Ahn J.G., Ahn H.S. Numerical simulation of progressive collapse for a reinforced concrete building. *Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2013, no. 7(4), pp. 272-275. <http://doi.org/10.5281/zenodo.1060737>.

14. Serpik I.N., Kurchenko N.S., Alekseytsev A.V., Lagutina A.A. Analiz v geometricheski, fizicheski i konstruktivno nelineinoi postanovke dinamicheskogo povedeniya ploskikh ram pri zaproektnykh vozdeistviyakh [Analysis of the dynamic behavior of plane frames at emergency actions considering geometrical, material and structural nonlinearities]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*, 2012, no. 10, pp. 49-51 (In Russ.).

15. Stephen D., Lam D., Forth J., Ye J., Tsavdaridis K.D. An evaluation of modeling approaches and column removal time on progressive collapse of building. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, no. 153, pp. 243-253. <http://doi.org/10.1016/J.JCSR.2018.07.019>.

16. Serpik I.N., Alekseytsev A.V. Optimizatsiya ramnykh konstruktssii s uchetom vozmozhnosti zaproektnykh vozdeistvii [Optimization of frame structures with possibility of emergency actions]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal = Magazine of Civil Engineering*, 2013, no. 44(9), pp. 23-29 (In Russ). <http://doi.org/10.5862/MCE.44.3>.

17. Elsanadedy H.M., Almusallam T.H., Al-Salloum Y.A., Abbas H. Investigation of precast RC beam-column assemblies under column-loss scenario. *Construction and Building Materials*, 2017, no. 142, pp. 552-571. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.120>.

18. Tsai M.-H. An approximate analytical formulation for the rise-time effect on dynamic structural response under column loss. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2018, no. 18(3), pp. 1850038. <http://doi.org/10.1142/s0219455418500384>.

19. Feng D.-C., Wang Z., Wu G. Progressive collapse performance analysis of precast reinforced concrete structures. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2019, no. 28(5), pp. e1588. <https://doi.org/10.1002/tal.1588>.

20. Ventura A., De Biagi V., Chiaia B. Structural robustness of RC frame buildings under threat-independent damage scenarios. *Structural Engineering and Mechanics*, 2018, no. 6(65), pp. 689-698. <https://doi.org/10.12989/sem.2018.65.6.689>.
21. Mohamed O., Khattab R. Assessment of progressive collapse resistance of steel structures with moment resisting frames. *Buildings*, 2019, no. 9(1), pp. 19. <https://doi.org/10.3390/buildings9010019>.
22. Kolchunov V.I., Fedorova N.V., Savin S.Yu., Kovalev V.V., Iliushchenko T.A. Failure simulation of a RC multi-storey building frame with prestressed girders. *Magazine of Civil Engineering*, 2019, no. 92(8), pp. 155-162. <https://doi.org/10.18720/MCE.92.13>.
23. Jiang, H., Wang, J., Chorzepa, M. G., Zhao, J. Numerical investigation of progressive collapse of a multispan continuous bridge subjected to vessel collision. *Journal of Bridge Engineering*, 2017, no. 22(5), pp. 04017008. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001037](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001037).
24. Cai J., Xu Y., Zhuang L., Feng J., Zhang J. Comparison of various procedures for progressive collapse analysis of cable-stayed bridges. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 2012, no. 13(5), pp. 323-334. <https://doi.org/10.1631/jzus.a1100296>.
25. Bathe K.J. Finite element procedures. Watertown, MA, USA, 2016.
26. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Fox D. The finite element method for solid and structural mechanics. Elsevier, Oxford, 2014.
27. Papageorgiou A.V., Gantes C.J. Equivalent modal damping ratios for concrete/steel mixed structures. *Computers & Structures*, 2010, no. 88(19-20), pp. 1124-1136. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruc.2010.06.014>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Серпик Игорь Нафтольевич,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой прикладной механики
и физики, Брянский государственный
инженерно-технологический университет,
г. Брянск, Российская Федерация,
e-mail: inserpik@gmail.com

Igor N. Serpik, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Head of the Applied Mechanics and
Physics, Department, Bryansk State Engineering
Technological University,
Bryansk, Russian Federation,
e-mail: inserpik@gmail.com

Тарасова Наталья Владимировна,
старший преподаватель, аспирант, Брянский
государственный инженерно-технологический
университет, г. Брянск, Российская Федерация,
e-mail: tarasova_natalie@mail.ru

Natalya V. Tarasova, Senior Lecturer,
Post-Graduate Student, Bryansk State
Engineering Technological University,
Bryansk, Russian Federation,
e-mail: tarasova_natalie@mail.ru

Рекурсивный алгоритм формирования структурированных множеств информационных блоков для повышения скорости выполнения процедур определения их источника

М. О. Таныгин¹ ✉, Х. Я. А. Алшаиа¹, В. П. Добрица¹, О. Г. Добросердов¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: tanygin@yandex.com

Резюме

Цель исследования. Для некоторых классов современных информационных систем выполнение известных алгоритмов преобразования данных при проведении процедур идентификации и аутентификации источника данных затруднено из-за ограничений на длительность полного цикла обработки данных. В статье рассматривается алгоритм выполнения процедуры определения источников для группы блоков данных, позволяющий за счёт изменения порядка выполнения типовых операций обнаруживать возникающие ошибки раньше, чем обычные итерационные алгоритмы формирования древовидных структур. Целью работы является снижение вычислительных и ресурсных затрат на выполнение приёмником процедур идентификации источников групп блоков данных, каждый из которых обладает размером, не превышающим несколько байтов.

Методы. В основе рассматриваемого метода идентификации лежит рекурсивный алгоритм формирования древовидной структуры из блоков поступающей информации и последующий анализ ветвей такой структуры. Это позволяет определить подмножество блоков, сформированных целевым источником. В статье приведено формальное математическое описание алгоритма, а также представлены результаты проведённого имитационного моделирования процедур определения источника. При этом характеристики рекурсивного алгоритма сравнивались с аналогичными, полученными для известного итерационного.

Результаты. Полученные в результате имитационного моделирования зависимости между средним числом типовых операций сравнения хешей, средним числом сформированных ветвей древовидной структуры блоков и числом принятых блоков позволили сформулировать критерии применения рекурсивного и итерационного алгоритмов.

Заключение. В работе показано, что применение рекурсивного алгоритма формирования древовидной структуры кадров позволяет снизить среднее число выполняемых приёмником типовых операций на 5 – 10 % и уменьшить затраты памяти для хранения ветвей такой структуры на величину до 30%.

Ключевые слова: передача данных; приёмник сообщений; идентификация; рекурсия; вычислительная сложность; быстроедействие; имитационное моделирование.

© Таныгин М.О., Алшаиа Х.Я.А., Добрица В.П., Добросердов О.Г., 2021

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Рекурсивный алгоритм формирования структурированных множеств информационных блоков для повышения скорости выполнения процедур определения их источника / М.О. Таныгин, Х.Я.А. Алшаа, В.П. Добрица, О.Г. Добросердов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(2): 51-64. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-2-51-64>.

Поступила в редакцию 02.04.2021

Подписана в печать 27.04.2021

Опубликована 24.08.2021

Recursive Algorithm for Forming Structured Sets of Information Blocks to Increase the Speed of Their Source Determination Procedures

Maxim O. Tanygin ¹ ✉, Hayder Y. A. Alshaea ¹, Vyacheslav P. Dobritsa ¹,
Oleg G. Dobroserdov ¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: tanygin@yandex.com

Abstract

Purpose of research. In some classes of information systems, it is impossible to use well-known algorithms for the identification and the authentication the data blocks sources. The reason for this is the duration of the full data processing cycle. The article considers the original algorithm for determining sources for a group of data blocks. It allows you to detect errors faster than the usual iterative algorithm for forming tree structures of blocks by changing the order of base operations. The purpose of the work is to reduce the computational and resource costs for the receiver to perform identification the sources of blocks, each of them has a size not exceeding a few bytes.

Methods. The identification method based on the forming a tree structure of incoming information blocks and subsequent analysis of tree branches. It allows selecting a chain of blocks formed by the target source. In the article the formal description of the algorithm is given. The results of the simulation of the procedures for determining the source are presented. In this case, the characteristics of the recursive algorithm were compared with those obtained for the known iterative one.

Results. The relationships between the average number of typical hash comparison operations, the average number of tree structure branches, and the number of accepted blocks obtained as a result of simulation modeling. This made it possible to determine the conditions for applying the recursive and iterative algorithms.

Conclusion. It is shown that the using of a recursive algorithm for forming a tree structure of frames can reduce the average number of base operations performed by the receiver by 5-10 % and reduce the memory cost for storing tree structure branches by up to 30%.

Keywords: data transmission; message receiver; identification; recursion; computational complexity; performance; simulation.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Tanygin M. O., Alshaea H. Y. A., Dobritsa V. P., Dobroserdov O. G. Recursive Algorithm for Forming Structured Sets of Information Blocks to Increase the Speed of Their Source Determination Procedures. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(2): 51-64 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-2-51-64>.

Received 02.04.2021

Accepted 27.04.2021

Published 24.08.2021

Введение

Взаимная идентификация и аутентификация является неотъемлемой частью любого протокола информационного обмена по открытым каналам связи. Алгоритмы, используемые в этих процедурах, подразумевают выполнение множества арифметико – логических операций над передаваемыми данными для обеспечения требуемой достоверности [1]. При этом зачастую требование по достоверности аутентификации вступает в противоречие с требованием по скорости её выполнения [2, 3]. Особенно это актуально для современных роботизированных автономных систем, где важна скорость обработки управляющей информации и энергетические затраты, которыми сопровождается такая обработка. Последнее ограничение, например, существенно влияет на выбор алгоритмов криптографических преобразований в современных беспилотных летающих аппаратах [4], где чрезвычайно важны весовые характеристики вычислительного блока и элементов питания [5]. Кроме того, Это обуславливает актуальность задачи поиска новых методов и алгоритмов и технических решений для выполнения процедур идентификации и аутентификации, которые бы обеспечивали высокую скорость обработки информации, и, что особенно важно, воз-

можность адаптировать целевые характеристики процедур информационного обмена в зависимости от реальной интенсивности информационного потока между удалёнными субъектами.

Материалы и методы

Исследуемым методом аутентификации удалённых субъектов, обменивающихся данными по протоколам с ограниченным размером кадра информации, является метод, основанный на формировании из кадров, обрабатываемых приёмником, цепочек, связанных друг с другом результатом выполнения над их данными различных операций [6 – 9]. Так как в реальных условиях приёмник обрабатывает данные не только от целевого источника, для которого выполняется аутентификация, но и данные от десятков и даже сотен других источников, то возможно возникновение ошибок, связанных с возможностью случайного совпадения хешей блоков разных источников [10, 11]. При этом формируется множество $W = \{w_1, \dots, w_N\}$ цепочек, лишь одна из которых представлена блоками целевого источника, а остальные – блоками произвольного множества источников.

Если объединить повторяющиеся элементы таких N цепочек, то можно получить древовидную структуру, показанную на рис. 1.

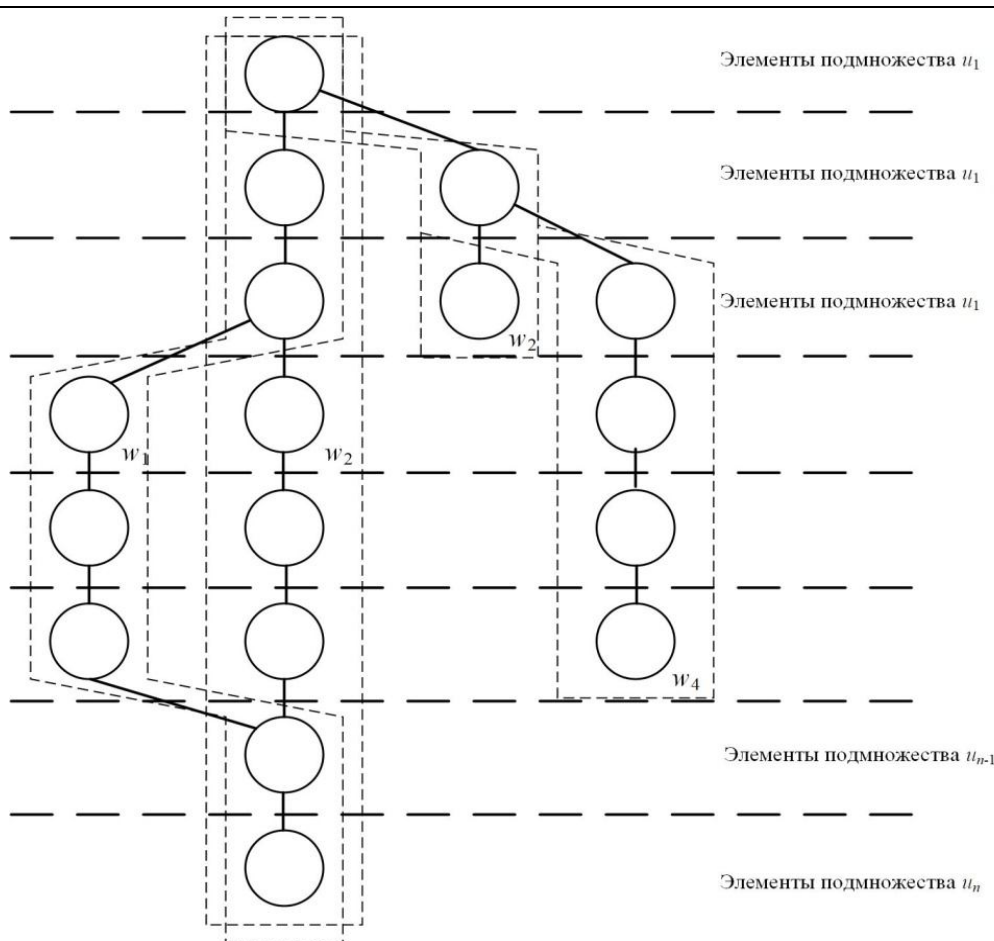


Рис. 1. Схема древовидной структуры блоков данных

Fig. 1. Tree structure of data blocs

Критерием того, что цепочка w_i сформирована целевым источником, является то, что её длина равна некоторому значению n – параметру, который определяется протоколом передачи блоков данных и известен и приёмнику и отправителю. В случае единственности такой ветви, она признаётся множеством блоков от целевого источника. Во всех остальных случаях (несколько цепочек удовлетворяют указанному выше условию, или не удовлетворяет ни одна) считается, что блоки переданы с ошибкой.

Предваряет процедуру анализа разбиение множества U блоков данных на непересекающиеся подмножества $u_1, u_2, \dots$,

u_n блоков, с различным индексом – позицией блока в цепочке сообщений:

$$\forall s \in U, f^{\text{ind}}(s) = i \rightarrow s \in u_i, i = 1 \dots n \quad (1)$$

где f^{ind} – операция выделения индекса блока.

Кроме вышеописанной, базовыми для выполнения процедуры построения цепочек информационных блоков являются следующие операции: f^{sh} – выделения хеша пакета и F^{hash} – вычисления хеш-функции из данных.

Разбиение всего множества буферизированных блоков на подмножества можно выполнять на этапе предобработки данных блока, проверки их целостности, и она не оказывает значи-

тельного воздействия на трудоёмкость процедуры определения источника [12].

Дальнейшая процедура формирования древовидной структуры может быть реализована двумя способами:

– выполнением итераций по добавлению в структуру элементов последовательно из множеств $u_1, u_2, \dots, u_n$, в результате формирование дерева происходит «сверху вниз»;

– прохождением каждой ветви древовидной структуры до её окончания, путём последовательного формирования каждого подмножества множества W , в результате формирование дерева происходит «слева направо» [13].

Для реализации первого метода можно использовать последовательный перебор всего множества блоков данных с включением очередного блока на соответствующую позицию в дереве. Его особенностью является то, что проверка длины ветвей значению n возможна только после окончания формирования древовидной структуры информационных блоков, описываемой множеством W .

Для реализации второго метода требуется рекурсивный алгоритм прохода дерева в глубину, который сложнее в аппаратной реализации, но обладает преимуществами, которые будут рассмотрены ниже. В его реализации подмножества $u_1, u_2, \dots, u_n$ передаются в качестве параметров в рекурсивную процедуру формирования цепочек. В качестве параметров такой процедуры выступают также:

i_{chain} – текущий номер ветви;

i_{ind} – текущий анализируемый индекс;

k – номер анализируемого блока в каком-либо из подмножеств $u_1, u_2, \dots, u_n$.

На начальном этапе $N=1$, $i_{\text{chain}} = 1$, $i_{\text{ind}} = 1$, $k = 1$ $w_1 = \{s_{\text{start}}\}$, где s_{start} – стартовый блок цепочки блоков источника. Считаем, что он однозначно выделяется из множества анализируемых приёмником блоков [14].

Сам рекурсивный алгоритм состоит из следующих основных этапов:

1. Получаем значения $\{i_{\text{chain}}, i_{\text{ind}}, k\}$. Обнуляем счётчик совпадений m .

2. Повторяем цикл от $j = 0$ до $j = |u_{i_{\text{ind}}}|$ с шагом 1. По окончании переходим к пункту 10.

3. Если $F^{\text{hash}}(u_{i_{\text{ind}}+1}^{(k)}) = f^{\text{hash}}(u_{i_{\text{ind}}}^{(j)})$, то переходим к пункту 4, иначе к пункту 9.

4. Инкрементируем m .

5. Если $m > 1$, то переходим к пункту 6, иначе – к пункту 8

6. Инкрементируем N , формируем множество $w_N = \{w_{i_{\text{chain}}}^{(1)}, \dots, w_{i_{\text{chain}}}^{(l)}\}$,

$$l = |w_{i_{\text{chain}}}|, w_N^{(l+1)} = u_{i_{\text{ind}}+1}^{(k)}.$$

7. Если $i_{\text{ind}} > 1$, то вызываем рекурсивную процедуру с параметрами $\{N, i_{\text{ind}} + 1, j\}$. Переходим к пункту 9.

8. Вызываем рекурсивную процедуру с параметрами $\{i_{\text{chain}}, i_{\text{ind}} + 1, j\}$. Переходим к пункту 9.

9. Конец цикла. Переход к пункту 2.

10. Конец процедуры.

Трудоёмкость обоих рассматриваемых методов одинакова, так как для формирования множества W количество операций сравнения хешей определяется только числом элементов множества U , которые войдут в состав древовидной структуры (см. рис. 1).

В соответствии с описанным выше алгоритмом формирования древовидной структуры информационных блоков, ошибки передачи блоков возможны, когда как минимум два сформированных подмножества w_i и w_j , $i \neq j$, $|w_i| = |w_j|$, отличаются одним или не-

сколькими блоками, расположенными в середине:

$$w_i \cap w_j = \{w_i^{(k)}, \dots, w_j^{(k+L)}\}, 1 < k < n, (2)$$

где L – длина отличающегося фрагмента двух ветвей.

Предположим, подмножество w_i сформировано полностью из блоков целевого устройства. Тогда подмножество w_j будем называть посторонним относительно w_i . Пример подобных ветвей, отличающихся лишь фрагментами, показан на рис. 2, где серым тоном выделены участки из блоков посторонних источников.

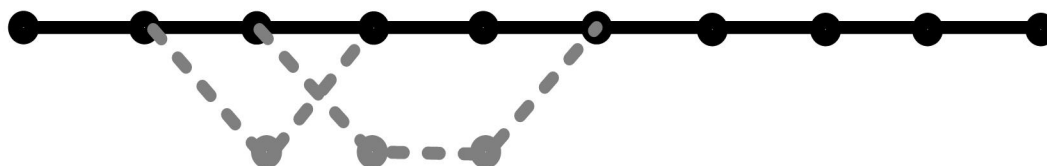


Рис. 2. Пример формирования посторонних ветвей

Fig. 2. Example of forming extraneous branches

Таким образом, если к произвольному этапу реализации рекурсивного алгоритма сформировано более чем одно подмножество длины n , и их количество не уменьшается (альтернативный алгоритм формирования графа «сверху вниз» может предусматривать отбрасывание ветвей, которые не дополняются блоками очередного подмножества u_i , $i = \overline{0, K \cdot n - 1}$), то ошибка уже возникла, и дальнейшая реализация алгоритма не имеет смысла. Это является теоретической предпосылкой к увеличению скорости обнаружения ошибочной передачи цепочки блоков данных. Кроме того, при формировании древовидной структуры (см. рис. 1) необходимо организо-

вывать хранение сформированных цепочек блоков во внутренней памяти приёмника [15]. При использовании алгоритма формирования цепочек «сверху вниз» [16] необходимо хранить все цепочки до момента окончательного построения всего дерева, тогда как при рекурсивном алгоритме среднее число хранящихся цепочек будет меньше, так как после обнаружения ошибки новые цепочки формироваться не будут.

Для исследования эффекта, заключающегося в снижении среднего числа элементарных операций сравнения хешей и числа задействованных блоков памяти, оба алгоритма были реализованы на языке высокого уровня. Разрабо-

танное программное средство формировало статистику по исследуемым параметрам на основе 10^4 циклов реализации алгоритма над случайно сформированным в каждом цикле множеством информационных блоков U . Такое количество опытов позволяет судить по среднему значению наблюдаемых параметров об их математическом ожидании с точностью 10^{-3} [17, 18]. Изменяемым параметром при имитационном моделировании, помимо мощности множества U и числа блоков в сообщении целевого источника n , был размер H поля хеша, выделяемого операцией $f^{\text{hash}}(u)$.

Результаты и их обсуждение

Полученные в результате имитационного моделирования зависимости между средним числом операций сравнения хешей T , средним числом сформиро-

ванных в приёмнике ветвей древовидной структуры N и числом анализируемых блоков $|U|$ для обоих рассматриваемых алгоритмов приведены на рис. 3 и 4. Графики построены для одного значения длины поля хеша H , но аналогичная картина наблюдается и при других значениях параметра H : при небольшом числе анализируемых блоков разница в вычислительных и ресурсных затратах для алгоритма незначительна, тогда как с ростом значения $|U|$ наблюдается всё больший выигрыш при использовании рекурсивного алгоритма. Более ярко он выражен в числе сформированных ветвей древовидной структуры. Это объясняется тем, что рекурсивный алгоритм прекращает свою работу при формировании двух ветвей длиной n , тогда как алгоритм формирования древовидной структуры «сверху вниз» продолжает свою работу

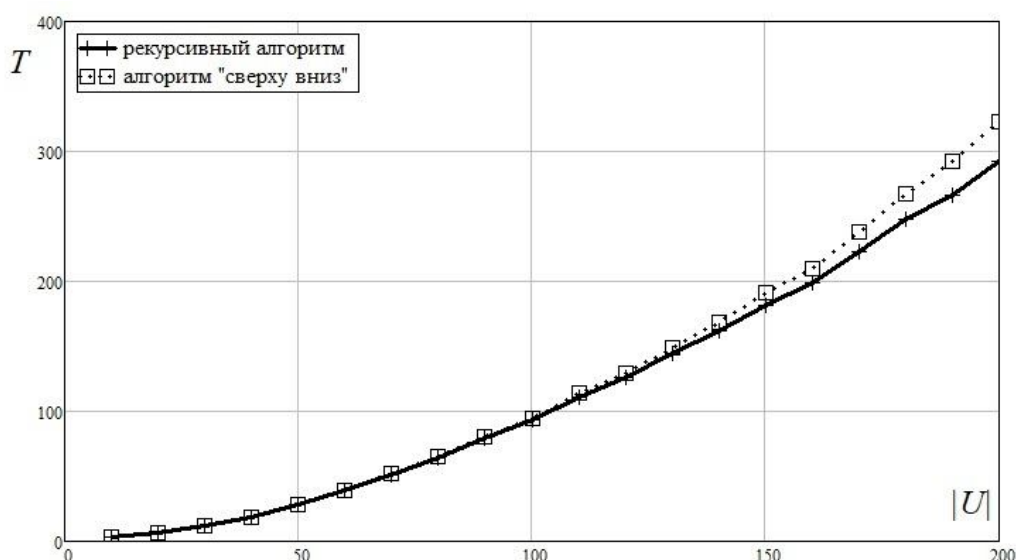


Рис. 3. Зависимость T среднего числа операций сравнения хешей от мощности множества анализируемых блоков U

Fig. 3. Dependence of the average number of hash comparison operations T on the power of the analyzed blocks set U

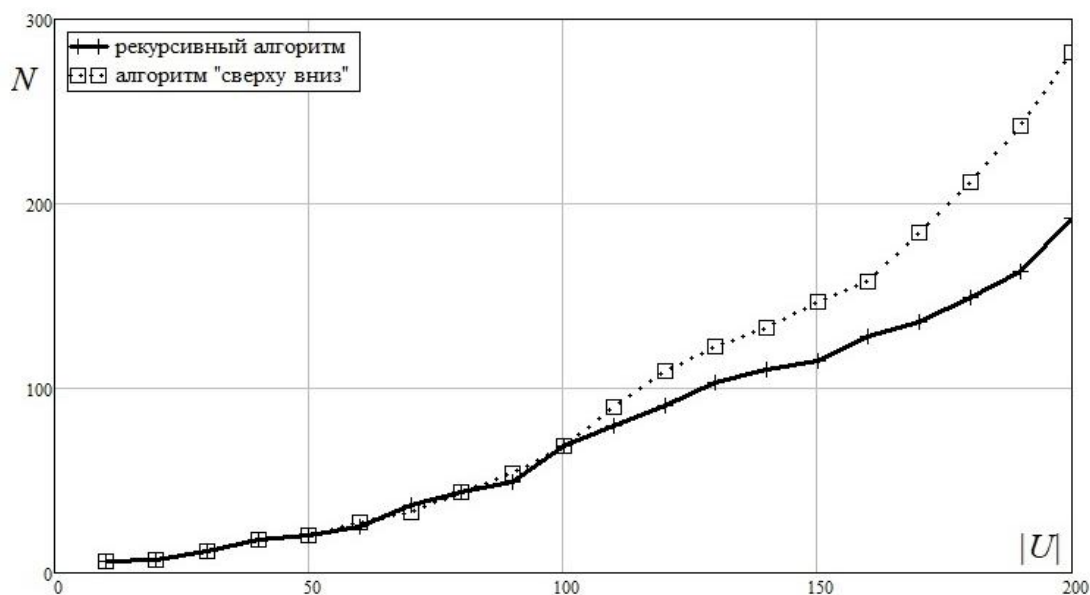


Рис. 4. Зависимость N среднего числа ветвей древовидной структуры от мощности множества анализируемых блоков U

Fig. 4. Dependence N of the average number of branches of the tree structure on the power of the analyzed blocks set U

Так как между достоверностью выполнения процедур идентификации источников и числом анализируемых блоков $|U|$ существует зависимость, то с точки зрения практического использования представляет интерес зависи-

мость между затратами на реализацию алгоритмов и наблюдаемой частотой возникновения ошибок. Данная зависимость (в части затрат памяти на хранение множества ветвей древовидной структуры) приведена на рис. 5.

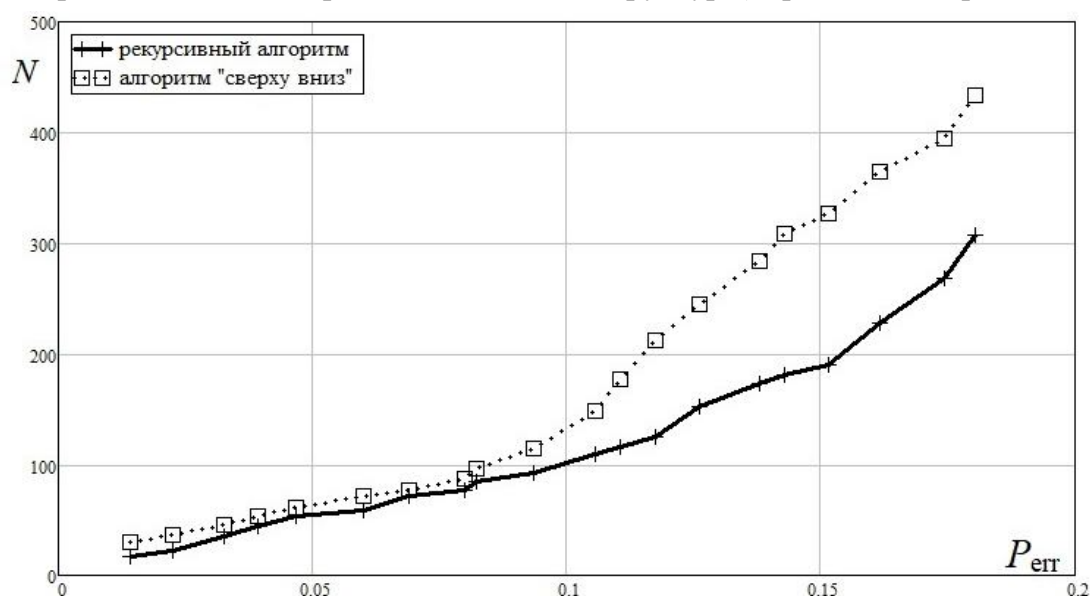


Рис. 5. Зависимость N среднего числа ветвей древовидной структуры от вероятности ошибки определения источника данных P_{err}

Fig. 5. Dependence N of the average number of branches of the tree structure on the probability of the data source identification error P_{err}

Видно, что эффект от применения рекурсивного алгоритма начинает проявляться с вероятности ошибки $P_{\text{err}} > 0,07$. В диапазоне $P_{\text{err}} > 0,15$ число формируемых посторонних ветвей в рекурсивном алгоритме не превышает 70% от аналогичного числа ветвей при использовании стандартного итерационного алгоритма.

Выводы

Результаты проведённых исследований позволяют утверждать, что использование описанного рекурсивного алгоритма формирования древовидных структур данных в системах определения источников информации для групп блоков целесообразно при большом числе анализируемых блоков и при больших значениях наблюдаемых ошибок идентификации (превышающих 0,07). При этом среднее число выполняемых типовых операций снижается на 5 – 10 % по сравнению с обычным итерационным алгоритмом формирования древовидных структур, а число ветвей в таких структурах снижается на 20–30%. Для меньшей интенсивности возникновения ошибок его использование нецелесообразно, так как реализация рекурсии по сравнению с реализацией обычного итерационного алгоритма требует усложнения структуры микропрограммного устройства управления в приёмнике. Это усложнение будет выражено в необходимости определения дополнительных команд микропрограммы, обеспечивающих вызов под-

программ [19], а также организацию дополнительной стековой памяти в устройстве управления [20]. При этом размер такого стека должен быть достаточен для рекурсии максимальной глубиной n – длине множества блоков данных, для которых производится определение источника. Поэтому, если приёмник проектируется для работы на протоколах, предусматривающих высокую достоверность определения источника (вероятность ошибки передачи меньше 0,05) [21], то в нём целесообразно использовать обычный итерационный алгоритм формирования древовидных структур. Сопоставление характеристик итерационного и рекурсивного алгоритма при различных значениях вероятности ошибки идентификации приведено в табл. 1. За единицу принято число операций сравнения хеша и количество блоков памяти, требуемых для хранения древовидной структуры при использовании итерационного алгоритма.

Кроме этого, полученные результаты подтверждает тезис о зависимости между сложностью древовидной структуры, формируемой в приемнике при проведении процедуры идентификации источника, и вероятностью возникновения ошибок. Это является экспериментальным обоснованием возможности синтеза алгоритмов обнаружения ошибок на основе анализа лишь числа ветвей древовидной структуры до момента построения ветвей длиной n .

Таблица 1. Сравнение алгоритмов формирования древовидной структуры**Table 1.** Comparison of algorithms for forming a tree structure

Тип алгоритма формирования древовидной структуры блоков данных / Type of algorithm for forming a tree structure of data blocks	Вероятность возникновения ошибки определения источника данных P_{err} / The probability of the data source determining error P_{err}				Дополнительные требования к организации приёмника данных / Additional requirements for the data receiver organization
	$P_{\text{err}} \leq 0,07$		$P_{\text{err}} > 0,07$		
	Число сравнений хешей / Number of hash comparisons	Число блоков памяти для хранения древовидной структуры / The number of memory blocks for storing the tree structure	Число сравнений хешей / Number of hash comparisons	Число блоков памяти для хранения древовидной структуры / The number of memory blocks for storing the tree structure	
Итерационный	T	N	T	N	отсутствуют
Рекурсивный	$\approx T$	$< 0.9 \cdot N$	от $0.9 \cdot T$ до $0.95 \cdot T$	$< 0.8 \cdot N$	требуется организация вызова подпрограмм в микропрограммном устройстве управления

Реализация таких алгоритмов позволит дополнительно повысить скорость обнаружения ошибок, снизив число вы-

полняемых приёмником типовых операций сравнения хешей.

Список литературы

1. Мальчуков А.Н., Осокин А.Н. Система автоматизированного проектирования кодеров помехоустойчивых кодов короткой длины // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 312. № 5. С. 70-75.

2. Мыцко Е.А., Мальчуков А.Н., Иванов С.Д. Исследование алгоритмов вычисления контрольной суммы CRC8 в микропроцессорных системах при дефиците ресурсов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2018. № 6. С. 22-29.

3. Xie J., Pan X. An improved rc4 stream cipher // International Conference on Computer Application and System Modeling. 2010. [https://doi.org/ 10.1109/IC-CASM.2010.5620800](https://doi.org/10.1109/IC-CASM.2010.5620800)

4. Zhang W., Gong X., Han G. An improved ant colony algorithm for path planning in one scenic area with many spots // Mathematical Problems in Engineering. 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/7672839>

5. Allouch A., Cheikhrouhou O., Koubaa A. MAVSec: Securing the MAVLink Protocol for Ardupilot/PX4 Unmanned Aerial Systems // International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC). Morocco. 2019. [https://doi.org/ 10.1109/IWCMC.2019.8766667](https://doi.org/10.1109/IWCMC.2019.8766667)

6. Iwata T., Kurosawa K. OMAC: one-key CBC MAC // Fast Software Encryption. 2003. P. 129 – 53.

7. Liu C., Ji J., Liu Z. Implementation of DES Encryption Arithmetic based on FPGA // AASRI Procedia. 2013. Vol. 5. P. 209–213.

8. Black J., Rogaway P. CBC MACs for arbitrary-length messages: The three-key constructions // J. Crypto. 2015. Vol. 18. №2. P. 111–131.

9. Stallings W. NIST Block Cipher Modes of Operation for Confidentiality // Cryptologia. 2010. № 34(2). P. 163 – 175.

10. Ben Othman S., Alzaid H., Trad A., & Youssef, H. An efficient secure data aggregation scheme for wireless sensor networks. IISA 2013. [https://doi.org/ 10.1109/iisa.2013.6623701](https://doi.org/10.1109/iisa.2013.6623701)

11. Fangfang Dai, Yue Shi, Nan Meng, Liang Wei and Zhiguo Ye From Bitcoin to Cybersecurity: a Comparative Study of Blockchain Application and Security Issues // The 2017 4th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI 2017). Hangzhou, China 2017.

12. Левитин А. В. Алгоритмы. Введение в разработку и анализ. М.: Вильямс, 2006. 576 с.

13. Алгоритмы. Построение и анализ / Т. Х. Кормен, Ч. И. Лейзерсон, Р. Л. Ривест, К. Штайн. М.: Вильямс, 2019. 1328 с.

14. Таныгин М.О., Алшаиа Х.Я., Алтухова В.А. Об одном методе контроля целостности передаваемой поблоково информации // Телекоммуникации. 2019. № 3. С. 12-21.

15. Таныгин М.О., Алшаиа Х.А., Добрица В.П. Оценка влияния организации буферной памяти на скорость выполнения процедур определения источника сообщений // Труды МАИ. 2020. № 5(114). С.15.

16. Таныгин М.О. Теоретические основы идентификации источников информации, передаваемой блоками ограниченного размера. Курск, 2020. 198 с.
17. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. СПб.: Питер, 2004. 874 с.
18. Строгалева В.П., Толкачев И.О. Имитационное моделирование. М.: МГТУ им. Баумана, 2008. 279 с.
19. Хоровиц П. Искусство схемотехники. Т. 1. М.: Медиа, 2012. 600 с.
20. Таненбаум Э., Остин Т. Архитектура компьютера. СПб.: Питер, 2012. 816 с.
21. Предварительный национальный стандарт РФ. Информационные технологии. Интернет вещей. Протокол обмена для высокоскоростных сетей с большим радиусом действия и низким энергопотреблением. URL: <http://docs.cntd.ru/document/554596382> (дата обращения 15.03.2021).

References

1. Malchukov A.N., Osokin A.N. Sistema avtomatizirovannogo proektirovaniya kodekov pomexoustojchivyyh kodov korotkoj dliny [Computer-aided design system for short-length noise-resistant codecs]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 312, no. 5, pp. 70-75 (In Russ.).
2. Mycko E.A., Mal'chukov A.N., Ivanov S.D. Issledovanie algoritmov vychisleniya kontrol'noj summy CRC8 v mikroprocessornyyh sistemah pri deficite resursov [Investigation of algorithms for calculating the CRC8 checksum in microprocessor systems with a shortage of resources]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika = Instruments and Systems: Monitoring, Control and Diagnostics*, 2018, no. 6, pp. 22-29 (In Russ.).
3. Xie J., Pan X. An improved rc4 stream cipher. *International Conference on Computer Application and System Modeling*. 2010. <https://doi.org/10.1109/IC-CASM.2010.5620800>
4. Zhang W., Gong X., Han G. An improved ant colony algorithm for path planning in one scenic area with many spots. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/7672839>
5. Allouch A., Cheikhrouhou O., Koubaa A. MAVSec: Securing the MAVLink Protocol for Ardupilot/PX4 Unmanned Aerial Systems. *International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*. Morocco, 2019. <https://doi.org/10.1109/IWCMC.2019.8766667>
6. Iwata T., Kurosawa K. OMAC: one-key CBC MAC. *Fast Software Encryption*. 2003, pp. 129 – 53.
7. Liu C., Ji J., Liu Z. Implementation of DES Encryption Arithmetic based on FPGA. *AASRI Procedia*, 2013, vol. 5, pp. 209–213.

8. Black J., Rogaway P. CBC MACs for arbitrary-length messages: The three-key constructions. *J. Cryptol*, 2015, vol. 18, no.2, pp. 111–131.
9. Stallings W. NIST Block Cipher Modes of Operation for Confidentiality. *Cryptologia*, 2010, no. 34(2), pp. 163 – 175.
10. Ben Othman S., Alzaid H., Trad A., Youssef H. An efficient secure data aggregation scheme for wireless sensor networks. IISA, 2013. [https://doi.org/ 10.1109/iisa.2013.6623701](https://doi.org/10.1109/iisa.2013.6623701)
11. Fangfang Dai, Yue Shi, Nan Meng, Liang Wei and Zhiguo Ye From Bitcoin to Cybersecurity: a Comparative Study of Blockchain Application and Security Issues. *The 2017 4th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI 2017)*. Hangzhou, China 2017.
12. Levitin A. V. *Algoritmy. Vvedenie v razrabotku i analiz* [Introduction to development and analysis]. Moscow, Vil'yams Publ., 2006. 576 p. (In Russ.).
13. Kormen T. H., Lejzerson CH. I., Rivest R. L., Shtajn K. *Algoritmy. Postroenie i analiz* [Algorithms. Construction and analysis]. Moscow, Vil'yams Publ., 2019. 1328 p. (In Russ.).
14. Tanygin M.O., Alshaia H.YA., Altuhova V.A. Ob odnom metode kontrolya celostnosti peredavae-moj poblokovo informacii [On one method of controlling the integrity of the information transmitted by the block]. *Telekommunikacii = Telecommunications*, 2019, no. 3, pp. 12-21 (In Russ.).
15. Tanygin M.O., Alshaia H.A., Dobrica V.P. Ocenka vliyaniya organizacii bufernoj pamyati na skorost' vypolneniya procedur opredeleniya istochnika soobshchenij [Assessment of the impact of the organization of the buffer memory to the speed of the procedures for determining the source of the message]. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*, 2020, no. 5(114), p.15 (In Russ.).
16. Tanygin M.O. *Teoreticheskie osnovy identifikacii istochnikov informacii, peredavaemoj blokami ogranichenного razmera* [Theoretical bases of identification of sources of information transmitted blocks of limited size]. Kursk, 2020. 198 p. (In Russ.).
17. Kelton V., Lou A. *Imitacionnoe modelirovanie* [Simulation modeling]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2004. 874 p. (In Russ.).
18. Strogalev V.P., Tolkacheva I.O. *Imitacionnoe modelirovanie* [Simulation modeling]. Moscow, MGTU im. Bauman Publ., 2008. 279 p. (In Russ.).
19. Horovitz P. *Iskusstvo skhemotekhniki* [The art of circuit engineering]. Moscow, 2012. 600 p. (In Russ.).
20. Tanenbaum E., Ostin T. *Arhitektura komp'yutera* [Computer Architecture]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2012. 816 p. (In Russ.).

21. Predvaritel'nyj nacionalnyj standart RF. Informacionnye tekhnologii. Internet veshchej. Protokol obmena dlya vysokoemkih setej s bolshim radiusom dejstviya i nizkim energopotrebleniem [Preliminary National Standard of the Russian Federation. Information technologies. The Internet of Things. Exchange protocol for high-capacity networks with a long range and low power consumption]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/554596382> (accessed 15.03.2021) (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Таныгин Максим Олегович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Информационная безопасность», Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация.
e-mail: tanygin@yandex.ru

Maxim O. Tanygin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor Head of Information Security Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: tanygin@yandex.ru

Хайдер Яхья Алшаана, аспирант кафедры «Информационная безопасность», Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация.
e-mail: haiderhy7@gmail.com

Hayder Yahja Alshaeaa, Post-Graduate of Information Security Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: haiderhy7@gmail.com

Добрица Вячеслав Порфирьевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Информационная безопасность», Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: dobritsa@mail.ru

Vjacheslav P. Dobritsa, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Information Security Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: dobritsa@mail.ru

Добросердов Олег Гурьевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: serfingk@yandex.ru

Oleg G. Dobroserdov, Dr. of Sci. (Engineering), Senior Research Associate, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: serfingk@yandex.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-2-65-82>

Математическая модель определения состава бинарных отношений и алгоритм умножения бинарных матриц

С.Н. Гвоздева ¹ ✉

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: svetka-gvozdeva@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Необходимость разработки математической модели определения состава бинарных отношений и аппаратно-ориентированного алгоритма умножения бинарных матриц, позволяющих обеспечить организацию параллельной обработки данных при определении состава бинарных отношений.

Методы. Процедура определения состава бинарных отношений заключается в следующем: на первом этапе выполняется определение отношения следования, для этого производится его транзитивное замыкание; определение отношения связи происходит после выяснения отношения следования; затем происходит выяснение отношения альтернативы; на завершающем этапе определения состава бинарных отношений выполняется выяснение отношения параллельности.

Результаты. В данной работе разработана математическая модель определения состава бинарных отношений и алгоритм умножения бинарных матриц. Новизной математической модели является введение бинарных отношений связи, альтернативы и параллельности вершин граф-схем параллельных алгоритмов в дополнение к отношению следования, известному в теории графов. Новизной алгоритма умножения бинарных матриц является сокращение числа итераций внутреннего цикла (по переменной k) при получении единичного значения на одной из итераций нахождения скалярного произведения двоичных векторов.

Заключение. Разработанная математическая модель бинарных отношений следования и связи вершин граф-схем параллельных алгоритмов позволяет обеспечить организацию параллельной обработки данных при определении состава бинарных отношений. На базе математической модели определения состава бинарных отношений разработан аппаратно-ориентированный алгоритм для умножения бинарных матриц, позволяющий перенести вычислительно сложные процедуры умножения бинарных матриц на аппаратный уровень. Разработанная математическая модель и алгоритм позволяют осуществить практическую реализацию устройств для умножения бинарных матриц с прерыванием внутреннего цикла.

Ключевые слова: бинарные отношения; матрица отношений; отношение следования; отношение связи; прерывание внутреннего цикла; отношение альтернативы; граф-схема алгоритма; отношение параллельности; умножение бинарных матриц.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Гвоздева С.Н. Математическая модель определения состава бинарных отношений и алгоритм умножения бинарных матриц // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(2): 65-82. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-2-65-82>.

Поступила в редакцию 23.04.2021

Подписана в печать 11.05.2021

Опубликована 24.08.2021

A Mathematical Model for Determining the Composition of Binary Relations and an Algorithm for Binary Matrices Multiplication

Svetlana N. Gvozdeva ¹ ✉

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: svetka-gvozdeva@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. The need for the development of a mathematical model for determining the composition of binary relations and a hardware-oriented algorithm for multiplying binary matrices that allow organizing parallel data processing when determining the composition of binary relations.

Methods. The procedure for determining the composition of binary relations is as follows: at the first stage, the definition of the sequence relation is performed, for this purpose its transitive closure is performed; the definition of the connection relation occurs after clarifying the sequence relation; then the alternative relation is clarified; at the final stage of determining the composition of binary relations, the parallelism relation is clarified.

Results. In this paper, a mathematical model for determining the composition of binary relations and an algorithm for multiplying binary matrices are developed. The novelty of the mathematical model is the introduction of binary relations of connection, alternative and parallelism of the vertices of flowgraphs of parallel algorithms in addition to the sequence relation known in the graph theory. The novelty of the binary matrix multiplication algorithm is the reduction of the number of iterations of the inner cycle (with respect to the variable k) when obtaining a single value at one of the iterations of determining the scalar product of binary vectors.

Conclusion. The developed mathematical model of binary relations of the sequence and connection of the vertices of flowgraphs of parallel algorithms allows for the organization of parallel data processing when determining the composition of binary relations. Based on the mathematical model for determining the composition of binary relations, a hardware-oriented algorithm for multiplying binary matrices was developed which allows transferring computationally complex procedures for multiplying binary matrices to the hardware level. The developed mathematical model and algorithm allow for the practical implementation of devices for multiplying binary matrices with an interruption of the internal cycle.

Keywords: binary relations; relational matrix; sequence relation; connection relation; interruption of the internal cycle; alternative relation; algorithm flowgraph; parallelism relation; multiplication of binary matrices.

Conflict of interest. The author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Gvozdeva S. N. A Mathematical Model for Determining the Composition of Binary Relations and an Algorithm for Binary Matrices Multiplication. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(2): 65-82 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-2-65-82>.

Received 23.04.2021

Accepted 11.05.2021

Published 24.08.2021

Введение

Одними из распространенных классов цифровых управляющих систем являются системы логического управления (СЛУ). Они представляют собой параллельные многомодульные однородные системы, которые связывают тысячи параллельно работающих логических контроллеров, в совокупности решающих возложенную на них задачу логического управления некоторым объектом управления в соответствии с заданным алгоритмом логического управления. При проектировании СЛУ возникает задача разбиения комплексного параллельного алгоритма управления на блоки разбиения ограниченной сложности в соответствии со структурными и функциональными ограничениями базиса СЛУ. Одним из ограничений при построении разбиений, упрощающим внутреннюю структуру контроллеров в составе СЛУ, является отсутствие параллельных вершин в одном блоке разбиения.

В связи с тем, что задача разбиения алгоритмов управления относится к классу NP -сложных и не допускает получения оптимального решения за приемлемое время для управляющих алгоритмов реальной сложности, на практике для ее решения применяются эвристические методы (методы случайного перебора [1], метод взвешенного случайного перебора [2,3], метод муравьиной колонии [4], метод параллельно-

последовательной декомпозиции [5,6], метод пчелиной колонии [7] и другие). Они требуют, в процессе работы, информацию о бинарных отношениях вершин параллельной граф-схемы алгоритма управления, для которых производится поиск разбиений. Это необходимо для организации проверки на отсутствие параллельных вершин в составе формируемых блоков разбиения. При разработке программных реализаций алгоритмов поиска разбиений существенную часть вычислительного времени при определении состава отношений занимают матричные операции.

В настоящее время существует большое количество важных практических задач, включающих в своем составе выполнение операции умножения матриц как на программном уровне, так и на аппаратном. При программной реализации одним из главных недостатков классических методов умножения является низкая эффективность использования подсистемы памяти используемой вычислительной системы (например, связки CPU – RAM или GPU – графическая память [8,9]), что приводит к увеличению времени обработки и снижению реальной производительности вычислительной системы. С целью снижения влияния указанного недостатка возможен ряд оптимизаций, которые выполняются программно на алгоритмическом уровне и позволяют повысить эффективность использования кэш-памяти CPU (снизить число промахов кэша)

или разделяемой памяти GPU и, как следствие, реальную производительность используемой вычислительной системы [10-12]. Другим направлением для снижения времени выполнения матричного умножения является использование специализированных вычислительных структур в виде устройств в заказном исполнении или на базе ПЛИС. Большинство известных устройств основаны на систолических вычислительных структурах, могут выполнять умножение с линейной временной асимптотической сложностью, однако они характеризуются большой аппаратной сложностью, что не позволяет их практическую реализацию на современном уровне развития полупроводниковых цифровых схем для матриц большой размерности.

Существующие способы реализации матричных операций на аппаратном уровне, способные снизить время обработки, могут быть разделены на три основных направления.

1. Схемы на оптических элементах, которые по ряду причин не получили широкого распространения и в настоящее время практически не применяются, например [13].

2. Устройства умножения матриц, имеющие вероятностные свойства и присущую им статистическую погрешность, в настоящее время на практике не используются, например [14].

3. Устройства, в основу работы которых положен принцип параллельной, иногда в сочетании с конвейерной, матричной и/или систолической обработки данных (в том числе на базе систоличе-

ских структур). Они характеризуются существенным выигрышем во времени выполнения операции, в некоторых случаях позволяя выполнение умножения матриц с линейной временной асимптотической сложностью. Однако данным устройствам необходима специализированная многопортовая память, которая должна обеспечить достаточный темп поступления исходных данных, иначе быстродействие устройства будет лимитировано именно ей, а не скоростью работы операционной части, например [15].

Кроме рассмотренных выше аппаратных реализаций известны алгоритмы умножения матриц Штрассена, Штрассена-Винограда, Копперсмита-Винограда, отличительной особенностью которых является более низкая временная асимптотика [16-19]. Однако практический выигрыш от их использования наблюдается на матрицах значительно большего размера (миллионы элементов). Для данных алгоритмов умножения не было выявлено существующих аппаратных реализаций.

При построении разбиений существует необходимость в переносе вычислительно сложных процедур с программного уровня на аппаратный. Одной из таких процедур является определение состава бинарных отношений вершин граф-схем параллельных алгоритмов.

Материалы и методы

В настоящее время существует ряд задач, связанных с обработкой граф-схем параллельных алгоритмов. Для решения таких задач определяются свойства бинарных отношений [20-23]. На множе-

стве вершин граф-схемы алгоритма используются бинарные отношения следования (ν), связи (φ), параллельности (ω), альтернативы (ψ) [24].

Аналогичными отношениям следования и связи, которые определены для

граф-схем параллельных алгоритмов, являются бинарные отношения контрдостижимости, достижимости и связности вершин графов общего вида [25-26].

На рис. 1 приведен пример граф-схемы алгоритма для пояснения определения состава бинарных отношений.

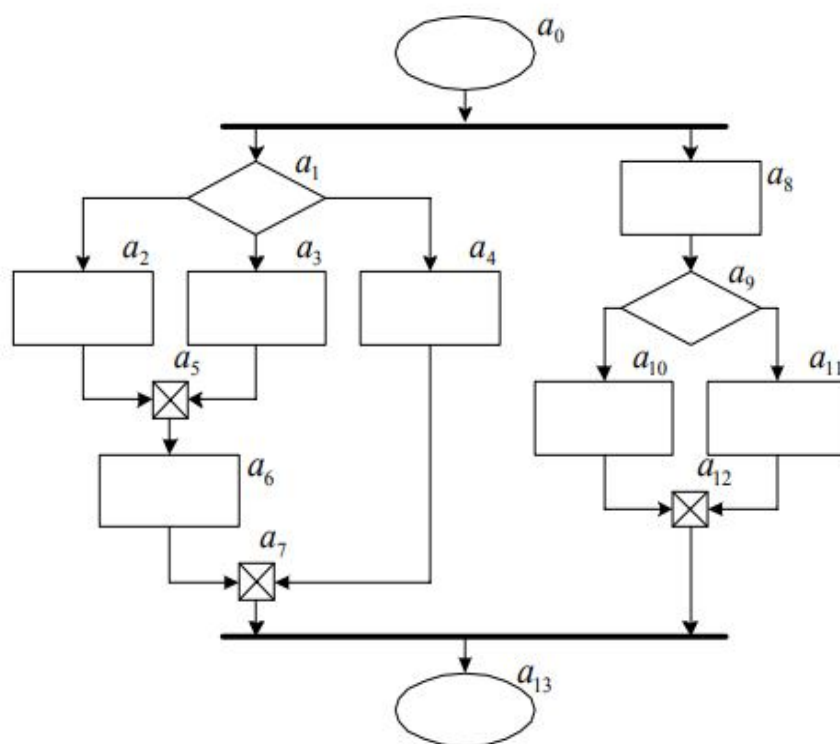


Рис. 1. Граф-схемы алгоритма определения состава бинарных отношений, $a_0 - a_{13}$ – множество вершин граф-схемы

Fig. 1. Flowgraphs of the algorithm for determining the composition of binary relations, $a_0 - a_{13}$ is the set of vertices of the flowgraph

На основании рис. 1 определим примеры отношений между некоторыми вершинами граф-схемы алгоритма:

- отношение следования наблюдается между вершинами: $(a_8 \nu a_0), (a_9 \nu a_8) \Rightarrow (a_9 \nu a_0)$;
- отношение связи наблюдается между вершинами: $(a_0 \varphi a_2), (a_0 \varphi a_3)$;
- отношение альтернативы наблюдается между вершинами: $(a_{10} \psi a_{11})$;

– отношение параллельности наблюдается между вершинами: $(a_3 \omega a_9), (a_4 \omega a_9)$.

Наиболее удобной формой представления отношений между вершинами является матрица отношений.

Построение матриц отношений следования, связи, альтернативы и параллельности, представленных на рис. 2-5, происходит на основании граф-схемы алгоритма, представленного на рис. 1.

	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}
a_0	–	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_1	1	–	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_2	1	1	–	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_3	1	1	0	–	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_4	1	1	0	0	–	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_5	1	1	1	1	1	–	0	0	0	0	0	0	0	0
a_6	1	1	1	1	1	1	–	0	0	0	0	0	0	0
a_7	1	1	1	1	1	1	1	–	0	0	0	0	0	0
a_8	1	0	0	0	0	0	0	0	–	0	0	0	0	0
a_9	1	0	0	0	0	0	0	0	1	–	0	0	0	0
a_{10}	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	–	0	0	0
a_{11}	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	–	0	0
a_{12}	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	–	0
a_{13}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	–

Рис. 2. Матрица отношения следования граф-схемы алгоритма

Fig. 2. The matrix of the sequence relation of the graph-scheme of the algorithm

	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}
a_0	–	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
a_1	1	–	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1
a_2	1	1	–	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1
a_3	1	1	0	–	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1
a_4	1	1	0	0	–	1	1	1	0	0	0	0	0	1
a_5	1	1	1	1	1	–	1	1	0	0	0	0	0	1
a_6	1	1	1	1	1	1	–	1	0	0	0	0	0	1
a_7	1	1	1	1	1	1	1	–	0	0	0	0	0	1
a_8	1	0	0	0	0	0	0	0	–	1	1	1	1	1
a_9	1	0	0	0	0	0	0	0	1	–	1	1	1	1
a_{10}	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	–	1	1	1
a_{11}	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	–	1	1
a_{12}	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	–	1
a_{13}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	–

Рис. 3. Матрица отношения связи граф-схемы алгоритма

Fig. 3. The matrix of the connection relation of the graph-scheme of the algorithm

	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}
a_0	–	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_1	0	–	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_2	0	0	–	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_3	0	0	1	–	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_4	0	0	1	1	–	1	1	0	0	0	0	0	0	0
a_5	0	0	0	0	1	–	0	0	0	0	0	0	0	0
a_6	0	0	0	0	1	0	–	0	0	0	0	0	0	0
a_7	0	0	0	0	0	0	0	–	0	0	0	0	0	0
a_8	0	0	0	0	0	0	0	0	–	0	0	0	0	0
a_9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	–	0	0	0	0
a_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	–	1	0	0
a_{11}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	–	0	0
a_{12}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	–	0
a_{13}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	–

Рис. 4. Матрица отношения альтернативы граф-схемы алгоритма

Fig. 4. The matrix of the alternative relation of the graph-scheme of the algorithm

	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}
a_0	–	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_1	0	–	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
a_2	0	0	–	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
a_3	0	0	0	–	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
a_4	0	0	0	0	–	0	0	0	1	1	1	1	1	0
a_5	0	0	0	0	0	–	0	0	1	1	1	1	1	0
a_6	0	0	0	0	0	0	–	0	1	1	1	1	1	0
a_7	0	0	0	0	0	0	0	–	1	1	1	1	1	0
a_8	0	1	1	1	1	1	1	1	–	0	0	0	0	0
a_9	0	1	1	1	1	1	1	1	0	–	0	0	0	0
a_{10}	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	–	0	0	0
a_{11}	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	–	0	0
a_{12}	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	–	0
a_{13}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	–

Рис. 5. Матрица отношения параллельности граф-схемы алгоритма

Fig. 5. The matrix of the parallelism relation of the graph-scheme of the algorithm

Главной особенностью матрицы отношений при рассмотрении отношения следования ν считается ее асимметричность относительно главной диагонали, все остальные отношения (связи, альтернативы и параллельности) – симметричны относительно главной диагонали.

Рассмотрим более подробно процедуру определения состава бинарных отношений.

В первую очередь выполняется определение отношения следования. Для этого производится его транзитивное замыкание [27-28], отталкиваясь от начальных значений, получаемых исходя из рассмотрения всех дуг передачи управления между вершинами в составе граф-схемы:

$$(a_i \nu a_j) \wedge (a_j \nu a_k) \Rightarrow (a_i \nu a_k), \quad (1)$$

где a_i, a_j, a_k – вершины граф-схемы параллельных алгоритмов.

Для хранения бинарного отношения следования применяется матрица отношений $M_R^\nu = (m_{ij}^\nu)$ (рис.2), $i, j = \overline{1, N}$, N – число вершин в граф-схеме алгоритма. В исходной матрице необходимо найти такие i, j и k , что истинно выражение

$$(a_i \nu a_j) \wedge (a_j \nu a_k) \wedge \neg(a_i \nu a_k), \quad (2)$$

или, что то же самое:

$$(m_{ij}^\nu = 1) \wedge (m_{jk}^\nu = 1) \wedge (m_{ik}^\nu = 0), \quad (3)$$

и присвоить $m_{ik}^\nu := 1$, где m_{ik}^ν – значение бинарного отношения в составе соот-

ветствующей матрицы отношений M_R^ν .

Повторять данное действие необходимо до тех пор, пока возможно нахождение элементов, удовлетворяющих выражению (2).

При практической реализации данных операций существует два подхода. Первый базируется на алгоритме Флойда-Уоршала, позволяющем выполнить транзитивное замыкание отношения за один проход ввиду использования небольшого порядка рассмотрения элементов матриц, что ограничивает возможность его распараллеливания. Второй основан на возведении матрицы в степень.

Второй подход возможно реализовать двумя способами. Первый из них выполняется путем умножения исходной матрицы бинарного отношения самой на себя:

$$M_R^{\nu'} = M_R^\nu \times M_R^\nu \times \dots \times M_R^\nu. \quad (4)$$

Число матричных умножений в формуле (4) определяется исходными данными и ограничено сверху значением N . Это означает, что в худшем случае искомого транзитивного замыкания будет найдено путем возведения матрицы в N -ю степень. На практике, если после выполнения очередного умножения матрица не изменится, то умножение прерывается.

Второй способ основан на возведении матрицы в квадрат по формуле:

$$\begin{aligned}
 M_2^v &= M_R^v \times M_R^v, \\
 M_4^v &= M_2^v \times M_2^v, \\
 M_8^v &= M_4^v \times M_4^v, \\
 &\dots
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Результирующее значение матрицы, обладающей свойством транзитивного замыкания, будет получено в худшем случае за $\lceil \log_2 N \rceil$ шагов. При практической реализации действия, в худшем случае потребуется число шагов, пропорциональное логарифму от N , но изменение матрицы может прекратиться значительно раньше.

В процессе нахождения произведения бинарных матриц базовой операцией является операция нахождения бинарного скалярного произведения i -го столбца и j -й строки матриц. Оно выполняется по формуле

$$m_{ij}^{v'} = m_{ij}^v \vee \left(\bigvee_{k=1, N} m_{ik}^v m_{kj}^v \right). \tag{6}$$

В результате выполнения данной операции N^2 раз для всех $i, j = \overline{1, N}$ получается результирующая матрица. Новизной алгоритма является сокращение числа итераций внутреннего цикла (по переменной k) при получении единичного значения на одной из итераций нахождения скалярного произведения двоичных векторов.

При умножении матриц с большим числом единиц число выполняемых итераций по k будет малым, что уменьшает число обращений к памяти, так и число выполняемых операций (конъюнкций и дизъюнкций).

Программная реализация данного алгоритма имеет ряд недостатков, основным из которых является нерегулярно срабатывающее условие прерывания внутреннего цикла, приводящее к сбросам конвейера при спекулятивном выполнении соответствующего программного кода. Они снижают реальную производительность вычислительной системы при выполнении умножения неплотных бинарных матриц, выполняемого для реализации транзитивного замыкания.

После выяснения отношения следования производится определение отношения связи (рис.3) путем выполнения покомпонентной конъюнкции:

$$M_R^o = M_R^v \vee (M_R^v)^T. \tag{7}$$

Выяснение отношения альтернативы производится путем анализа путей между условными вершинами и вершинами объединения альтернативных дуг, в результате чего оказывается сформирована матрица M_R^w (рис.4). Указанная операция не зависит по данным от рассмотренных выше операций выяснения отношения следования и связи и может быть выполнена параллельно с ними. На завершающем этапе определения состава бинарных отношений выполняется выяснение отношения параллельности (рис.5):

$$M_R^o = \overline{M_R^o} \wedge \overline{M_R^w}. \tag{8}$$

Соответствующий параллельный алгоритм приведен на рис. 7.

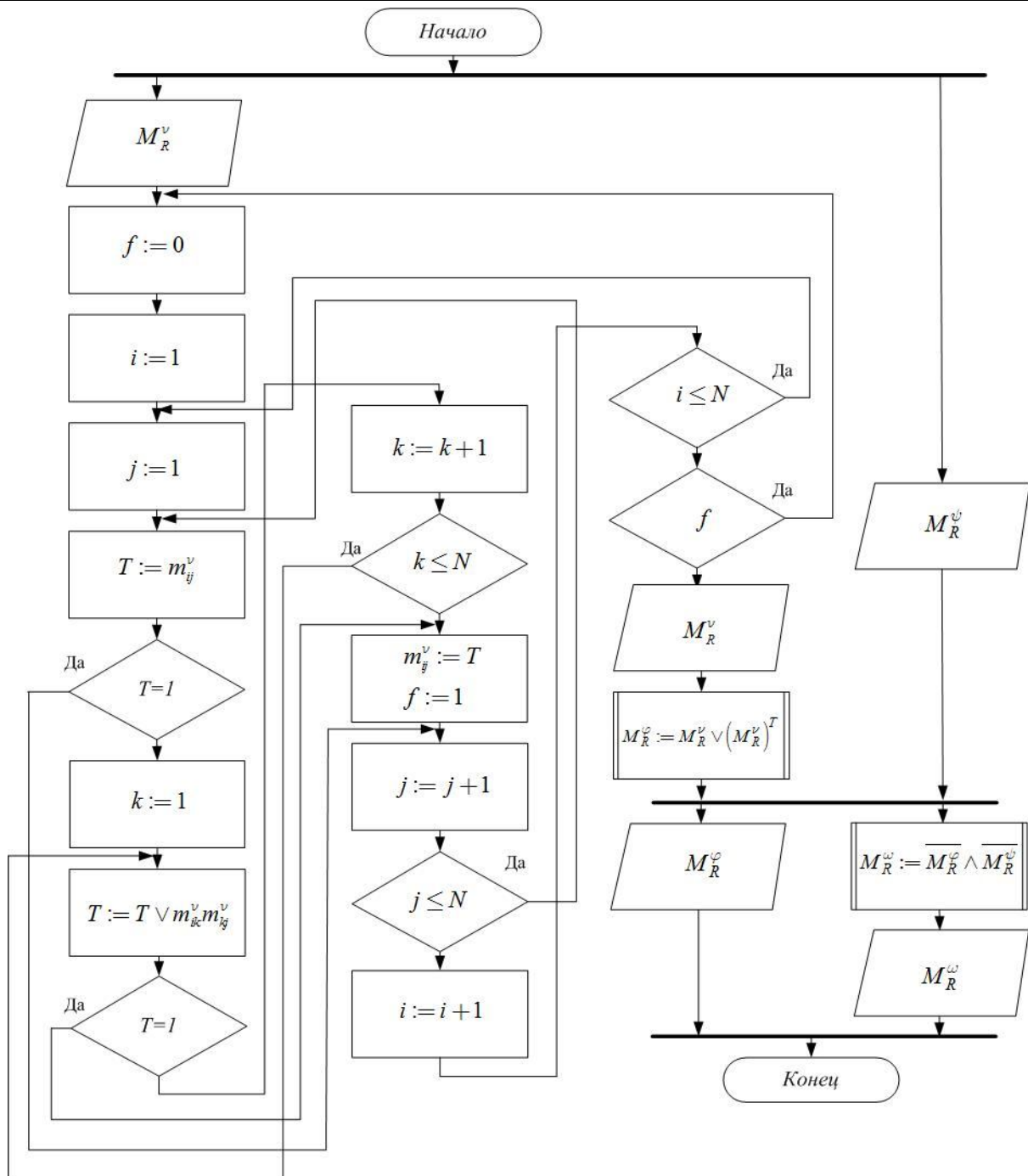


Рис. 6. Параллельный алгоритм определения состава бинарных отношений (где T – временная переменная; f – переменная, используемая для досрочного прерывания цикла)

Fig. 6. Parallel algorithm for the determination of binary relations composition (where T – is the temporary variable; f – is the variable used for early interruption of the cycle)

Результаты и их обсуждение

В результате вычислительного эксперимента были получены следующие зависимости вероятности досрочного

прекращения умножения бинарных векторов $\alpha = 1 - \beta$ (β – вероятность выполнения операций умножения) от размера N умножаемых матриц и их плотности d является нетривиальной и может быть

установлена эмпирически в ходе вычислительного эксперимента. Для этого формируется случайная бинарная матрица размера $N \times N$, включающая в своем составе $M = \lceil dN^2 \rceil$ единиц, для нее производится возведение в квадрат, в ходе выполнения которого подсчитывается необходимое для этого число

конъюнкций (логических умножений) K , по которому вычисляется вероятность досрочного прекращения умножения $\alpha = 1 - \beta = 1 - \frac{K}{N^3}$ (N^3 – число умножений элементов матриц без досрочного прерывания). Соответствующая зависимость $\beta(d)$ для $N = 128$ представлена на рис. 7.

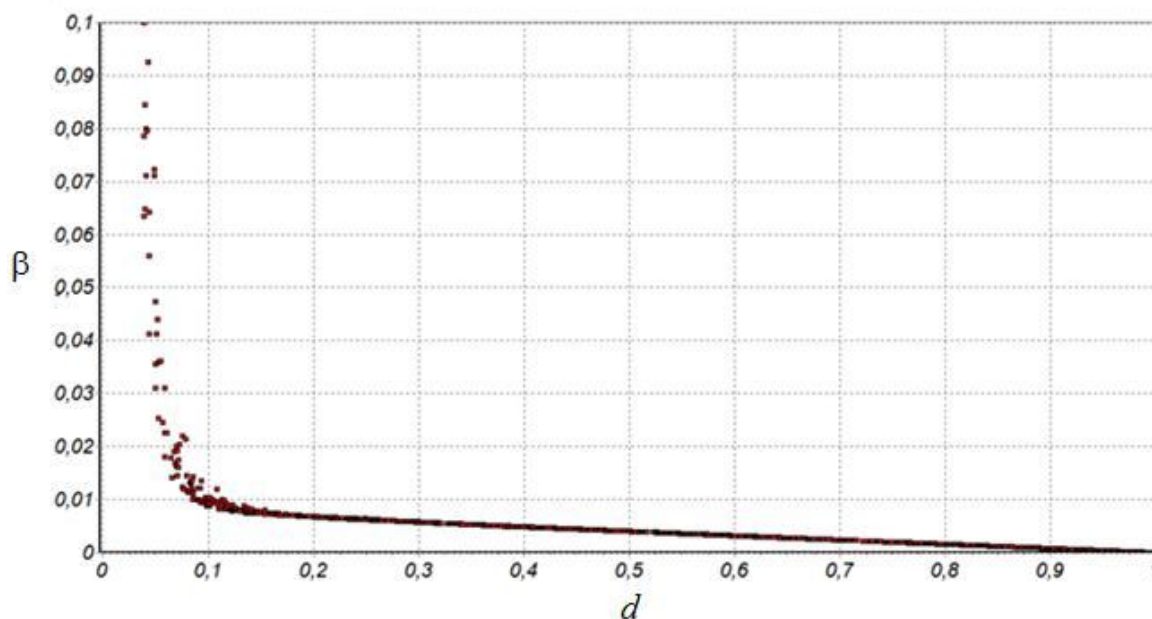


Рис. 7. Зависимость вероятности выполнения умножения (β) от плотности умножаемых матриц (d) (пример для $N = 128$)

Fig. 7. Dependence of the probability of performing multiplication (β) on the density of the multiplied matrices (d) (example for $N = 128$)

Например, для $d = 0.2$, $\beta = 0.007$, что обеспечивает сокращение числа итераций внутреннего цикла в 142 раза и время сокращается с 1765 мс до 12,35 мс.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что с ростом размера N умножаемых матриц число выполняемых умножений $K \ll N^3$, значение величины $\beta < 0,01$ для $N = 128$,

$d > 0,1$, и раннее прекращение операции умножения битовых векторов (в приведенном примере – на 2–3 порядка) сокращает необходимое число умножений элементов матриц при вычислении произведения бинарных матриц.

Выводы

В данной работе представлено математическое описание бинарных от-

ношений вершин граф-схем параллельных алгоритмов.

Формулы (1) – (3) определяют свойства используемых бинарных отношений и в совокупности с (6) – (8) образуют математическую модель работы устройства обработки бинарных матриц. Новизной математической модели является введение бинарных отношений связи, альтернативы и параллельности вершин граф-схем параллельных алгоритмов в дополнение к отношению следования, известному в теории графов. Разработанная математическая модель бинарных отношений следования и связи вершин граф-схем параллельных алгоритмов, позволяет обеспечить организацию параллельной обработки данных при определении состава бинарных отношений.

На базе математической модели бинарных отношений разработан аппаратно-ориентированный алгоритм для умножения бинарных матриц, ориентированный на параллельную аппаратную реализацию. Данный алгоритм позволяет перенести вычислительно сложные процедуры умножения бинарных матриц на аппаратный уровень. Особенностью данного алгоритма является сокращение числа итераций внутреннего

цикла за счет возможности досрочного прерывания умножения матриц.

Эффективным способом практической реализации является разработка специализированной аппаратно-ориентированной структурно-функциональной организации устройства обработки бинарных матриц. Примером является устройство для возведения бинарной матрицы в квадрат [29], ориентированное на аппаратную реализацию алгоритмов классического умножения, характеризуется умеренным быстродействием и низкой аппаратной сложностью [30] и позволяет осуществить прерывание вычислительного процесса при умножении битовых векторов

Разработанная математическая модель и алгоритм позволяют осуществить практическую реализацию устройства для умножения бинарных матриц с прерыванием внутреннего цикла.

На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что с ростом размера умножаемых матриц раннее прекращение операции умножения битовых векторов сокращает на 2-3 порядка необходимое число умножений элементов матриц при вычислении произведения бинарных матриц.

Список литературы

1. Метод случайного перебора в задаче построения разбиений граф-схем параллельных алгоритмов / Э.И. Ватутин, Д.В. Колясников, И.А. Мартынов, В.С. Титов // Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов. Барнаул: Барнаул, 2014. С. 115–125.

2. Метод взвешенного случайного перебора для решения задач дискретной комбинаторной оптимизации / Э.И. Ватутин, Е.Н. Дремов, И.А. Мартынов, В.С. Титов // Известия ВолГТУ. Серия: Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. 2014. № 10 (137). Вып. 9. С. 59–64.

3. Метод взвешенного случайного перебора для построения разбиений граф-схем параллельных алгоритмов при проектировании логических мультиконтроллеров / Э.И. Ватутин, В.С. Панищев, С.Н. Гвоздева, В.С. Титов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21. № 6 (75). С. 6–21. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2017-21-6-6-21>.

4. Ватутин Э.И., Титов В.С. Анализ результатов применения алгоритма муравьиной колонии в задаче поиска пути в графе при наличии ограничений // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2014. № 12 (161). С. 111–120.

5. Ватутин Э.И., Зотов И.В. Повышение качества разбиения алгоритмов при синтезе логических мультиконтроллеров с использованием метода параллельно-последовательной декомпозиции // Перспективы развития систем управления оружием: сборник докладов IV научно-практической конференции (Курск, 19-20 сентября 2007 г.). М.: Изд-во «Бедретдинов и Ко», 2007. С. 84–92.

6. Ватутин Э.И., Титов В.С. Алгоритмическая оптимизация программной реализации метода параллельно-последовательной декомпозиции граф-схем параллельных алгоритмов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 6. С. 23–29.

7. Пшеничных А.О., Ватутин Э.И. Анализ результатов применения метода пчелиной колонии в задаче раскраски графов общего вида // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 126-145. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-126-145>.

8. Параллельные вычисления на GPU. Архитектура и программная модель CUDA / А.В. Боресков, А.А. Харламов, Н.Д. Марковский [и др.]. М.: Изд-во Московского университета, 2012. 336 с.

9. Затолокин Ю.А., Ватутин Э.И., Титов В.С. Алгоритмическая оптимизация программной реализации алгоритмов умножения плотных вещественных матриц на графических процессорах с поддержкой технологии OpenCL // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21. № 5 (74). С. 6–15. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2017-21-5-06-15>.

10. Ватутин Э.И., Мартынов И.А., Титов В.С. Оценка реальной производительности современных процессоров в задаче умножения матриц для однопоточной программной реализации // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. № 4. С. 11–20.

11. Ватугин Э.И., Титов В.С. Оценка реальной производительности современных процессоров в задаче умножения матриц для однопоточной программной реализации с использованием расширения SSE (часть 1) // Известия Юго-Западного государственного университета. 2015. № 4 (61). С. 26–35.
12. Ватугин Э.И., Титов В.С. Оценка реальной производительности современных процессоров в задаче умножения матриц для однопоточной программной реализации с использованием расширения SSE (часть 2) // Известия Юго-Западного государственного университета. 2015. № 5 (62). С. 8–16.
13. А.с. СССР 1781679 МПК G06F1/04, G06F15/347. Устройство для умножения квадратных матриц картин-изображений / Красиленко В.Г., Заболотная Н.И. Заявл. 07.07.1989. Оpubл. 15.12.1992.
14. А. с. СССР 647687 МПК G06F17/16. Устройство для операций над матрицами / Гладкий В.С., Гук Л.Б. Заявл. 21.12.1976. Оpubл. 15.02.1979.
15. Патент США № 8924455. Multiplication of matrices using systolic arrays / Kaushik Barman, Parag Dighe, Ragahavendar M. Rao. Заявл. 25.02.2011. Оpubл. 30.12.2014.
16. Strassen V. Gaussian Elimination is not Optimal // Numer. Math / Springer-Verlag, 1969. Vol. 13, is. 4. P. 354–356. doi:10.1007/BF02165411.
17. Pan V. Ya, Strassen's algorithm is not optimal – trilinear technique of aggregating uniting and canceling for constructing fast algorithms for matrix operations. Proc. 19th Annual Symposium on Foundations of Computer Science, Ann Arbor, Mich., 1978.
18. Bini D., Capovani M., Lotti G., Romani F. $O(n^{2.7799})$ complexity for $n \times n$ approximate matrix multiplication. Inform. Process. Lett., 1979.
19. Don Coppersmith and Shmuel Winograd. Matrix multiplication via arithmetic progressions. Journal of Symbolic Computation, 9:251-280, 1990.
20. Организация и синтез микропрограммных мультимикроконтроллеров / И.В. Зотов, В.А. Колосков, В.С. Титов [и др.]. Курск, 1999. 368 с.
21. Емельянов С.Г., Зотов И.В., Титов В.С. Архитектура параллельных логических мультимикроконтроллеров. М: Высшая школа, 2009. 233 с.
22. Комбинаторно-логические задачи синтеза разбиений параллельных алгоритмов логического управления при проектировании логических мультимикроконтроллеров Э.И. Ватугин, И.В. Зотов, В.С. Титов [и др.]. Курск, 2010. 200 с.
23. Ватугин Э.И. Проектирование логических мультимикроконтроллеров. Синтез разбиений параллельных граф-схем алгоритмов. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2011. 292 с.
24. Ватугин Э.И., Зотов И.В. Построение матрицы отношений в задаче оптимального разбиения параллельных управляющих алгоритмов // Известия Курского государственного технического университета. 2004. № 2. С. 85–89
25. Зыков А. А. Основы теории графов. М.: Наука, 1986. 384 с.

26. Handbook of discrete and combinatorial mathematics / K.H. Rosen, J.G. Michaels, J.L. Gross, J.W. Grossman, D.R. Shier. N. Y.: CRC Press, 2000. 1183 p.
27. Кун С. Матричные процессоры на СБИС: [пер. с англ.]. М.: Мир, 1991. 672 с.
28. Мартынов И.А., Ватулин Э.И., Титов В.С. Аппаратно-ориентированная реализация операции транзитивного замыкания бинарных отношений // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации (Распознавание – 2015). Курск, 2015. С. 244–247.
29. Пат. на изобретение № 2744239. Устройство для возведения бинарной матрицы в квадрат / Гвоздева С.Н., Ватулин Э.И., Титов В.С. Заявка № 2020122205 от 05.07.2020. Оpubл. 04.03.2021г. Бюл.№7.
30. Гвоздева С.Н., Ватулин Э.И. Оценка аппаратной сложности устройства для возведения бинарной матрицы в квадрат // Медико-экологические информационные технологии -2020: сборник научных статей по материалам XXIII Международной научно-технической конференции: в 2ч. / редкол.: Н.А. Кореневский (отв.ред.) [и др.]; Юго-Зап.гос.ун-т. Курск, 2020. Ч.2. С. 62-65.

References

1. Vatutin E.I., Kolyasnikov D.V., Martynov I.A., Titov V.S. [The method of random search in the problem of constructing partitions of graph schemes of parallel algorithms]. *Mnogoyadernye protsessory, parallel'noe programmirovaniye, PLIS, sistemy obrabotki signalov* [Multi-core processors, parallel programming, PLIS, signal processing systems]. Barnaul, Barnaul Publ., 2014, pp. 115-125 (In Russ.).
2. Vatutin E.I., Dremov E.N., Martynov I.A., Titov V.S. Metod vzveshennogo sluchainogo perebora dlya resheniya zadach diskretnoi kombinatornoi optimizatsii [Method of weighted random search for solving problems of discrete combinatorial optimization]. *Izvestiya VolGTU. Seriya: Elektronika, izmeritel'naya tekhnika, radiotekhnika i svyaz'* = *Izvestia Volga State Technical University. Series: Electronics, Measuring Equipment, Radio Engineering and Communications*, 2014, № 10 (137). is. 9, pp. 59–64 (In Russ.).
3. Vatutin E.I., Panishchev V.S., Gvozdeva S.N., Titov V.S. Metod vzveshennogo sluchainogo perebora dlya postroeniya razbieniia graf-skhem parallel'nykh algoritmov pri proektirovanii logicheskikh mul'tikontrollerov [Weighed Random Selection Method for Construction of Partitioning of Parallel Algorithms Flowgraphs for Logic Multicontrollers Designing]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*. = *Proceedings of the Southwest State University*, 2017, vol. 21, no. 6 (75), pp. 6-21 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2017-21-6-6-21>.
4. Vatutin E.I., Titov V.S. Analiz rezul'tatov primeneniya algoritma murav'inoi kolonii v zadache poiska puti v grafe pri nalichii ogranichenii [Analysis of the results of the application of the ant colony algorithm in the problem of finding a path in the graph in the presence

of restrictions]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestia of the Southern Federal University. Technical sciences*, 2014, no. 12 (161), pp. 111-120 (In Russ.).

5. Vatutin E.I., Zotov I.V. [Improving the quality of algorithm splitting during the synthesis of logical multicontrollers using the parallel-sequential decomposition method]. *Perspektivy razvitiya sistem upravleniya oruzhiem. Sbornik dokladov IV nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Prospects for the development of weapons control systems. Collection of reports of the IV scientific and practical conference]. Moscow, Publishing house "Bedretdinov and Co," Publ., 2007, pp. 84-92 (In Russ.).

6. Vatutin E.I., Titov V.S. Algoritmicheskaya optimizatsiya programmnoi realizatsii metoda parallel'no-posledovatel'noi dekompozitsii graf-skhem parallel'nykh algoritmov [Algorithmic optimization of the program implementation of the method of parallel-sequential decomposition of graph schemes of parallel algorithms]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie = News of Higher Educational Institutions. Instrument Making*, 2013, vol. 56, no. 6, pp. 23-29 (In Russ.).

7. Pshenichnykh A. O., Vatutin E. I. Analysis of the Results of Applying the Bee Colony Method in the Problem of Coloring General Graphs. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(4): 126-145 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-126-145>.

8. Boreskov A.V., Kharlamov A.A. Markovsky N.D. and others. *Parallel'nye vychisleniya na GPU. Arkhitektura i programmnyaya model' CUDA* [Parallel calculations on the GPU. Architecture and software model CUDA]. Moscow, Moscow University Publ., 2012. 336 p. (In Russ.).

9. Zatolokin Y.A., Vatutin E.I., Titov V.S. Algoritmicheskaya optimizatsiya programmnoi realizatsii algoritmov umnozheniya plotnykh veshchestvennykh matrits na graficheskikh protsessorakh s podderzhkoi tekhnologii OpenCL [Algorithmic optimization of software implementation of algorithms for multiplying dense real matrices on graphics processors with OpenGL technology support]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2017, no. 5, pp. 6-15 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2017-21-5-06-15>.

10. Zatolokin Yu.A., Vatutin E.I., Titov V.S. Otsenka real'noi proizvoditel'nosti sovremennykh protsessorov v zadache umnozheniya matrits dlya odnopotochnoi programmnoi realizatsii [Algorithmic optimization of software implementation of algorithms for multiplying dense real matrices on graphics processors with support for OpenCL technology]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2013, no. 4, pp. 11-20 (In Russ.).

11. Vatutin E.I., Titov V.S. Otsenka real'noi proizvoditel'nosti sovremennykh protsessov v zadache umnozheniya matrits dlya odnopotochnoi programmnoi realizatsii s ispol'zovaniem rasshireniya SSE (chast' 1) [Assessment of the real performance of modern processors in the task of multiplying matrices for a single-stream software implementation using the SSE extension (part 1)]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2015, no. 4 (61), pp. 26-35 (In Russ.).
12. Vatutin E.I., Titov V.S. Otsenka real'noi proizvoditel'nosti sovremennykh protsessov v zadache umnozheniya matrits dlya odnopotochnoi programmnoi realizatsii s ispol'zovaniem rasshireniya SSE (chast' 1) [Assessment of the real performance of modern processors in the task of multiplying matrices for a single-stream software implementation using the SSE extension (part 2)]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2015, vol. 1, no. 5 (62), pp. 8-16 (In Russ.).
13. Krasilenko V.G., Zabolotnaya N.I.. *Ustroistvo dlya umnozheniya kvadratnykh matrits kartin-izobrazhenii* [A device for multiplying square matrices of picture-images]. A.S. USSR 1781679 IPC G06F1 / 04, G06F15 / 347. Appl. 07.07.1989. Publ. 12/15/1992 (In Russ.).
14. Gladkiy V.S., Guk L.B. *Ustroistvo dlya operatsii nad matritsami* [A device for operations on matrices]. A.S. USSR 647687 IPC G06F17 / 16. Appl. 12/21/1976. Publ. 02/15/1979 (In Russ.).
15. Kaushik Barman, Parag Dighe, Ragahavendar M. Rao. Multiplication of matrices using systolic arrays]. US Patent No. 8,924,455. Appl. 02/25/2011. Publ. 12/30/2014.
16. Strassen V. Gaussian Elimination is not Optimal. *Numer. Math. Springer-Verlag*, 1969, vol. 13, is. 4, pp. 354–356. <https://doi.org/10.1007/BF02165411>.
17. Pan V. Ya. Strassen's algorithm is not optimal – trilinear technique of aggregating uniting and canceling for constructing fast algorithms for matrix operations. Proc. 19th Annual Symposium on Foundations of Computer Science, Ann Arbor, Mich., 1978.
18. Bini D., Capovani M., Lotti G., Romani F. $O(n^{2.7799})$ complexity for $n \times n$ approximate matrix multiplication. Inform. Process. Lett., 1979.
19. Don Coppersmith and Shmuel Winograd. Matrix multiplication via arithmetic progressions. *Journal of Symbolic Computation*, 9:251-280, 1990.
20. Zotov I.V., Koloskov V.A., Titov V.S. and others. *Organizatsiya i sintez mikroprogrammnykh mul'timikrokontrollerov* [Organization and synthesis of firmware multi-microcontrollers]. Kursk, 1999. 368 p. (In Russ.).
21. Emelyanov S.G., Zotov I.V., Titov V.S. *Arkhitektura parallel'nykh logicheskikh mul'tikontrollerov* [Architecture of parallel logical multicontrollers]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2009. 233 p. (In Russ.).
22. Vatutin E.I., Zotov I.V., Titov V.C. et al. *Kombinatorno-logicheskie zadachi sinteza razbienii parallel'nykh algoritmov logicheskogo upravleniya pri proektirovanii logicheskikh mul'tikontrollerov* [Combinatorial and Logical Problems of Synthesis of Sections of Parallel

Logic Control Algorithms in the Design of Logical Multi-Controllers]. Kursk, 2010. 200 p. (In Russ.).

23. Vatutin E.I. *Proektirovanie logicheskikh mul'tikontrollerov. Sintez razbieni parallel'nykh graf-skhem algoritmov* [Design of logical multi-controllers. Synthesis of partitions of parallel graph schemes of algorithms]. Saarbrücken, Lambert Academic Publ., 2011, 292 p. (In Russ.).

24. Vatutin E.I., Zotov I.V. Postroenie matritsy otnoshenii v zadache optimal'nogo razbieniya parallel'nykh upravlyayushchikh algoritmov [Constructing a matrix of relations in the problem of optimal separation of parallel control algorithms]. *Izvestiya Kurskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of the Kursk State Technical University*, 2004, no. 2, pp. 85-89 (In Russ.).

25. Zykov A. A. *Osnovy teorii grafov* [Fundamentals of graph theory]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 384 p. (In Russ.).

26. Rosen K.H., Michaels J.G., Gross J.L., Grossman J.W., Shier D.R.. Handbook of discrete and combinatorial mathematics. N. Y.: CRC Press, 2000, 1183 p.

27. Kun S. *Matrichnye protsessory na SBIS* [Matrix processors on SBIS]. Moscow, 1991. 672 p. (In Russ.).

28. Martynov I.A., Vatutin E.I., Titov V.S. [Hardware-oriented implementation of transitive closure of binary relations]. *Optiko-elektronnye pribory i ustroystva v sistemakh raspoznavaniya obrazov, obrabotki izobrazhenii i simvol'noi informatsii (Raspoznavanie – 2015)* [Optical-electronic devices and devices in image recognition, image processing and symbolic information systems (Recognition - 2015)]. Kursk, 2015, pp. 244-247 (In Russ.).

29. Gvozdeva S.N., Vatutin E.I., Titov V.C. *Ustroystvo dlya vozvedeniya binarnoi matritsy v kvadrat* [Device for squaring a binary matrix]. Patent RF No. 2744239. Application No. 2020122205 dated 05.07.2020 (In Russ.).

30. Gvozdeva S.N., Vatutin E.I. [Assessment of the hardware complexity of the device for squaring the binary matrix]. *Mediko-ekologicheskie informatsionnye tekhnologii -2020. Sbornik nauchnykh statei po materialam XXIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* = Medical and environmental information technologies -2020: a collection of scientific articles on materials of the XXIII International Scientific and Technical Conference]. Kursk, 2020, pp. 62-65 (In Russ.).

Информация об авторе / Information about the Author

Гвоздева Светлана Николаевна,
преподаватель кафедры вычислительной
техники, Юго-Западный государственный
университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: svetka-gvozdeva@yandex.ru

Svetlana N. Gvozdeva, Lecturer, Computer
Engineering Department, Southwest State
University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: svetka-gvozdeva@yandex.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-2-83-92>

О двухчастотных колебаниях электропривода постоянного тока с импульсным управлением

О.О. Яночкина¹ ✉

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: yanoolga@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Анализ бифуркаций двухчастотных колебаний электропривода постоянного тока с широтно-импульсным управлением.

Методы. Исследования основаны на построении стробоскопического отображения Пуанкаре, расчете седловых периодических орбит и их устойчивых и неустойчивых инвариантных многообразий.

Результаты. Выполнено исследование механизмов возникновения двухчастотных колебаний из теряющего устойчивость периодического движения в электроприводе постоянного тока с широтно-импульсным управлением. Изучена нелокальная седло-узловая бифуркация, приводящая к резонансу (синхронизации) на торе, характеризуем парой независимых частот, когда их отношение становится рациональным числом.

Заключение. Проведен бифуркационный анализ системы управления электроприводом постоянного тока, динамика которой описывается негладкими неавтономными дифференциальными уравнениями. Исследования проводились на итерированном отображении, полученном из указанного векторного поля в аналитическом виде. Показано, что рассматриваемая система демонстрирует двухчастотные колебания, которые возникают через бифуркацию Неймарка-Саккера. В фазовом пространстве дискретной модели колебаниям с двумя независимыми частотами соответствует замкнутая инвариантная кривая. Показано, что если эти частоты соотносятся кратно, то происходит резонанс, когда динамика становится периодической. Но при этом замкнутая кривая остается инвариантной, а предельные точки орбиты образуют пару периодических циклов – устойчивый и седловой, отвечающих рациональному отношению частот. Замкнутая инвариантная кривая образована неустойчивыми многообразиями седлового цикла. Если же отношение частот иррациональное, то динамика квазипериодическая. Орбиты такого движения всюду плотно заполняют замкнутую кривую.

Ключевые слова: система управления электроприводом; бифуркация Неймарка-Саккера; замкнутая инвариантная кривая; двухчастотные колебания; дифференциальные уравнения с разрывной правой частью.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Благодарности: Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, профессора, профессора кафедры вычислительной техники ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» Ж.Т. Жусубалиева

Для цитирования: Яночкина О.О. О двухчастотных колебаниях электропривода постоянного тока с импульсным управлением // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(2): 83-92. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-2-83-92>.

Поступила в редакцию 26.03.2021

Подписана в печать 06.05.2021

Опубликована 24.08.2021

On Two-Frequency Oscillations of a DC Electric Drive with Pulse Control

Olga O. Yanochkina ¹ ✉

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: yanoolga@gmail.com

Abstract

Purpose of research is of the paper is to analyze bifurcations of two-frequency oscillations of a DC electric drive with pulse-width control.

Methods. The research is based on the construction of a stroboscopic Poincare map, the calculation of saddle periodic orbits and their stable and unstable invariant manifolds.

Results. The study of the mechanisms of the occurrence of two-frequency oscillations from a periodic motion that loses stability in a DC electric drive with pulse-width control was carried out. A non-local saddle-node bifurcation leading to resonance (synchronization) on a torus characterized by a pair of independent frequencies when their ratio becomes a rational number, was studied.

Conclusion. A bifurcation analysis of the control system of a DC electric drive, the dynamics of which is described by non-smooth nonautonomous differential equations, was carried out. The research was conducted on an iterable map obtained from the specified vector field in an analytical form. It is shown that the system under consideration demonstrates two-frequency oscillations that occur through the Neimark-Sacker bifurcation. In the phase space of the discrete model, a closed invariant curve corresponds to oscillations with two independent frequencies. It is shown that if these frequencies are correlated multiply, then a resonance occurs when the dynamics becomes periodic. But at the same time, the closed curve remains invariant, and the limit points of the orbit form a pair of periodic cycles – stable and saddle, corresponding to a rational frequency ratio. A closed invariant curve is formed by unstable manifolds of a saddle cycle. If the frequency ratio is irrational, then the dynamics is quasi-periodic. The orbits of such motion fill the closed curve everywhere densely.

Keywords: electric drive control system; Neimark-Sacker bifurcation; closed invariant curve; two-frequency oscillations; differential equations with discontinuous right-hand side.

Conflict of interest. The author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Acknowledgements: The work was carried out under the guidance of Doctor of Sciences (Engineering), Professor of the Department of Computer Engineering of the Southwest State University Zhusubaliev Zh. T.

For citation: Yanochkina O. O. On Two-Frequency Oscillations of a DC Electric Drive with Pulse Control. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(2): 83-92 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-2-83-92>.

Received 26.03.2021

Accepted 06.05.2021

Published 24.08.2021

Введение

Двухчастотные колебания – широко распространенное явление в природе и технике [1–9]. В классическом случае такие режимы возникают через бифуркацию Андронова-Хопфа (в векторных полях) или Неймарка-Саккера (в итерировуемых отображениях) [1–9]. В фазовом пространстве динамической системы двухчастотным колебаниям соответствует двумерный тор. Динамика на торе зависит от числа вращения, которое представляет отношение двух независимых частот. Если оно иррациональное число, то динамика квазипериодическая. В этом случае любая траектория динамической системы со временем всюду плотно заполняет поверхность тора, а в поперечном его сечении точки пересечения орбиты образуют замкнутую инвариантную кривую [1–15].

Если же число вращения рациональное число, то динамика периодическая, происходит захват частоты, когда при вариации параметров колебания с двумя независимыми частотами переходят в периодическое движение с общим периодом [1–15].

В представленной работе исследуются механизмы рождения двухчастотных колебаний и резонансных явлений в электроприводе постоянного тока с импульсным управлением.

Материалы и методы

На рис. 1 представлена схема замещения электропривода постоянного тока

с широтно-импульсным регулированием угловой частоты вращения ротора [16].

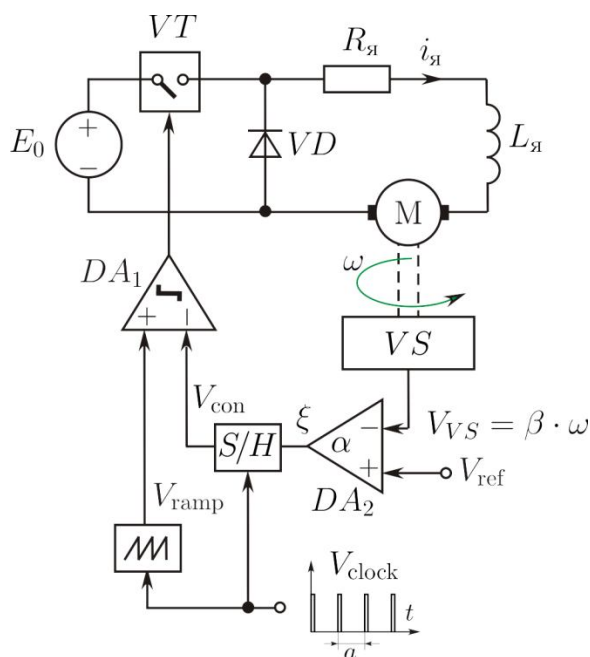


Рис. 1. Схема замещения системы управления

Fig. 1. Control system equivalent circuit

Здесь VT – импульсный ключ; VD – диод, замыкающий ток якоря при выключении VT ; E_0 – напряжение питания; M – двигатель постоянного тока с независимым возбуждением, например, с постоянными магнитами; VS – датчик угловой частоты вращения ротора ω . Регулятор состоит из усилителя сигнала ошибки DA_2 и источника опорного напряжения V_{ref} . Величина V_{ref} пропорциональна величине сигнала задания частоты вращения ротора. Компаратор DA_1 , устройство выборки-хранения S/H , генератор тактовых импульсов V_{clock} и формирователь пилообразного напряжения $V_{ramp}(t)$ образуют модулятор,

реализующий широтно-импульсную модуляцию первого рода [17].

Математическая модель электропривода согласно рис.1 представляется системой дифференциальных уравнений вида [16]

$$\frac{dX}{dt} = G(t, X), \quad x = (x_1, x_2)^T, \\ G = (g_1, g_2)^T, \quad (1)$$

$$g_1 = -\frac{R_{\text{я}}}{L_{\text{я}}}x_1 - \frac{C_{\omega}}{L_{\text{я}}}x_2 + \frac{E_0}{L_{\text{я}}}K_{\text{F}},$$

$$g_2 = \frac{C_{\omega}}{J}x_1 - \frac{M_c}{J},$$

$$\text{где } K_{\text{F}} = \frac{1}{2} \left[1 - \text{sign}(\xi_k - V_{\text{ramp}}(t)) \right],$$

$$\xi_k = \xi(t)|_{t=a \lfloor t/a \rfloor}, \quad \xi(t) = \alpha \cdot (V_{\text{ref}} - \beta x_2(t));$$

$$V_{\text{ramp}}(t) = \frac{V_0}{\alpha} (t/a - \lfloor t/a \rfloor).$$

Здесь x_1 – ток якоря $i_{\text{я}}$; x_2 – угловая частота вращения ротора ω ; $L_{\text{я}}$ и $R_{\text{я}}$ – соответственно, суммарная индуктивность и сопротивление якорной цепи двигателя; C_{ω} – постоянная двигателя; J – момент инерции, приведённый к валу; M_c – статический момент; ξ и K_{F} – соответственно, сигналы на входе и на выходе модулятора; $\lfloor t/a \rfloor$ – функция, выделяющая целую часть аргумента t/a ; $V_{\text{vs}} = \beta x_2$ – выходной сигнал датчика VS , где β – чувствительность датчика; V_0 – опорный сигнал модулятора; α – коэффициент усиления корректирующего звена DA_2 ; a – период следования импульсов тактового генератора.

Параметры:

$$R_{\text{я}} = 0,53 \text{ Ом}, \quad L_{\text{я}} = 0,53 \cdot 10^{-3} \text{ Гн};$$

$$C_{\omega} = 0,362 \text{ В} \cdot \text{с}, \quad J = 0,001884 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$M_c = 10 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad V_{\text{ref}} = 3 \text{ В}; \quad V_0 = 10 \text{ В};$$

$$\beta = 0,0318 \text{ В/с}; \quad E_0 = 35,0 \text{ В}; \quad 0 < \alpha < 120.$$

Собственные значения λ_1 и λ_2 матрицы коэффициентов уравнений (1) действительны и отрицательны:

$$\lambda_1 = -\frac{R_{\text{я}}}{2 \cdot L_{\text{я}}} + \sqrt{\frac{R_{\text{я}}^2}{4L_{\text{я}}^2} + \frac{C_{\omega}^2}{J \cdot L_{\text{я}}}};$$

$$\lambda_2 = -\frac{R_{\text{я}}}{2 \cdot L_{\text{я}}} - \sqrt{\frac{R_{\text{я}}^2}{4L_{\text{я}}^2} + \frac{C_{\omega}^2}{J \cdot L_{\text{я}}}}.$$

От переменных x_1, x_2 перейдем к безразмерным переменным x, y с помощью замены [11 – 13, 16, 17]:

$$x_1 = \frac{E_0}{L_{\text{я}}(\lambda_1 - \lambda_2)} \left(\frac{\lambda_2 + R_{\text{я}}/L_{\text{я}}}{\lambda_1} x - \frac{\lambda_1 + R_{\text{я}}/L_{\text{я}}}{\lambda_2} y \right),$$

$$x_2 = \frac{E_0 \cdot C_{\omega}}{J \cdot L_{\text{я}} \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)} \left(\frac{x}{\lambda_1} - \frac{y}{\lambda_2} \right). \quad (2)$$

Подставив (2) в (1) и разрешив (1) относительно производных, получим:

$$\dot{x} = \lambda_1 (x - K_{\text{F}} + \Omega_1); \\ \dot{y} = \lambda_2 (y - K_{\text{F}} + \Omega_2), \quad (3)$$

$$K_{\text{F}} = \begin{cases} 1, & \xi_k > 0, \\ 0, & \xi_k \leq 0, \end{cases}$$

$$\xi_k = \varphi_k - \eta(t), \quad \varphi_k = v y_k - x_k + q,$$

$$\eta(t) = \frac{P}{\alpha} (t/a - \lfloor t/a \rfloor),$$

$$x_k = x(ka), \quad y_k = y(ka), \quad k = 0, 1, 2, \dots,$$

$$\text{где } P = \frac{V_0 \cdot C_{\omega} (\lambda_2 - \lambda_1)}{\beta \lambda_2 E_0}, \quad q = \frac{V_{\text{ref}}}{V_0} P,$$

$$v = \lambda_1 / \lambda_2, \quad \Omega_1 = \frac{M_c \cdot C_{\omega}}{E_0 \cdot J \cdot (\lambda_2 + R_{\text{я}}/L_{\text{я}})},$$

$$\Omega_2 = \frac{M_c \cdot C_{\omega}}{E_0 \cdot J \cdot (\lambda_1 + R_{\text{я}}/L_{\text{я}})}.$$

Динамическая система (3) была сведена к кусочно-гладкому отображению [17,18]:

$$F:(x,y) \rightarrow F(x,y), \quad (4)$$

$$F(x,y) = \begin{cases} F_L(x,y), & \vartheta y - x + q > \frac{P}{\alpha}, \\ F_M(x,y), & 0 < \vartheta y - x + q < \frac{P}{\alpha}, \\ F_R(x,y), & \vartheta y - x + q < 0. \end{cases} \quad (5)$$

Здесь

$$F_L(x,y) = \begin{pmatrix} e^{a\lambda_1}(x-1+\Omega_1)+1-\Omega_1 \\ e^{a\lambda_2}(y-1+\Omega_2)+1-\Omega_2 \end{pmatrix};$$

$$F_R(x,y) = \begin{pmatrix} e^{a\lambda_1}(x+\Omega_1)-\Omega_1 \\ e^{a\lambda_2}(y+\Omega_2)-\Omega_2 \end{pmatrix};$$

$$F_M(x,y) = \begin{pmatrix} e^{a\lambda_1}(x-1+\Omega_1)+e^{a\lambda_1(1-z)}-\Omega_1 \\ e^{a\lambda_2}(y-1+\Omega_2)+e^{a\lambda_2(1-z)}-\Omega_2 \end{pmatrix},$$

$$z = \frac{\alpha}{P}\varphi, \quad \varphi = \vartheta y - x + q.$$

Результаты и их обсуждение

На рис.2(а) представлены результаты бифуркационного анализа, выполненного при вариации параметра α в диапазоне $34.84 < \alpha < 36.5$.

При $\alpha < \alpha_{NS}$ существует устойчивая гиперболическая неподвижная точка: комплексно-сопряженная пара мультипликаторов находится внутри единичного круга. Такая неподвижная точка называется устойчивым фокусом.

В точке $\alpha = \alpha_{NS}$ мультипликаторы выходят на границу единичного круга. В этом случае говорят, что неподвижная точка становится негиперболической. Негиперболическая неподвижная

точка с комплексно-сопряженной парой мультипликаторов, лежащих на границе единичного круга, является асимптотически устойчивой [7].

При дальнейшем увеличении коэффициента усиления α абсолютное значение мультипликаторов становится больше единицы. В результате этого неподвижная точка становится неустойчивым фокусом [7, 8, 11-13, 17]. На бифуркационной диаграмме сплошная линия отвечает устойчивому, а пунктирная – неустойчивому фокусу.

Потеря устойчивости, когда $\alpha > \alpha_{NS}$, приводит к мягкому рождению двухчастотных квазипериодических колебаний. Таким колебаниям в фазовом пространстве отображения, как мы отмечали ранее, отвечает замкнутая инвариантная кривая (рис. 2(б)).

При дальнейшем изменении параметра происходит резонанс через седло-узловую бифуркацию [6–9]. На рис. 2(в) изображена резонансная замкнутая кривая с числом вращения 2:23. Для лучшей иллюстрации явления фазовый портрет приведен в переменных x_1 и x_2 согласно (2). На замкнутой кривой лежит пара периодических орбит: устойчивая и седловая. Инвариантная кривая является замыканием неустойчивых многообразий $W_u^\pm$ седловой периодической орбиты на точки устойчивого цикла [6-9, 12, 13, 15, 16, 18, 19].

Расчет устойчивых многообразий седлового цикла выполнен с помощью алгоритма, представленного в [20,21].

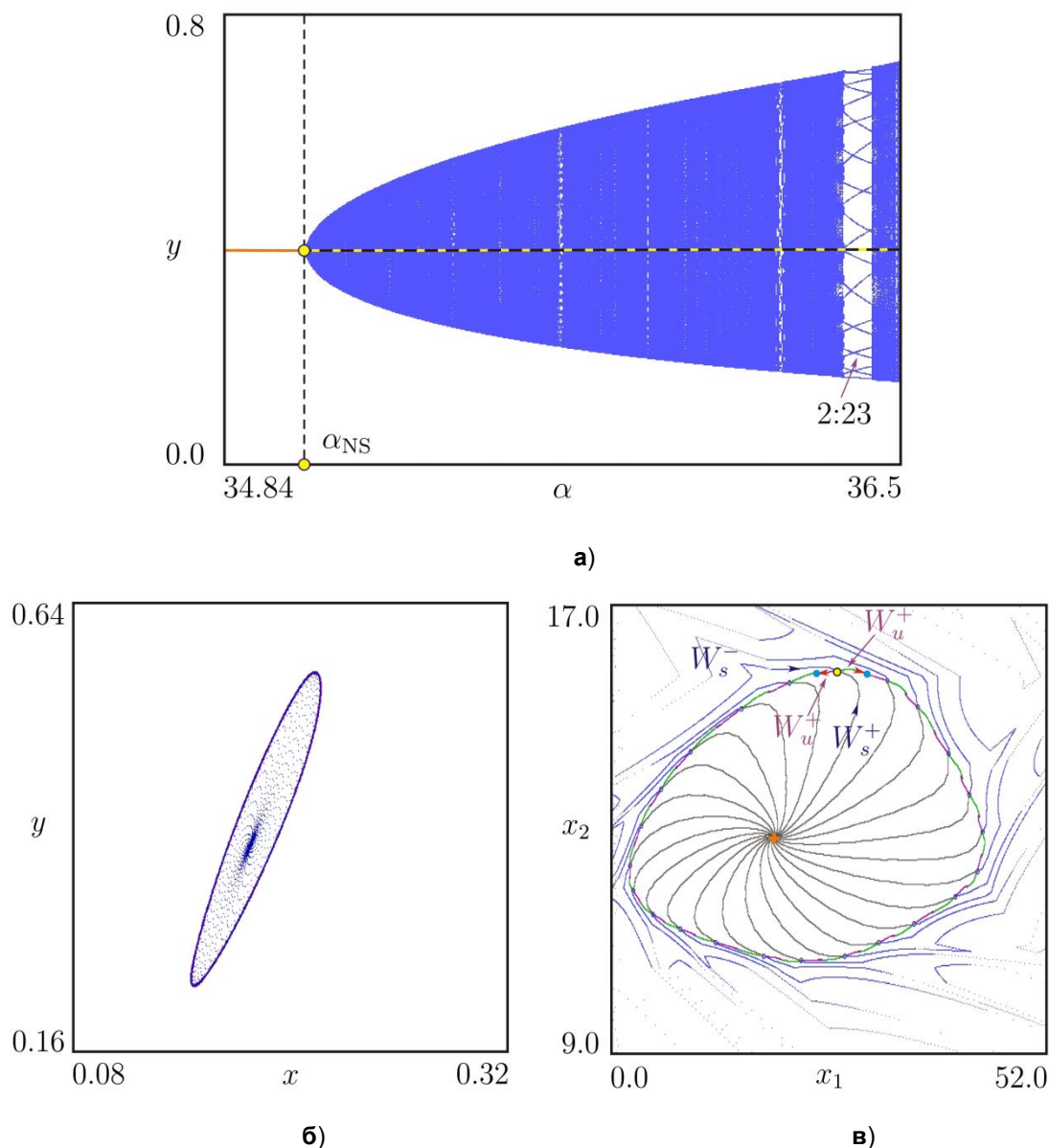


Рис. 2. (а) Бифуркационная диаграмма для $34,84 < \alpha < 36,5$. Здесь α_{NS} – точка бифуркации Неймарка-Саккера. (б) Фазовый портрет, изображающий замкнутую инвариантную кривую с иррациональным числом вращения при $\alpha = 35,5$. (в) Фазовый портрет для резонансной замкнутой кривой с числом вращения 2:23 при $\alpha = 36,39$

Fig. 2. (а) Bifurcation diagram for $34,84 < \alpha < 36,5$. Here α_{NS} – is the Neimark-Sacker bifurcation point. (б) Phase portrait shows a closed invariant curve with an irrational rotation number at $\alpha = 35,5$. (в) Phase portrait for a resonance closed curve with a rotation number 2:23 at $\alpha = 36,39$

Выводы

В представленной работе выполнен анализ механизмов возникновения двух-частотных квазипериодических колебаний через бифуркацию Неймарка-Сак-

кера в электроприводе постоянного тока с импульсным управлением. Изучена нелокальная седло-узловая бифуркация, приводящая к резонансу на замкнутой кривой, характеризуемой двумя независимыми частотами, когда их отношение стано-

вится рациональным числом. При этом замкнутая кривая остается инвариантной, но предельные точки орбиты образуют пару циклов – устойчивый и седловой.

Список литературы

1. Alligood K.T., Sauer T.D., Yorke J. A. Chaos: An Introduction to Dynamical Systems. New York: Springer, 2000. <https://doi.org/10.1007/b97589>
2. Parker T. S., Chua L.O. Practical Numerical Algorithms for Chaotic Systems. Berlin: Springer-Verlag, 1989. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3486-9>
3. Strogatz S. H. Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering. 2nd ed. Boulder: Westview Press, 2015. <https://doi.org/10.1063/PT.3.2751>
4. Palis J., De Melo W. Geometric Theory of Dynamical Systems. New York, Berlin: Springer-Verlag, 1982. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5703-5>
5. Argyris J., Faust G., Haase M., Friederich R. An Exploration of Dynamical Systems and Chaos. New York: Springer, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46042-9>
6. Pikovsky A., Rosenblum M., Kurths J. Synchronization: A Universal Concept in Nonlinear Science. New York: Cambridge University Press, 2001. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511755743>
7. Kuznetsov Yu. Elements of Applied Bifurcation Theory. New York: Springer, 2004. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3978-7>
8. Aronson D. G., Chory M. A., Hall G. R., McGehee R.P. Bifurcations from an invariant circle for two-parameter families of maps of the plane: A computer-assisted study // Comm. Math. Physics. 1982. Vol. 83. № 3. P. 303–354. <https://doi.org/10.1007/BF01213607>
9. Agliari A., Bischi G.-I., Dieci R., Gardini L. Global bifurcations of closed invariant curves in two-dimensional maps: A computer assisted study // Int. J. Bifurcation Chaos. 2005. Vol. 15. № 4. P. 1285–1328, <https://doi.org/10.1142/S0218127405012685>
10. Sushko I., Gardini L. Center Bifurcation for a Two-Dimensional border-Collision Normal Form // Int. J. Bifurcation Chaos. 2008. Vol. 18. № 4. P. 1029–1050. <https://doi.org/10.1142/S0218127408020823>
11. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E. Torus birth bifurcation in a DC/DC converter // IEEE Trans. Circ. & Sys. I. 2006. Vol. 53. № 8. P. 1839–1850. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2006.879060>
12. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E. Equilibrium-torus bifurcation in nonsmooth systems // Physica D. 2008. Vol. 237. № 7. P. 930 – 936. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2007.11.019>

13. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E. Direct transition from a stable equilibrium to quasiperiodicity in non-smooth systems // *Physics Letters A*. 2008. Vol. 372. №13. P. 2237–2246. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2007.08.077>
14. Zhusubaliyev Zh. T., Soukhoterlin E., Mosekilde E. Quasiperiodicity and torus breakdown in a power electronic DC/DC converter // *Mathematics and Computers in Simulation*. 2007. Vol. 73. № 6. P. 364–377. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2006.06.021>
15. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E., Yanochkina O.O., Torus bifurcations in multi-level converter systems // *Int. J. Bifurcation Chaos*. 2011. Vol. 21. № 8. P. 2343-2356. <https://doi.org/10.1142/S0218127411029835>
16. Яночкина О.О., Болдырева Е.О. Устойчивость колебаний импульсной системы управления электроприводом // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2020; 24(3): 152-165. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-152-165>.
17. Хаотическая динамика импульсных систем / Ж. Т. Жусубалиев, В. Г. Рубанов, В. С. Титов, О. О. Яночкина. Белгород: Изд-во БГТУ, 2018.
18. Яночкина О.О., Чернецкая И.Е., Жусубалиев Ж.Т. Мультистабильность и квазипериодичность в системе управления барабанным окомкователем // *Системы управления и информационные технологии*. 2009. № 3 (37). С. 58-63.
19. Электропривод с многозонным импульсным управлением для окомкователя сыпучих материалов / Ж.Т. Жусубалиев, В.С. Титов, И.Е. Чернецкая, О.О. Яночкина // *Электротехнические комплексы и системы управления*. 2010. № 2. С. 45-50.
20. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2017661000 Российская Федерация. Программа расчета инвариантных многообразий седловых циклов двумерных обратимых кусочно-гладких отображений / Ж.Т. Жусубалиев, В.Г. Рубанов, Ю.А. Гольцов, О.О. Яночкина; заявитель и правообладатель Белгородский технологический университет им. В.Г. Шухова. №2017617817; заявл. 03.08.2017; опубл. 02.10.2017. 1 с.
21. Жусубалиев Ж.Т., Рубанов В.Г., Гольцов Ю.А. К расчету инвариантных многообразий кусочно-гладких отображений // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2020; 24(3): 166-182. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-166-182>.

References

1. Alligood K.T., Sauer T.D., Yorke J. A. *Chaos: An Introduction to Dynamical Systems*. New York, Springer, 2000. <https://doi.org/10.1007/b97589>
2. Parker T. S., Chua L.O. *Practical Numerical Algorithms for Chaotic Systems*. Berlin, Springer-Verlag, 1989. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3486-9>

3. Strogatz S. H. *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*. 2nd ed. Boulder, Westview Press, 2015. <https://doi.org/10.1063/PT.3.2751>
4. Palis J., De Melo W. *Geometric Theory of Dynamical Systems*. New York, Berlin, Springer-Verlag, 1982. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5703-5>
5. Argyris J., Faust G., Haase M., Friederich R. *An Exploration of Dynamical Systems and Chaos*. New York, Springer, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46042-9>.
6. Pikovsky A., Rosenblum M., Kurths J. *Synchronization: A Universal Concept in Non-linear Science*. New York, Cambridge University Press, 2001. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511755743>
7. Kuznetsov Yu. *Elements of Applied Bifurcation Theory*. New York, Springer, 2004. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3978-7>
8. Aronson D. G., Chory M. A., Hall G. R., McGehee R.P. Bifurcations from an invariant circle for two-parameter families of maps of the plane: A computer-assisted study. *Comm. Math. Physics*, 1982, vol. 83, no. 3, pp. 303–354. <https://doi.org/10.1007/BF01213607>.
9. Agliari A., Bischi G.-I., Dieci R., Gardini L. Global bifurcations of closed invariant curves in two-dimensional maps: A computer assisted study. *Int. J. Bifurcation Chaos*, 2005, vol. 15, no.4, pp. 1285–1328. <https://doi.org/10.1142/S0218127405012685>
10. Sushko I., Gardini L. Center Bifurcation for a Two-Dimensional border-Collision Normal Form. *Int. J. Bifurcation Chaos*, 2008, vol. 18, no. 4, pp. 1029–1050. <https://doi.org/10.1142/S0218127408020823>
11. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E. Torus birth bifurcation in a DC/DC converter. *IEEE Trans. Circ. & Sys. I*, 2006, vol. 53, no. 8, pp. 1839–1850. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2006.879060>
12. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E. Equilibrium-torus bifurcation in nonsmooth systems. *Physica D*, 2008, vol. 237, no. 7, pp. 930 – 936. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2007.11.019>
13. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E. Direct transition from a stable equilibrium to quasiperiodicity in non-smooth systems. *Physics Letters A*, 2008, vol. 372, no. 13, pp. 2237–2246. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2007.08.077>
14. Zhusubaliyev Zh. T., Soukhoterlin E., Mosekilde E. Quasiperiodicity and torus breakdown in a power electronic DC/DC converter. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2007, vol. 73, no. 6, pp. 364–377. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2006.06.021>
15. Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E., Yanochkina O.O. Torus bifurcations in multi-level converter systems. *Int. J. Bifurcation Chaos*, 2011, vol. 21, no. 8, pp. 2343–2356. <https://doi.org/10.1142/S0218127411029835>

16. Yanochkina O. O., Boldyreva E. O. Ustoichivost' kolebanii impul'snoi sistemy upravleniya elektropriivodom [Vibration Stability of the Impulse System of the Electric Drive Control]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(3): 152-165 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-152-165>.

17. Zhusubaliyev Zh. T., Rubanov V. G., Titov V. S., Yanochkina O. O. *Xaoticheskaya dinamika impul'snykh sistem* [Chaotic dynamics of impulse systems]. Belgorod, BGTU Publ., 2018 (In Russ.).

18. Yanochkina O.O., Chernetskaya I.E., Zhusubaliyev Zh.T. Mul'tistabil'nost' i kvaziperiodichnost' v sisteme upravleniya barabannym okomkovatelem. [Multistability and quasiperiodicity in the pelletizing drum control system]. *Sistemy upravleniya i informacionnye tekhnologii*, 2009, no. 3 (37), pp. 58-63 (In Russ.).

19. Zhusubaliyev Z.T., Titov V.S., Chernetskaya I.E., Yanochkina O.O. Elektroprivod s mnogozonnym impul'snym upravleniem dlya okomkovatelya sypuchikh materialov [Electric drive with a multilevel pulse modulated control for pelletizing free-flowing materials]. *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya = Elektrotechnical Systems and Complexes*, 2010, no. 2, pp. 45-50 (In Russ.).

20. Zhusubaliyev Zh. T., Rubanov V. G., Goltsov Yu. A., Yanochkina O. O. *Programma rascheta invariantnykh mnogoobrazii sedlovyykh tsiklov dyu-mernyykh obratimyykh kusochno-gladykh otobrazhenii* [Program for calculating invariant varieties of saddle cycles of two-dimensional invertible piecewise smooth maps]. Certificate of registration of the computer program 2017661000 Russian Federation. No. 2017617817 (In Russ.).

21. Zhusubaliyev Zh.T., Rubanov V.G., Gol'tsov Yu.A. K raschetu invariantnykh mnogoobrazii kusochno-gladykh otobrazhenii [Calculation of Invariant Manifolds of Piecewise-Smooth Maps]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(3): 166-182. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-166-182> (In Russ.).

Информация об авторе / Information about the Author

Яночкина Ольга Олеговна, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: yanoolga@gmail.com

Olga O. Yanochkina, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Computer Science, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: yanoolga@gmail.com

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-2-93-106>

Композиция моделей классификации для распознавания скорости течения жидкостей в капиллярах

Е. П. Корнаева¹ ✉, И. Н. Стебаков¹, Д. Д. Ставцев¹,
В. В. Дремин¹, А. В. Корнаев¹

¹ Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева
Наугорское шоссе 20, г. Орёл 302020, Российская Федерация

✉ e-mail: lenoks_box@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Разработка методики оценки средней скорости течения физиологических жидкостей в капиллярах по изображениям, полученным с помощью лазерной спекл-контрастной визуализации. Методика включает получение экспериментальных данных в виде изображения течения жидкости в тонкой трубке, их предварительную обработку, включая отсеивание и сжатие данных, а также обучение и тестирование приближенных моделей с использованием современных методов машинного обучения.

Методы. Экспериментальное исследование течения жидкости в трубке основано на применении метода лазерной спекл-контрастной визуализации, по полученным изображениям рассчитываются значения пространственного спекл-контраста. Полученные данные подвергаются предварительной обработке, включающей отсеивание данных до установившегося режима течения, а также сжатие полученных изображений с помощью метода главных компонент, что позволяет снизить размерность признакового пространства. Задача прогнозирования средней скорости по изображению течения жидкости решается как задача классификации на основе композиции решающих деревьев, построенных с помощью процедуры бэггинга, а также в виде «случайного» леса.

Результаты. Разработана методика предсказания средней скорости течения жидкости в капилляре по изображениям, полученным с помощью метода лазерной спекл-контрастной визуализации. Точность предсказания средней скорости (или расхода) на обучающей выборке составила около 91%, на валидационной и тестовой выборках - не менее 81,5%.

Заключение. На основе разработанной методики планируется определять кинематические характеристики параметров течения физиологических жидкостей, что позволит улучшить разработанный ранее авторами инерционный способ измерения вязкости испытуемых жидкостей, избавившись от ряда допущений относительно профиля скорости.

Ключевые слова: капилляр; лазерная спекл-контрастная визуализация; средняя скорость течения; вязкость; машинное обучение; решающие деревья, бэггинг.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Настоящее исследование выполнено в рамках выполнения проекта РНФ №20-79-00332.

Для цитирования: Композиция моделей классификации для распознавания скорости течения жидкостей в капиллярах / Е. П. Корнаева, И. Н. Стебаков, Д. Д. Ставцев, В. В. Дремин, А. В. Корнаев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(2): 93-106. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-2-93-106>.

Поступила в редакцию 25.03.2021

Подписана в печать 29.04.2021

Опубликована 24.08.2021

Composition of Classification Models for Recognizing the Flow Velocity of Liquids in Capillaries

Elena P. Kornaeva ¹ ✉, Ivan N. Stebakov ¹, Dmitry D. Stavtsev ¹,
Viktor V. Dremin ¹, Alexey V. Kornaev ¹

¹ Orel State University named after I.S. Turgenev
20, Naugorskoe highway, Orel 302020, Russian Federation

✉ e-mail: lenoks_box@mail.ru

Abstract

Purpose of research. Development of a technique for estimating the average flow rate of physiological fluids in capillaries from images obtained using laser speckle-contrast imaging. The technique includes obtaining experimental data in the form of an image of the fluid flow in a thin tube, their preliminary processing, including filtering and compressing data, as well as training and testing approximate models using modern machine learning methods.

Methods. The experimental study of the fluid flow in the tube is based on the application of the laser speckle-contrast imaging method. The spatial speckle-contrast values are calculated from the obtained images. The obtained data are subjected to preliminary processing, including the data filtering out and extending to a steady flow mode, as well as compressing the obtained images using the principal component method, which allows reducing the dimension of the feature space. The problem of predicting the average velocity from the image of the fluid flow is solved as a classification problem based on the composition of decision trees constructed through the bagging procedure, as well as in the form of a random forest.

Results. A technique for predicting the average velocity of liquid flow in a capillary from images obtained using the laser speckle-contrast imaging method has been developed. The accuracy of predicting the average velocity (or flow rate) based on the training sample was about 91%, on the validation and test samples - at least 81.5%.

Conclusion. Based on the developed technique, it is planned to determine the kinematic characteristics of the parameters of physiological fluids flow, which will improve the inertial method of measuring the viscosity of the tested liquids developed earlier by the authors, getting rid of a number of assumptions about the velocity profile.

Keywords: capillary; laser speckle-contrast visualization; average flow velocity; viscosity; machine learning; decision trees, bagging.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Financing: The present study was carried out within the framework of the RGNF project No. 20-79-00332.

For citation: Kornaeva E.P., Stebakov I.N., Stavtsev D.D., Dremin V.V., Kornaev A.V. Composition of Classification Models for Recognizing the Flow Velocity of Liquids in Capillaries. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(2): 93-106 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-2-93-106>.

Received 25.03.2021

Accepted 29.04.2021

Published 24.08.2021

Введение

Анализ изменения свойств физиологических жидкостей, в частности крови, может использоваться в качестве диагностики различных заболеваний, включая сердечно-сосудистые патологии, рак, ламинопатию, диабет, ряд инфекционных заболеваний, и даже старения. В работах [1-4] показано, что изменение вязкости крови связано с регуляцией иммунных реакций. В работе [5] представлены данные о том, что повышение вязкости крови ассоциировано с рядом заболеваний: острый нелимфоцитарный лейкоз, хронический лимфолейкоз, хронический миелоидный лейкоз, серповидно-клеточная анемия. Таким образом, исследование реологических и кинематических свойств физиологических жидкостей является актуальной задачей. Особый интерес представляют малоинвазивные методы. Существенные успехи достигнуты в развитии методов регистрации динамического рассеяния света для анализа параметров кровотока, в частности в лазерной доплеровской флоуметрии и лазерной спекл-контрастной визуализации (ЛСКВ), которые позволяют производить исследования в режиме «in vivo» [6-9]. Оценка микроциркуляции с помощью ЛСКВ применяется в ревматологии, дерматологии, офтальмологии, неврологии и многих других областях медицины [10-12]. ЛСКВ метод позволяет в режиме реального времени получать визуализацию микроциркуляции в

тканях. В указанных выше работах демонстрируется качественная оценка изменения потока в капилляре, показано, что существует корреляционная связь спекл-контраста от скорости. Однако существует проблема определения количественных параметров кровотока. Так для измерения вязкости жидкости необходимо определять кинематические параметры потока. С развитием современных методов машинного обучения и доступностью мощных средств GPU становится возможным построение сложных приближенных моделей по большим массивам экспериментальных данных.

В данной работе разработаны приближенные модели, позволяющие распознавать среднюю скорость течения физиологических жидкостей по изображениям, полученным с помощью метода ЛСКВ. Эксперимент проводился при фиксированных значениях скорости подачи жидкости в трубке, поэтому средняя скорость течения может рассматриваться как дискретная величина. Модели классификации средней скорости построены на основе композиции решающих деревьев [13]. Разработанная в данной работе методика в дальнейшем будет применима для обработки экспериментов по измерению вязкости физиологических жидкостей с применением инерционного способа измерения [13], в котором предварительно необходимо определять кинематические характеристики течения жидкости.

Материалы и методы

Проведение эксперимента и предварительная подготовка данных для обучения

Эксперимент проводился на установке (рис.1) Центра биомедицинской фотоники ОГУ имени И.С. Тургенева [8]. Исследовалось напорное течение физиологической жидкости через медицинский стеклянный капилляр диаметром 1,6 мм. В качестве жидкости использовался интралипид 20% (Fresenius

Kaby, США) в концентрации 8 %. Для обеспечения постоянного расхода заданной величины использовался электронасос ДШ-08 (Висма, Беларусь). Регистрация потока, освещенного лазером LDM785 (Thorlabs Inc.), осуществлялась с помощью КМОП-камеры UI-3360CP-NIR-GL Rev.2 (IDS GmbH, Германия) в сочетании с адаптером-удлинителем и объективом MVL25TM23 (Thorlabs, Inc., США). Лазер работает на длине волны 785 нм.

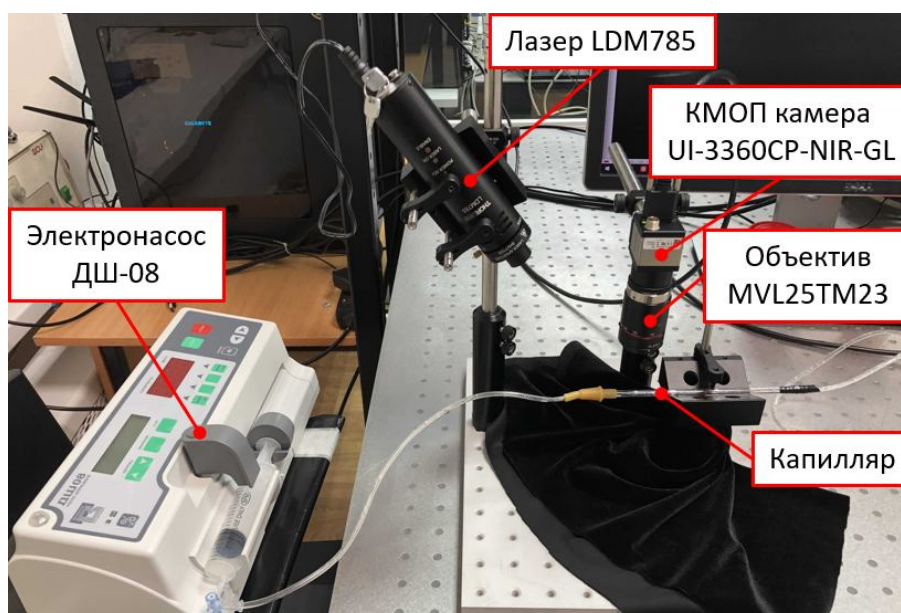


Рис. 1. Фотография экспериментальной установки

Fig.1. Photograph of the experimental setup

Объёмный расход раствора в насосе был пересчитан с учётом диаметра капилляра таким образом, чтобы создавать в нем потоки со средней скоростью 0,5; 1; 1,5; 2 мм/с соответственно. Изменение скорости движения жидкости регистрировалось камерой со временем выдержки 5, 15 и 33 мс. Частота записи изображений составляла 30 кадр/с.

Эксперимент включал в себя по пять параллельных опытов для каждой средней скорости для каждого соотношения времени выдержки и концентрации. Все опыты выполнялись в случайном порядке. Время записи составляло около 1 минуты.

Оценка скорости течения жидкости основана на расчете величины пространственного контраста [14]:

$$K = \frac{\sigma_n}{\langle I_n \rangle},$$

где n – размер области расчета;

σ_n – стандартное отклонение интенсивности;

$\langle I_n \rangle$ – средняя интенсивность.

При расчете пространственного спекл-контраста используется область из нескольких пикселей в одном кадре, чаще всего принимают размер окна равным 7×7 пикселей. Если время экспозиции детектора бесконечно мало или меньше времени флуктуации интенсивности спеклов, то стандартное отклонение σ будет равно средней интенсивности, что теоретически приводит к значению speckle contrast равному единице. Если присутствует движение и время экспозиции детектора порядка или больше времени флуктуации, то изображение будет размытым. Это означает, что стандартное отклонение будет меньшим по сравнению со средней интен-

сивностью, что приведет к потере контраста. Таким образом, K находится в пределах от 0 до 1.

На рис. 2 представлено изменение среднего пространственного спекл-контраста от скорости движения жидкости по капилляру. Парный коэффициент корреляции равен $-0,91$ и при уровне значимости $0,05$ наблюдаемое значение критерия Стьюдента по модулю не значительно превосходит критическое (разница в третьем знаке). В таком случае данных для принятия значимости парного коэффициента корреляции недостаточно, что в данном случае говорит о том, что связь между средней скоростью и пространственным спекл-контрастом скорее нелинейная. Значение спекл-контраста при скорости больше $1,5$ мм/с предположительно асимптотически приближается к некоторой константе.

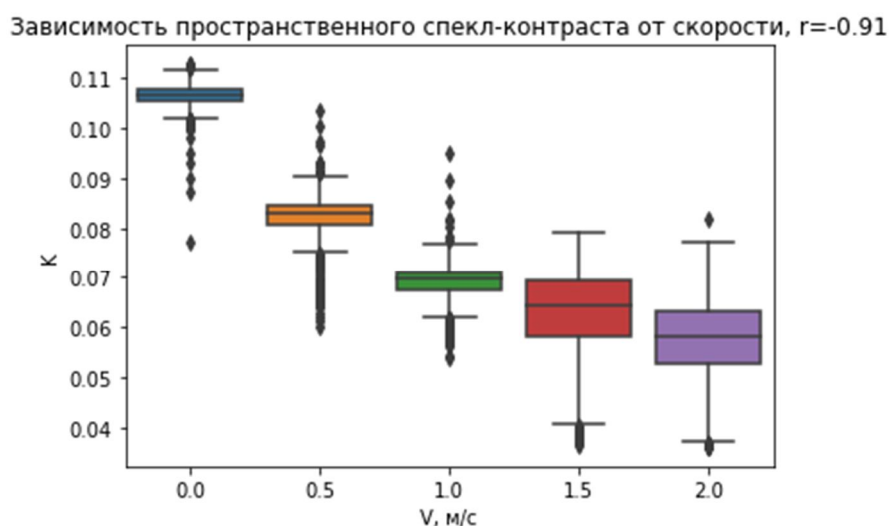


Рис. 2. Изменение пространственного спекл-контраста от средней скорости

Fig. 2. The box-plot for spatial speckle contrast at different flow rates

По графикам также видно, что в данных присутствуют выбросы, которые обусловлены наличием низких и высоких спекл-контрастов до установившегося режима подачи жидкости. При скорости 1,5 и 2,0 мм/с можно заметить большой разброс значений относительно среднего, что объясняется нестабильной работой насоса. Такие данные были удалены из выборки.

Модели прогноза средней скорости жидкости в капилляре

Задачу определения средней скорости течения жидкости в капиллярах с учетом полученных данных можно рассматривать как задачу классификации и аппроксимировать не сами значения скорости, а их вероятности. В самом деле, переменную скорости со значени-

ями $\{0, 0.5, 1, 1.5, 2\}$ можно рассматривать как дискретную случайную величину, соответствующую номерам классов $\{0, 1, 2, 3, 4\}$. В качестве обучающей выборки выступает множество пар типа {изображение, номер класса}, количество экземпляров каждого класса примерно одинаковое. Фрагмент случайно выбранных экземпляров представлен на рис. 3. В качестве матрицы признаков рассматривается значение контраста в каждом пикселе изображения размером $[150 \times 150]$, таким образом, матрица признаков для выборки объема n имеет размер $n \times 150 \times 150$, а соответствующая матрица меток – размер $n \times 1$. Матрица признаков преобразуется в двумерную размером $n \times 22500$, т.е. количество признаков получается равным 22500.

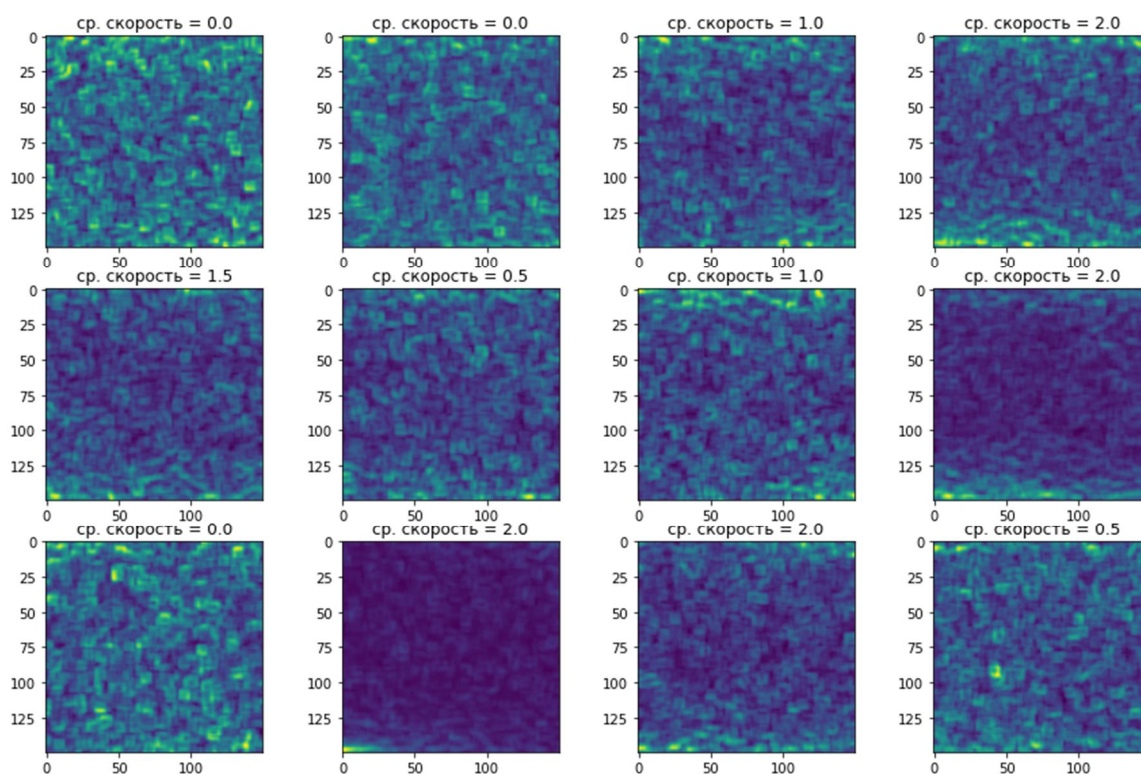


Рис. 3. Случайные экземпляры выборки

Fig. 3. Random sample from the training set

Ввиду большой мерности пространства признаков можно предположить, что какие-то признаки (контрасты на изображении) могут оказаться незначимыми. На основе этого предположения к признакам был применен метод главных компонент [14, 15], что позволило сократить мерность признакового пространства. В результате вычислительного эксперимента на разработанных моделях было установлено, что включение в матрицу признаков более 100 главных компонент не дает дальнейшего увеличения точности модели при прочих равных условиях.

Полученная выборка объемом 20 000 изображений разделена на три части: на тестирование взято 20%, на обучение и валидацию оставшиеся 80%, которые были разделены в отношении 70/30.

Задача прогнозирования средней скорости по виду контрастного изображения может быть решена как задача классификации с помощью композиции решающих деревьев. С одной стороны, решающие деревья представляют собой простые в понимании модели, позволяющие выявлять сложные закономерности, однако такие модели способны легко переобучаться [14, 16]. Т.е. каждое дерево в отдельности имеет низкое смещение и высокий разброс, т.к. с увеличением глубины склонно запоминать шумы в обучающей выборке. Этот недостаток способны решить композиции решающих деревьев при условии, что они построены на независимых выборках.

Одним из вариантов построения композиции решающих деревьев является обучение каждого дерева на бутстрапированной выборке, т.е. выборке, полученной из исходной с повторениями. Показано, что уникальных объектов в таких выборках около 63% [16]. Таким образом, каждое дерево, имеющее низкое смещение и высокий разброс, в композиции даст сложную, но не переобученную модель. В качестве предсказанного отклика для каждого изображения предполагается использовать модальное значение по предсказаниям всех деревьев.

При построении предикатов в каждой вершине Q_m , содержащей N_m объектов, использовался критерий минимума неопределенности (хаотичности [16, 17]):

$$\frac{N_l}{N_m} H(Q_l(\Theta)) + \frac{N_r}{N_m} H(Q_r(\Theta)) \xrightarrow{\Theta} \min,$$

где $\Theta = (j, t_m)$ – номер признака X_j и порог для предиката $X_j \leq t_m$ в вершине m ;

N_l, N_r – количество объектов в левой и правой вершине;

$Q_l(\Theta) = \{(X, y) | x_j \leq t_m\}$ – объекты в левую вершину;

$Q_r(\Theta) = Q_m \setminus Q_l(\Theta)$ – объекты в правую вершину;

$H(Q_i) = \sum_{k=1}^K p_{ik}(1 - p_{ik})$ – критерий Джини [15] как мера неопределенности в $i^{\text{ой}}$ вершине;

$p_{ik} = \frac{1}{N_i} \sum_{y \in Q_i} [y == k]$ – доля объектов $k^{\text{го}}$ класса, попавших в $i^{\text{ю}}$ вершину.

Другим вариантом композиции деревьев является «случайный лес» [14]. При разбиении вершины каждого дере-

ва выбирается случайным образом часть признаков, что позволяет сократить время поиска оптимального предиката. Таким образом, каждое дерево обучается все равно на всех признаках, но в каждой вершине рассматривается только их часть.

В следующем пункте представлены результаты классификации, основанные на композиции решающих деревьев, построенных с помощью процедуры бутстрапа и в виде «случайные леса».

Результаты и их обсуждение

Так как выборки являются сбалансированными по классам, то для оценки точности можно использовать долю вер-

ных ответов (accuracy). В табл. 1 представлена средняя доля верных ответов при обучении, валидации и тестировании для композиции решающих деревьев. Композиция моделей, построенных на основе бэггинга, оптимизировалась по следующим гиперпараметрам: количество деревьев в композиции $n_est=[30\ 50\ 100]$ и максимальная глубина каждого дерева $max_depth[6\ 8\ 10\ 12\ 14]$.

Значения средней точности модели представлены по 10 прогонам при фиксированном сочетании параметров. С ростом глубины деревьев ожидаемо растет разница между точностью обучения и точностью валидации.

Таблица 1. Точность композиции решающих деревьев на основе бэггинга

Table.1. The accuracy of the decision trees ensemble

Гиперпараметры / Hyperparameters		Точность, % / Accuracy, %		
n_est	« max_depth »	Обучения	Валидации	Тестирования
30	6	83,39	80,50	80,70
	8	87,96	80,50	80,80
	10	92,21	80,58	80,30
	12	94,89	80,67	80,20
	14	96,25	80,67	80,10
50	6	84,32	82,25	81,70
	8	87,32	82,50	81,30
	10	91,25	82,58	81,80
	12	94,14	82,17	81,70
	14	96,04	82,00	81,30
100	6	84,50	82,08	81,20
	8	87,43	82,25	81,20
	10	91,50	82,58	82,20
	12	94,75	82,25	81,90
	14	96,75	82,00	81,80

Максимальное значение точности на валидационной выборке в среднем составляет примерно 82,5%, что соответствует 50 деревьям в композиции и максимальной глубине, равной 10. Учитывая, что каждый прогон модели осуществляется на случайной подвыборке, незначительные колебания в точности не имеют значения, поэтому разница между 50 и 100 деревьями в композиции не

существенна. Также при количестве деревьев больше 50 максимальная глубина может выбираться в диапазоне от 6 до 10. Точность композиции на тестовой выборке составляет не менее 81,7%.

На рис.4 представлены значения средней точности «случайного леса» по 10 прогонам, деревья в лесе строились также на бутстрапированных выборках.

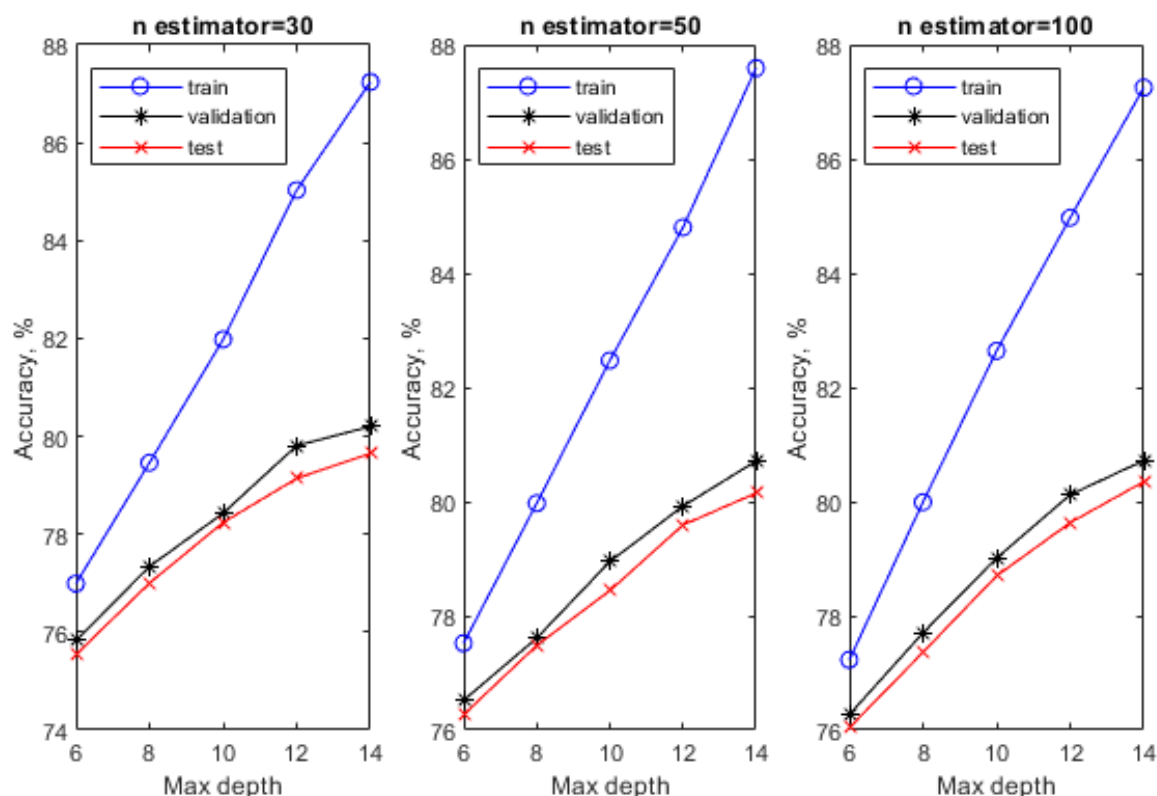


Рис. 4. Доля верных ответов «случайного леса»

Fig. 4. The 'random forest' true responses

Точность обучения и тестирования при тех же гиперпараметрах сопоставима с точность композиции решающих деревьев, обученных с помощью бэггинга. Небольшие различия можно объяснить случайным выбором подмножества признаков в каждой вершине дерева «случайного дерева».

Таким образом, в работе представлена методика распознавания средней скорости (или расхода) течения физиологических жидкостей в капилляре. Методика содержит несколько этапов. По экспериментальным данным, полученным в виде изображений течения физиологических жидкостей методом ла-

зерной спекл-контрастной визуализации, предварительно рассчитывается пространственный спекл-контраст. Далее для понижения размерности признакового пространства используется метод главных компонент, который позволяет отбросить пиксели, несущие несущественную информацию. По полученным в результате сжатия данным строятся композиции решающих деревьев с помощью процедуры бэггинга.

Построенные модели с тестовой точностью не менее 81,5% позволяют предсказывать среднюю скорость течения жидкости в капилляре по изображениям, полученным с помощью лазерной спекл-контрастной визуализации. Ранее в работе [18] авторами была представлена приближенная методика расчета вязкости жидкости, основанной на экспериментальных исследованиях течения с помощью инерционного вискозиметра. Представленные в данной работе модели расчета средней скорости (или объемного расхода) позволят модифицировать методику расчета вязкости жидкости в капилляре [18]. Также для совершенствования указанной методики предполагается модификация экспериментальной установки [18]: уменьшение ее размеров, добавление лазерного модуля для освещения трубки,

объектива и камеры, фиксирующей изображение. Также предполагается использование компьютера Jetson Nano, что обусловлено его небольшим размером и наличием ядер CUDA, которые позволяют обрабатывать изображения с камеры непосредственно на устройстве [19, 20].

Выводы

Разработана методика предсказания средней скорости течения жидкости в капилляре по изображениям течения. Предварительный анализ данных, связанный с отсеиванием их части до установившегося режима, а также использование бутстрапированных выборок позволило построить композиции моделей с точностью предсказания на обучающей выборке около 91% и на тестовой выборке - не менее 81,5%. Также предварительное снижение размерности признакового пространства позволило существенно сократить время обучения моделей, при достаточно большом объеме обучающей выборки. Разработанная методика позволит в дальнейшем определять кинематические характеристики параметров течения, что позволит проводить приближенный расчет вязкости жидкости с помощью ранее разработанного авторами инерционного способа определения вязкости.

Список литературы

1. Xu J., Vilanova G., Gomez H. Phase-field model of vascular tumor growth: Three-dimensional geometry of the vascular network and integration with imaging data // *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 2020; Vol. 359: 1-19.

2. Applying Methods of Diffuse Light Scattering and Optical Trapping for Assessing Blood Rheological Parameters: Erythrocytes Aggregation in Diabetes Mellitus / A.N. Semenov, A.E. Lugovtsov, K. Lee, and et. al. // *Izv. Saratov Univ. (N.S.), Ser. Physics*. Vol. 17. Iss. 2. P. 85–97 (in Russian). 2017; <http://doi.org/10.18500/1817-3020-2017-17-2-85-97>.
3. Yeow N. , Tabor R., Garnier G. Atomic force microscopy: From red blood cells to immunohematology // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2017. Vol. 249. P. 149–162. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cis.2017.05.011>.
4. Harris M. J., Wirtz D., Wu P. Dissecting cellular mechanics: Implications for aging, cancer, and immunity // *Seminars in Cell & Developmental Biology*. 2018. P. 1 – 10.
5. Gertz M. A.. Acute hyperviscosity: syndromes and management // *Blood*. 2018. Vol. 132. Iss. 13. P. 1379-1385. <https://doi.org/10.1182/blood-2018-06-846816>.
6. Goodman J.W. Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications. Robert and Company Publisher. 2007.
7. Laser Doppler flowmetry in blood and lymph monitoring, technical aspects and analysis / V.V. Dremin, E.A. Zherebtsov, I.N. Makovik, and et al. // *Proceedings of SPIE*. 2017. Vol. 10063. P. 1006303. <http://doi.org/10.1117/12.2252427>.
8. Laser speckle contrast imaging of blood microcirculation in pancreatic tissues during laparoscopic interventions / E. Potapova, E. Seryogina., V. Dremin and et. al. // *Quantum Electronics*. 2020. Vol. 50. P. 33-14, <http://doi.org/10.1070/QEL17207>.
9. Image-guided simulation in comparison with laser speckle contrast imaging for full-field observation of blood flow in a microvasculature model / Y. Yang, J. Geng, H. Zhang, and et. al. // *Microvasc Res*. 2021. Vol. 133. <http://doi.org/10.1016/j.mvr.2020.104092>.
10. Wavelet Analysis of the Temporal Dynamics of the Laser Speckle Contrast in Human Skin / I. Mizeva, V. Dremin, E. Potapova and et al. // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2020. Vol. 67. No. 7. P. 1882-1889. <http://doi.org/10.1109/TBME.2019.2950323>.
11. Monitoring oxidative metabolism while modeling pancreatic ischemia in mice using a multimodal spectroscopy technique / V. Dremin, E. Potapova, A. Mamoshin and et al. // *Laser Physics Letters*. 2020. Vol. 11. No. 17. P. 115605. <http://doi.org/10.1088/1612-202X/abbefa>.
12. Clinical applications of laser speckle contrast imaging: a review / W. Heeman W. Steenbergen, Gooitzen M. van Dam et al. // *Journal of biomedical optics*. 2019. Vol. 24. No. 8. P. 1-11. <http://doi.org/10.1117/1.JBO.24.8.080901>.
13. Goodfellow Y. Y, Bengio Y., Courville A.. Deep learning. MIT Press. 2016.
14. Review of laser speckle contrast techniques for visualizing tissue perfusion / M. Draijer, E. Hondebrink, T. van Leeuwen, W. Steenbergen // *Lasers in medical science*. 2009; Vol. 24. No. 4: 639-651. <http://doi.org/10.1007/s10103-008-0626-3>.

15. Sarah Guido, Andreas Muller. Introduction to Machine Learning with Python: A Guide for data scientists. O'Reilly & Associates. 2017.
16. Geron A. Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn and TensorFlow. Tokyo, 2019.
17. Scikit-learn. Machine Learning in Python. URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/tree.html#tree>
18. Kornaeva E., Kornaev A., Savin L., and et al. Theoretical premises of a vibro-inertial method of viscosity measurement // *Vibroengineering Procedia*. 2016. Vol. 8. P. 440 – 445.
19. NVidia Jetson Nano Datasheet // [nvidia.com](https://developer.download.nvidia.com/assets/embedded/secure/jetson/Nano/docs/JetsonNano_DataSheet_DS09366001v1.0.pdf). URL: [https:// developer.download.nvidia.com/assets/embedded/secure/jetson/Nano/docs/JetsonNano_DataSheet_DS09366001v1.0.pdf](https://developer.download.nvidia.com/assets/embedded/secure/jetson/Nano/docs/JetsonNano_DataSheet_DS09366001v1.0.pdf)? (дата обращения: 15.03.2021).
20. Süzen A. A., Duman B., Şen B.. Benchmark Analysis of Jetson TX2, Jetson Nano and Raspberry PI using Deep-CNN // *2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*. 2020. P.1-5.

References

1. Xu J., Vilanova G., Gomez H. Phase-field model of vascular tumor growth: Three-dimensional geometry of the vascular network and integration with imaging data. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg*, 2020, vol. 359, pp. 1-19.
2. Semenov A.N., Lugovtsov A.E., Lee K. and et. al. Applying Methods of Diffuse Light Scattering and Optical Trapping for Assessing Blood Rheological Parameters: Erythrocytes Aggregation in Diabetes Mellitus. *Izv. Saratov Univ. (N.S.), Ser. Physics*, 2017, vol. 17, is. 2, pp. 85–97 (in Russian).; <http://doi.org/10.18500/1817-3020-2017-17-2-85-97>.
3. Yeow N. , Tabor R., Garnier G. Atomic force microscopy: From red blood cells to immunohematology. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2017, vol. 249, pp. 149–162. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cis.2017.05.011>.
4. Harris M. J., Wirtz D., Wu P. Dissecting cellular mechanics: Implications for aging, cancer, and immunity. *Seminars in Cell & Developmental Biology*, 2018, pp. 1 – 10.
5. Gertz M. A. Acute hyperviscosity: syndromes and management. *Blood*. 2018, vol. 132, iss. 13, pp. 1379-1385. <https://doi.org/10.1182/blood-2018-06-846816>.
6. Goodman J.W. Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications. Robert and Company Publisher. 2007.
7. Dremin V.V., Zhrebtssov E.A., Makovik I.N. and et al. Laser Doppler flowmetry in blood and lymph monitoring, technical aspects and analysis. *Proceedings of SPIE*, 2017, vol. 10063: 1006303. <http://doi.org/10.1117/12.2252427>.

8. Potapova E., Seryogina E., Dremine V. and et. al. Laser speckle contrast imaging of blood microcirculation in pancreatic tissues during laparoscopic interventions. *Quantum Electronics*, 2020, vol. 50, pp. 33-14. <http://doi.org/10.1070/QEL17207>.
9. Yang Y., Geng J., Zhang H. and et. al. Image-guided simulation in comparison with laser speckle contrast imaging for full-field observation of blood flow in a microvasculature model. *Microvasc Res*, 2021, vol. 133. <http://doi.org/10.1016/j.mvr.2020.104092>.
10. Mizeva I., Dremine V., Potapova E. and et al. Wavelet Analysis of the Temporal Dynamics of the Laser Speckle Contrast in Human Skin. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2020, vol. 67, no. 7, pp. 1882-1889. <http://doi.org/10.1109/TBME.2019.2950323>.
11. Dremine V., Potapova E., Mamoshin A. and et al. Monitoring oxidative metabolism while modeling pancreatic ischemia in mice using a multimodal spectroscopy technique. *Laser Physics Letters*, 2020, vol. 11, no. 17, p. 115605. <http://doi.org/10.1088/1612-202X/abbefa>.
12. Heeman W., Steenbergen W., Gooitzen M. van Dam et al. Clinical applications of laser speckle contrast imaging: a review. *Journal of biomedical optics*, 2019, vol. 24, no. 8, pp. 1-11. <http://doi.org/10.1117/1.JBO.24.8.080901>.
13. Goodfellow Y. Y, Bengio Y., Courville A.. Deep learning. MIT Press. 2016.
14. Draijer M., Hondebrink E., van Leeuwen T., Steenbergen W.. Review of laser speckle contrast techniques for visualizing tissue perfusion. *Lasers in medical science*, 2009, vol. 24, no. 4, pp. 639-651. <http://doi.org/10.1007/s10103-008-0626-3>.
15. Sarah Guido, Andreas Muller. Introduction to Machine Learning with Python: A Guide for data scientists. O'Reilly & Associates. 2017.
16. Geron A. Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn and TensorFlow. Tokyo, 2019.
17. Scikit-learn. Machine Learning in Python. Available at: <https://scikit-learn.org/stable/modules/tree.html#tree>
18. Kornaeva E., Kornaev A., Savin L., et al. Theoretical premises of a vibro-inertial method of viscosity measurement. *Vibroengineering Procedia*, 2016, vol. 8, pp. 440 – 445.
19. NVidia Jetson Nano Datasheet // nvidia.com Available at: [https:// developer.download.nvidia.com/assets/embedded/secure/jetson/Nano/docs/JetsonNano_DataSheet_DS09366001v1.0.pdf](https://developer.download.nvidia.com/assets/embedded/secure/jetson/Nano/docs/JetsonNano_DataSheet_DS09366001v1.0.pdf)? (accessed: 15.03.2021).
20. Süzen A. A., Duman B., Şen B.. Benchmark Analysis of Jetson TX2, Jetson Nano and Raspberry PI using Deep-CNN. *2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, 2020, pp.1-5.

Информация об авторах / Information about the Authors

Корнаева Елена Петровна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационных систем и цифровых технологий, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, Российская Федерация, e-mail: lenoks_box@mail.ru, ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-0123-4004>

Стебаков Иван Николаевич, аспирант кафедры мехатроники, механики и робототехники, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, Российская Федерация e-mail: chester50796@yandex.ru

Ставец Дмитрий Дмитриевич, стажер-исследователь научно-технологического центра биомедицинской фотоники, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, Российская Федерация, e-mail: stavgsev.dmitry@gmail.com

Дрёмин Виктор Владимирович, кандидат технических наук, научный сотрудник научно-технологического центра биомедицинской фотоники, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, Российская Федерация, e-mail: dremin_viktor@mail.ru

Корнаев Алексей Валерьевич, доктор технических наук, профессор кафедры мехатроники, механики и робототехники, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, Российская Федерация e-mail: rusakor@inbox.ru

Elena P. Kornaeva, Cand. of Sci. (Phisico-Mathematical), Associate Professor, Information Systems Department, Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russian Federation, e-mail: lenoks_box@mail.ru, ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-0123-4004>

Ivan N. Stebakov, Post-Graduate Student, Mechatronics, Mechanics and Robotics Department, Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russian Federation, e-mail: chester50796@yandex.ru

Dmitry D. Stavgsev, Research Trainee, Research and Development Center of Biomedical Photonics, Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russian Federation, e-mail: stavgsev.dmitry@gmail.com

Viktor V. Dremin, Cand. of Sci. (Engineering), Researcher, Research and Development Center of Biomedical Photonics, Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russian Federation, e-mail: stavgsev.dmitry@gmail.com

Alexey V. Kornaev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Mechatronics, Mechanics and Robotics Department, Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russian Federation e-mail: rusakor@inbox.ru

Особенности поддержки принятия управленческих решений в системе управления логистическими потоками транспортно-складского комплекса

А. В. Аверченков ¹, Е. Э. Аверченкова ¹ ✉, В. В. Ковалев ¹

¹ Брянский государственный технический университет
бул. 50 лет Октября 7, г. Брянск 241035, Российская Федерация

✉ e-mail: lena_ki@inbox.ru

Резюме

Цель исследования. Данная работа представляет собой описание процесса принятия управленческих решений применительно к системе управления логистическими потоками на основе принципов и понятий теории управления.

Методы. Формализация системы управления логистическими потоками транспортно-складского комплекса основана на подходах и методах теории управления. Предложенная модель системы управления предполагает формирование воздействующего влияния, конкретизацию выходных координат объекта управления после отработки управляющего воздействия, описание внешней среды. Представлена визуальная модель системы управления и ее формализация с позиций теоретико-множественного подхода. Описаны принципы управления по ошибке и возмущению, учет которых позволяет скорректировать управленческое воздействие на логистические потоки транспортно-складского комплекса для достижения целевых ориентиров организации. Принятие управленческого решения в области логистики транспортно-складского комплекса основано на процессном подходе.

Результаты. Предложенная визуальная, а также теоретико-множественная модель системы управления логистическими потоками транспортно-складского комплекса является основанием для дальнейшей формализации задачи управления, критериев оптимальности и соответствующих ограничений в аналогичных логистических системах. Заявленный в статье процесс принятия управленческого решения применительно к логистическим потокам рассматривается как основание для расширения возможностей применения автоматизированных систем поддержки принятия решений.

Заключение. Перспективы дальнейшего развития управленческих процессов на основе принципов автоматизации оцениваются как существенные. Теоретическим обоснованием таковых является формализация модели системы управления на основе подходов теории управления. Это позволяет определить направления дальнейшего научного задела по тиражированию оснований теории управления на такие организационные системы, как логистические, а также определить задачу управления к ним.

Ключевые слова: принятие решений; система управления логистическими потоками транспортно-складского комплекса; автоматизация логистической деятельности.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Аверченков А.В., Аверченкова Е.Э., Ковалев В.В. Особенности поддержки принятия управленческих решений в системе управления логистическими потоками транспортно-складского комплекса // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(2): 107-122. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-2-107-122>.

Поступила в редакцию 13.03.2021

Подписана в печать 20.04.2021

Опубликована 24.08.2021

Characteristic Features of Support for Making Managerial Decisions in the Management System of Logistics Flows of Transportation and Storage Complex

Andrew V. Averchenkov¹, Elena E. Averchenkova¹ ✉, Vladimir V. Kovalev¹

¹ Bryansk State Technical University
50 Let Oktyabrya ave. 7, Bryansk 241035, Russian Federation

✉ e-mail: lena_ki@inbox.ru

Abstract

Purpose of research is to describe the process of making managerial decisions in terms of the management system of logistics flows based on the management theory principles and concepts.

Methods. The formalization of the management system of logistics flows of transportation and storage complex is based on the management theory approaches and methods. The proposed management system model presupposes the formation of an influencing impact, the specification of the output coordinates of the object under control after working out control actions, and a description of the external environment. The visual model of the management system and its formalization in terms of the set-theoretic approach are presented. Management principles based on error and disturbance are described; the accounting of these principles makes it possible to adjust the managerial actions on the logistics flows of the transportation and storage complex to achieve the targeted benchmarks of a company. Making a managerial decision in logistics of transportation and storage complex is based on a process approach.

Results. The proposed visual as well as set-theoretical model of the management system for logistics flows of transportation and storage complex is the basis for further formalization of the management problem, optimality criteria and corresponding constraints in similar logistics systems. The process of managerial decision-making in relation to logistics flows given in the article is considered as the basis for expanding the possibilities of applying automated decision support systems.

Conclusion. The prospects for the further development of management processes based on the principles of automation are assessed as significant ones. The theoretical substantiation of these prospects is the formalization of the control system model based on the management theory approaches, which makes it possible to determine the areas of further work for expanding management theory use in such organizational systems as logistic ones as well as to specify the management task for them.

Keywords: decision-making; management system of logistics flows of transportation and storage complexes; automation of logistics activities.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Kovalev V. V., Averchenkov A. V., Averchenkova E. E. Characteristic Features of Support for Making Managerial Decisions in the Management System of Logistics Flows of Transportation and Storage Complex. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(2): 107-122 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-2-107-122>.

Received 13.03.2021

Accepted 20.04.2021

Published 24.08.2021

Введение

Вопросы поддержки принятия управленческих решений в системе управления логистическими потоками транспортно-складских комплексов рассматриваются уже давно [1-3]. Более того, можно отметить существенные сдвиги в обеспечении эффективности логистических процессов, существенно изменившие общее представление об их роли в менеджменте современных промышленных и коммерческих предприятий [4, 5].

Важным звеном логистической цепи для производственных предприятий, складских компаний и розничных сетей является склад распределения, эффективность функционирования которого существенно влияет на эффективность бизнеса в целом. Одним из инструментов повышения эффективности функционирования складского комплекса является внедрение современного программного обеспечения, которое обеспечит хранение, сбор и автоматизацию всех складских бизнес-процессов [6].

На сегодняшний день процесс принятия управленческих решений довольно актуален, так как такие решения применяются во всех сферах деятельности организации (управление финансами, персоналом, производственными процессами), а любая организация не может существовать без постоянного ежедневного принятия, реализации тех или иных решений на разных уровнях управления. Все управленческие решения направлены на достижение самого оптимального ре-

зультата деятельности организационной и производственной систем [7].

Информация является важной частью любого процесса на каждом уровне управления, потому что она значимо необходима для принятия любого решения. Для этого информация должна соответствовать требованиям: полноты, своевременности и достоверности.

При некачественной проработке и нечёткой формулировке задачи возникают риски принятия неверных управленческих решений. На различных уровнях руководства подразделений представляется возможным использование ресурсов системы поддержки принятия решений «LMS» в конкретной деятельности, как типовой образец. Автоматизация процесса поддержки принятия решений выступает направлением оптимизации управленческой деятельности и отличается от заведомо ложных интуитивных решений, что в свою очередь помогает руководству компании принять верное направление в изучении конкретной задачи [8].

Обзор основных направлений автоматизации логистической деятельности малого и среднего отечественного бизнеса

Конкуренция и растущие потребности на рынке логистических услуг в области грузоперевозок ставят перед организацией задачу внедрения современной системы управления транспортной логистикой, основанной на поддержке принятия решений. Использование уста-

ревших подходов в области логистики влечет существенные трудовые, временные и материальные затраты. На современном этапе наиболее перспективными средствами обеспечения поддержки принятия решений выступают системы, обеспечивающие: адресную систему хранения (в том числе за счет оптимизации размещения товара на складе), а также системное управление загрузкой/отгрузкой товара. Для автоматизации бизнес-процессов дистрибьюторские и складские компании внедряют LMS-системы («Logistic Management System»), которые представляют собой универсальный комплекс управленческих решений, который сочетает в себе два ключевых компонента системы управления логистикой компании – «Warehouse Management System» (далее WMS) и «Transportation Management System» (далее TMS).

WMS – это информационно-аналитическая, автоматизированная система управления бизнес-процессами складской работы компаний, предприятий или организации [9]. Главными плюсами этой системы являются защищенность процесса обработки данных, простота использования программного обеспечения, круглосуточная поддержка операторов колл-центра и распространенность на российском и европейском рынках.

Архитектура WMS включает в себя интерфейс, облачный сервер базы данных и RFID-технологии (Radio Frequency

Identification, т.е. радиочастотная идентификация) – зарегистрированный на индивидуального сотрудника пропуск с чипом, обеспечивающий предотвращение несанкционированного доступа на охраняемый объект организации.

К основным целям WMS относят такие направления, как увеличение оборачиваемости товара, непрерывное участие и поддержка в управлении складом, быстрое получение информации о местонахождении товара, мониторинг и анализ информации о поступающем товаре, мониторинг товара с ограниченным сроком годности, получение инструмента для эффективной обработки товара на складе, оптимизацию использования складских площадей.

Основные задачи, решаемые WMS, определяются спецификой конкретного предприятия и уровнем его логистических нужд. Можно выделить такие зоны покрытия WMS, как приём товара и материалов, складирование, автоматизация единовременной приёмки и отгрузки товара, гибкое управление заказами и группами заказов, пополнение запасов, комплектация заказов, погрузка, управление запасами, управление задачами персонала, планирование работы распределительного центра, управление контейнерами, управление хранением и производственными мощностями и управление человеческими ресурсами.

WMS легко адаптируются под изменяющиеся требования контрагента, в том числе под требования отдельных

сотрудников компаний. Гибкость и неограниченная возможность модификации логистических бизнес-процессов позволяет повысить качество принимаемых в организации управленческих решений в сфере управления логистикой.

TMS как компонент системы поддержки принятия логистических решений обеспечивает гибкость выбора лучших ресурсов логистики с учетом требований поставщиков и подрядчиков по минимальной цене [10-12]. TMS — это информационная, аналитическая и автоматизированная система сбора, обработки и хранения данных организации, выполняющая функции планирования, контроля и оценки показателей на каждой стадии транспортировки. TMS легко интегрируется со складским модулем, обеспечивает своевременность доставок и контроль логистических издержек, уменьшает затраты на персонал, в целом снижает транспортные расходы организации. Использование компонента TMS поможет организации улучшить следующие показатели, в том числе: снизить транспортные затраты на 30%; оптимизировать работу логиста (не более 10 минут на составление всех маршрутов); минимизировать требуемый автопарк (ориентировочно на 18% при улучшении сервиса доставки); сократить суммарный километраж на 22%, а затраты на арендуемый автопарк на 25%; практически исключить влияние человеческого фактора при составлении отчетной документации (план,

факт, анализ). TMS интегрируется с ERP- системой предприятия, а также с системами спутникового мониторинга GPS\ГЛОНАСС. Система уже внедрена и успешно работает в разных регионах РФ, в том числе в крупных международных холдингах, а также в небольших локальных компаниях.

Материалы и методы

Система управления логистическими потоками (на примере транспортно-складского комплекса)

ООО «БСК Логистикс» — крупная логистическая компания, локализованная на территории Брянской области, сочетающая в себе все виды услуг по транспортировке, обработке и хранению товаров. На рис.1 представлена система управления логистическими потоками транспортно-складского комплекса фирмы с позиций теории управления организационными системами. Данная модель управления была разработана с учетом предыдущих исследований авторов, представленных в работах [6-8].

Воздействующее влияние $G(t)$, продуцирующее изменение текущих характеристик системы управления логистическими потоками транспортно-складского комплекса, является первичным. Поступая на подсистему принятия решений, воздействующее влияние $G(t)$ трансформируется в управляющее воздействие $U(t)$ на объект управления с учетом коррекции на ошибку $\mathcal{E}(t)$.

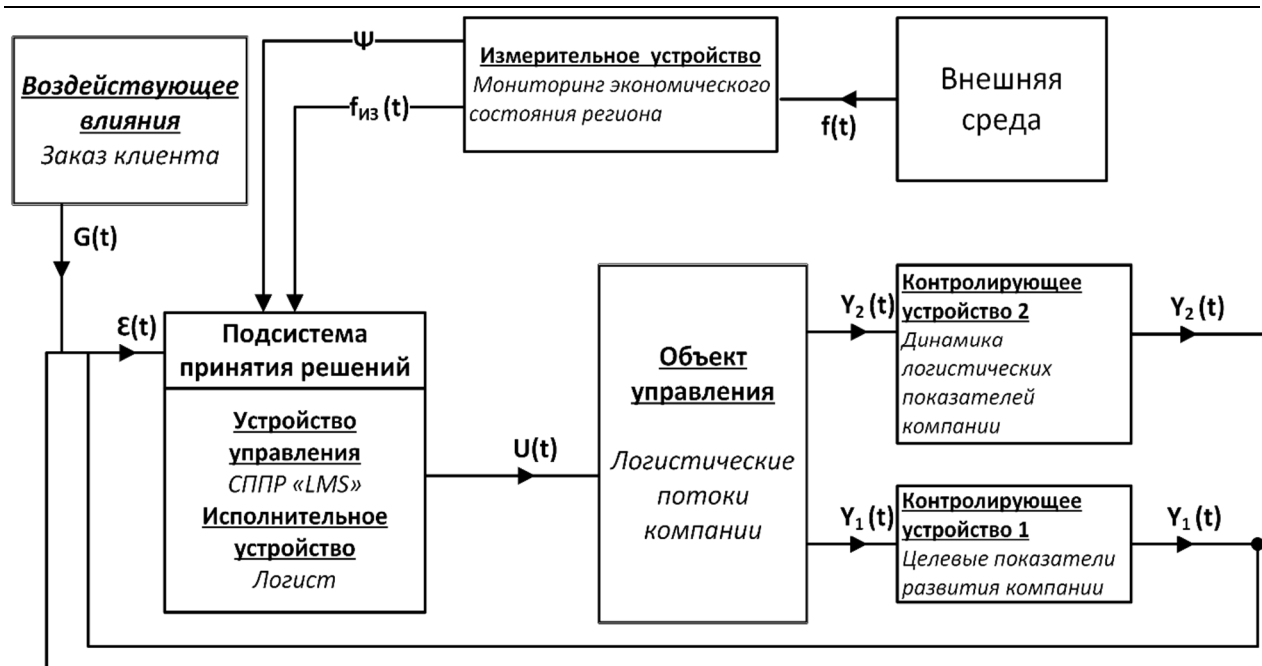


Рис. 1. Система управления логистическими потоками (на примере транспортно-складского комплекса)

Fig. 1. Logistics flow management system (transportation and storage complex case study)

Под объектом управления в предлагаемой системе управления понимается комплекс логистических потоков ООО «БСК Логистикс», на который оказывает управленческое влияние подсистема принятия решений. Состав последней определяется устройством управления (реализованным СППР «LMS»), а также исполнительным устройством (представленным логистом ООО «БСК Логистикс»). Выходные координаты $Y_1(t)$ и $Y_2(t)$ объекта управления (логистических потоков компании) поступают на два контролирующих устройства, которые позволяют оценить отдельно как динамику логистических показателей компании, так и целевых (ключевых) показателей развития компании. Значения выходных координат $Y_1(t)$ и $Y_2(t)$ позволяет определить ошибку (расхождение) $\mathcal{E}(t)$ как в логистических

показателях, так и в целевых показателях развития компании. Учет ошибки позволит скоординировать управляющее воздействие $U(t)$ на объект управления – логистические потоки компании.

Внешняя среда ООО «БСК Логистикс» представлена взаимосвязанными составляющими политического, экономического, социального и технологического характера, поступающими на подсистему принятия решений. Влияние внешней среды $f(t)$ оценивается как независимое и мало прогнозируемое. Информационный поток $f(t)$ от внешней среды, поступающий на подсистему принятия решений, проходит через измерительное устройство. Несовершенство последнего порождает уже другой, искаженный, информационный поток $f_{из}(t)$ и поток помех восприятия Ψ .

Таким образом, модель системы управления логистическими потоками (на примере транспортно-складского комплекса) может быть представлена с позиций теоретико-множественного подхода следующим образом:

$$CU = \{L, U, Y, G, C\}, \quad (1)$$

где L – множество компонентов системы управления логистическими потоками транспортно-складского комплекса $L = \{OU, UU, IsU, BC, \{KU_s | s=1,2\}, IU\}$, OU – объект управления (логистические потоки транспортно-складского комплекса); UU – управляющее устройство (СППР «LMS»); IsU – исполнительное устройство (логист компании); BC – внешняя среда, KU_w ($w=1,2$) – два контролирующих устройства; IU – измерительное устройство; $U(t)$ – управляющее воздействие; $Y(t)$ – выходные координаты; $G(t)$ – задающее

воздействие (заказы клиентов); C – обратная связь.

Результаты и их обсуждение

Поддержка принятия управленческих решений в товарообороте логистической фирмы

Автоматизация логистической деятельности в ООО «БСК Логистикс» осуществляется инструментарием СППР «LMS», что позволяет эффективно выстроить логистическую цепочку с учетом всех данных: от получения товара до полной его реализации на рынке. Данная последовательность была построена с учетом современных тенденций в логистическом менеджменте [13–18]. Рассмотреть наглядно процесс принятия управленческого решения в компании с применением ресурсов СППР «LMS» можно с помощью схемы (рис. 2).

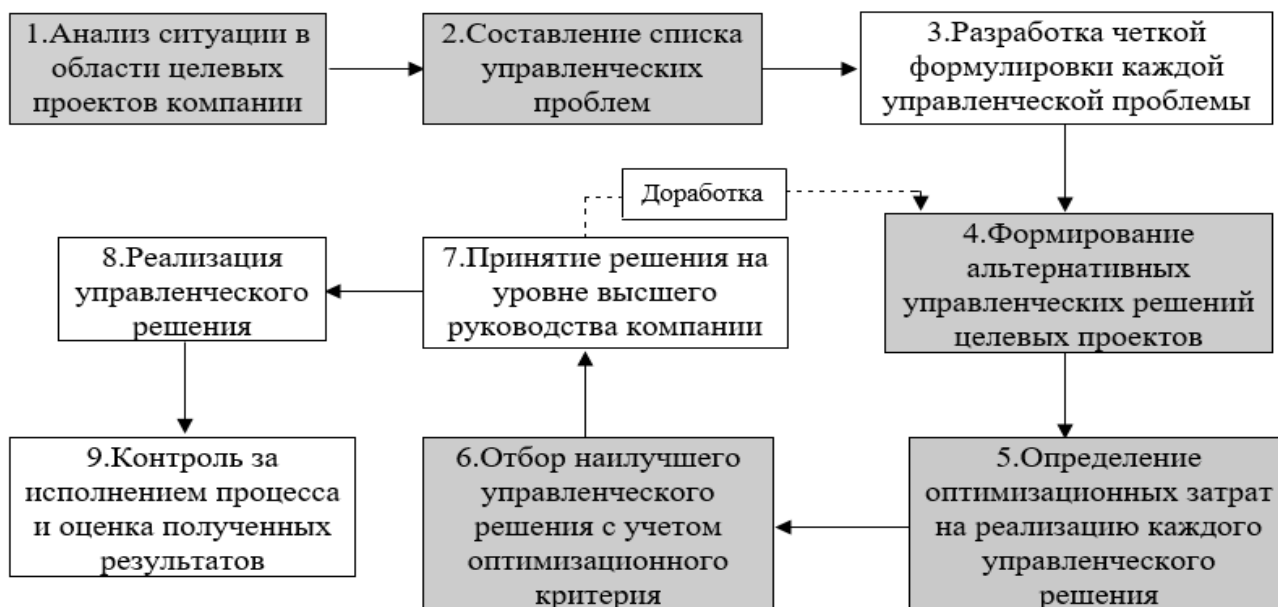


Рис. 2. Процесс принятия управленческого решения в компании ООО «БСК Логистикс» с применением ресурсов СППР «LMS»

Fig. 2. The process of managerial decision-making in the LLC BSK Logistics company applying LMS DSS resources

На приведенной схеме серым цветом выделены этапы, на которых компания может использовать ресурсы и возможности СППР «LMS» [4-7]. На первом этапе процесса принятия управленческого решения СППР «LMS» создает и анализирует комплексную информационную базу целевых проектов компании в области логистики складского хозяйства. Примером использования информационной поддержки принятия решений на данном этапе выступает аналитика основных проектов / продуктовых направлений компании. Аналогичные примеры находим и в родственных областях, где применяется обработка и формирование геопространственной информации [19]. В случае с ООО «БСК Логистикс» это изучение динамики, структуры логистического портфеля фирмы применительно к ее основным продуктовым направлениям, которые анализируются и в разрезе особенностей хранения. Информационная поддержка инструментарием СППР «LMS» обеспечивает аналитику по вместимости стеллажей конкретной товарной позицией с учетом размеров товарной продукции и наличия в ячейках другого товара.

На втором этапе процесса принятия управленческого решения применительно к товарообороту фирмы происходит составление списка управленческих проблем компании. При формировании возможных альтернатив были использованы наработки отечественных прак-

тиков логистики, представленные в работах [20-22]. В перечне управленческих логистических проблем ООО «БСК Логистикс» возможно выделение следующих направлений применения информационных ресурсов СППР «LMS»:

- учет прибывшей на склад и отгруженной со склада продукции;
- загруженность работы погрузчика и расстановщиков;
- габариты стеллажных конструкций;
- загруженность стеллажей продукцией.

Наиболее существенные управленческие проблемы, требующие скорейшего решения менеджерами ООО «БСК Логистикс» по логистике, анонсируются автоматизированной программой как требующие повышенного и приоритетного внимания. Например, прибывший к разгрузке автопоезд не может ждать, соответственно, СППР «LMS» «напоминает» о том, что на текущую дату запланирована его разгрузка.

Следующим этапом применения информационного ресурса СППР «LMS» на складе компании ООО «БСК Логистикс» является формирование альтернативных способов управленческого решения. Применительно к ООО «БСК Логистикс» возможности СППР «LMS» позволяют сформировать «очереди» на разгрузку прибывшего товара (с учетом критерия минимизации времени простоя автотранспорта), составить график рационального распределения имеюще-

гося автопарка погрузчиков, сформировать оптимальную раскладку заполнения стеллажей склада с учетом габаритов прибывшей продукции. Другим примером, обеспечивающим формирование альтернативных способов управленческого решения инструментарием СППР «LMS», является формирование нескольких вариантов расстановки товарной продукции (на основе анализа загруженности складского помещения, в том числе с учетом размеров полок, расстояния между стеллажами, габаритов товара, их количества и т.д.). Например, СППР «LMS» может предложить расставить товар в освободившиеся и пустые ячейки или задействовать наполовину заполненные ячейки стеллажей.

Далее СППР «LMS» с учетом всех собранных данных определяет затраты на оптимизацию процесса и реализацию каждого управленческого решения, начиная от разгрузки товара в сектор хранения, до полной расстановки товара в ячейки. К оптимизационным затратам можно отнести минимизацию занимаемого места, сокращение времени на расстановку товарной продукции в ячейки стеллажей с учетом их габаритов, количество человек, необходимых для быстрого выполнения этой задачи и т.д.

Конечным этапом процесса принятия управленческого решения СППР «LMS» является определение оптимизационного решения, например, предлагается разместить крупногабаритный товар ближе к комплектовочному цеху

и на нижний ярус стеллажей, таким образом комплектовщик за короткий промежуток времени и с минимальными затратами на время сможет укомплектовать этот крупногабаритный товар. Таким образом, оптимизационное решение, с учетом всех параметров, справится с задачей наилучшим образом и с минимальными затратами.

Анализ разработанной системы управления логистическими потоками с позиции теории управления

Определим, что разработанная система управления логистическими потоками (на примере транспортно-складского комплекса) может быть описана с позиций теории управления. Возможность тиражирования методологических оснований к различным управляющим системам было рассмотрено авторами в работе [23]. Результаты сравнительного анализа представлены в табл. 1.

Таким образом, соотнесение основных элементов информационной составляющей процесса управления логистическими потоками с основными понятиями теории управления показало, что на современном этапе развития знаний об управлении логистическими системами применение инструментария теории управления позволит по-новому увидеть протекаемые в них процессы, формализовать их и обеспечить эффективность функционирования региональной системы в целом.

Таблица 1. Соотнесение основных элементов информационной составляющей процесса управления логистическими потоками с основными понятиями теории управления**Table 1.** Correlation of the main elements of the information component of logistics flow management process with the basic concepts of management theory

Информационная составляющая в процессе управления / The information component in the management process		
В контексте теории управления / In the context of management theory	В системе управления логистическими потоками / In the logistics flow management system	Эффективность реализации в предложенной системе / Efficiency of implementation in the proposed system
Получение информации о задачах управления	Целевые установки логистического центра	Целевые ориентиры могут составлять до 5-7 показателей (например, выход на заявленный размер прибыли, повышение производительности логистической цепочки и т.д.), что обеспечит синергию совокупного результата деятельности логистической компании (в среднем до 1-3% от совокупного оборота логистической компании)
Получение информации о результатах управления	Модель контроля эффективности системы управления логистическими потоками (реализуется через механизм отрицательной обратной связи и контролирующие устройства)	Модель контроля обеспечивает эффективную обработку логистических данных компании, позволяющих повысить контроль над ее потоками до 10% (например, за счет своевременного учета отклонений от целевых значений и последующей корректировке управленческого воздействия)
Анализ полученной информации	Модель оценки состояния внешней среды (реализуется после воздействия на объект управления через измерительные устройства)	Измерительное устройство «Мониторинг экономического состояния региона» позволит провести своевременный учет воздействующего влияния внешней среды на объект управления – логистические потоки компании (до 50 различных показателей). Это позволит дополнительно повысить эффективность системы управления до 5-7%
Выработка управленческого решения	Модель управляющего устройства – СППР «LMS», лицо, принимающее решение – логист	Применение системы поддержки принятия решений (построенной на предложенной модели) обеспечит экономию времени исполнителя до 10-15%
Исполнение решения — осуществление управляющих воздействий	Логист, принимающий окончательное управленческое решение с помощью СППР «LMS»	Поддержка принятия решений на основе разработанной системы управления обеспечит сокращение числа возможных ошибок до 2-3%, а объемы информации, на основании которых принимается решение логистом, увеличатся в 2-4 раза

Выводы

Система управления логистическими потоками транспортно-складского комплекса представлена в статье с позиций теории управления организационными системами, что позволяет оценить основные механизмы управления и соответствующие информационные потоки. При таком подходе логистические потоки специализированной организации четко определяются как объект управления, воздействующее влияние конкретизируется как независимое влияние со стороны заказчика, а управляющее воздействие продуцируется с по-

мощью автоматизированного ресурса – СППР «LMS». Значение выходных координат позволяет реализовать принцип управления по ошибке. Кроме того, в предложенной системе заложен такой принцип управления, как управление по возмущению, что позволяет учитывать при принятии логистических решений влияние внешней среды. Предложенная в статье модель системы управления логистическими потоками транспортно-складского комплекса может быть использована в дальнейшем для формализации задачи управления, критериев оптимальности и соответствующих ограничений.

Список литературы

1. Пустохин Д.А. Особенности управления материальными потоками в производственной логистике // Вестник университета. 2015. № 11. С.22-29.
2. Корпоративная логистика в вопросах и ответах / В.И. Сергеев, Е.В. Будрина [и др.]; под ред. В.И.Сергеева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: НИЦ 168 ИНФРА-М, 2014. 634 с. URL: <http://proxylibrary.hse.ru:2078/bookread.php?book=407668> (дата обращения: 29.01.2021).
3. Максимихина М.О. Тянущая концепция в логистике закупок торговых организаций // Научное мнение / Санкт-Петербургский университетский консорциум. СПб., 2014. № 7. С. 289-295.
4. Германчук А.Н. Информационные технологии - основа реинжиниринга логистических бизнес-процессов // Современные проблемы экономики и менеджмента : матер. Междунар. науч. - практ. конф., 25 окт., 2018 г., г. Воронеж. Воронеж : ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», 2018. С. 67-71.
5. Германчук А.Н. Эффективность логистической деятельности предприятий в конкурентной среде // Стратегия предприятия в контексте повышения его конкурентоспособности. Донецк: ДонНУЭТ, 2016. №6. С. 200-205. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28857611>.

6. Аверченкова Е.Э., Аверченков А.В. Автоматизированное принятие управленческих решений на основе моделей и алгоритмов информационной советующей системы // Информационные системы и технологии. 2016. №3 (95) май-июнь. С. 31-39.
7. Аверченкова Е. Э., Леонов Е. А., Аверченков А. В. Применение системы поддержки принятия решений «ДАТА» в процессе управления на региональном уровне // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2019. № 3. С. 7–16. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2019-3-7-16>.
8. Аверченкова Е. Э., Аверченков А. В., Гончаров Д. И. О необходимости принятия управленческих решений на основе моделирования социально-экономического развития региона в информационной советующей системе // Вестник Брян. гос. техн. ун-та. 2018. № 4 (65). С. 76–81.
9. IT-системы логистики и грузоперевозок. URL: <https://www.reartek.com/it-sistemy-logistiki/> (дата обращения: 29.01.2021).
10. TMS-система по автоматизации построения маршрута. URL: <https://getrelog.com/> (дата обращения: 29.01.2021).
11. Бондарева И.О. Комплексный анализ рисков грузового порта на основе логико-вероятностного и имитационного моделирования // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020;24(4):91-106. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-91-106>.
12. Нечеткая система оценки и управления привлекательностью технических или экономических объектов (на примере выбора фирмы-поставщика ресурсов) / А.С. Сизов, В.П. Добрица, О.Г. Добросердов, О.И. Атакищев, А.Е. Зёрнушкин, Ю.А. Халин, Р.С. Сильченко // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(1): 95-106. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-1-95-106>.
13. Дедов С.В. Анализ атрибутов управления ресурсным обеспечением инновационной деятельности // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017; 21(5): 131-140. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2017-21-5-131-140>.
14. Бережная Л.Ю. Организационные аспекты формирования логистического центра по управлению потоками товаров народного потребления г. Оренбурга. Оренбург: Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2017. 163 с.
15. Бережная Л.Ю. Формирование структуры логистического центра как основа его функционирования // Приволжский научный вестник. 2016. №8 (60).
16. Виды складов // Осинская рожа – Электрон. дан. М., 2016. URL: <http://orterminal.ru/press/vidy-skladov.php> (дата обращения: 02.12.2020).
17. Калитина И. А. Язык склада. М.: изд-во «ЛитРес: Самиздат», 2019. 66 с.

18. Мельников И. В. Склад, транспорт и логистика. М.: издательство «Мельников И.В.», 2020. 30 с.
19. Коломиец Е.А., Николаев В.Н. Автоматизированная обработка и формирование геопространственной информации в социальных системах // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018; 22(5): 82-95. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-5-82-95>.
20. Смирнова А. В., Чернонослова Н. В. Логистика складирования. М.: Изд-во «Дашков и К», 2019. 51 с.
21. Бабенко И.В. Нормирование в системе управления запасами материальных ресурсов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016; 20(4): 111-118.
22. Епифанова В.И. Актуальность информационных систем и перспективы их развития // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016; 20(4): 118-124.
23. Аверченкова Е.Э., Горбунов А.Н. Применение теории управления для описания системы управления региональной социально-экономической системой // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(4): 105-115. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-105-115>.

References

1. Pustokhin D.A. Osobennosti upravleniya material'nymi potokami v proizvodstvennoi logistike [Features of material flow management in production logistics]. *Vestnik universiteta = Bulletin of the University*, 2015, no. 11, pp. 22-29 (In Russ.).
2. Sergeev V.I., Budrina E.V. and others. Korporativnaya logistika v voprosakh i otvetakh [Corporate logistics in questions and answers]. Moscow, 2014. 634 p. Available at: <http://proxylibrary.hse.ru:2078/bookread.php?book=407668> (accessed: 29.01.2021) (In Russ.).
3. Maksimikhina, M.O. Tyanushchaya kontseptsiya v logistike zakupok torgovykh organizatsii [Pulling concept in procurement logistics of trade organizations]. *Nauchnoe mnenie / Sankt-Peterburgskii universitetskii konsortsium = Scientific Opinion. Saint Petersburg University Consortium*. Saint Petersburg, 2014, no. 7, pp. 289-295 (In Russ.).
4. Germanchuk A.N. [Information technologies - the basis for reengineering of logistics business processes]. *Sovremennye problemy ekonomiki i menedzhmenta: Mater. Mezhdunar. nauch. - prakt. konf.* [Modern problems of economics and management. Mater. Int. scientific. - practical. Conf.]. Voronezh, Voronezh State University Publ., 2018, pp. 67-71 (In Russ.).
5. Germanchuk A.N. [Efficiency of logistics activities of enterprises in a competitive environment]. *Strategiya predpriyatiya v kontekste povysheniya ego konkurentosposobnosti*

[Enterprise strategy in the context of increasing its competitiveness]. Donetsk, 2016, no. 6, pp. 200-205. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28857611> (In Russ.).

6. Averchenkova E.E., Averchenkov A.V. Avtomatizirovannoe prinyatie upravlencheskikh reshenii na osnove modelei i algoritmov informatsionnoi sovetuyushchei sistemy [Automated decision-making based on models and algorithms of the information advisory system]. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii = Information Systems and Technologies*, 2016, no. 3 (95) May-June pp. 31-39 (In Russ.).

7. Averchenkova E. E., Leonov E. A., Averchenkov A. V. Primenenie sistemy podderzhki prinyatiya reshenii «DATA» v protsesse upravleniya na regional'nom urovne [Application of the decision support system "DATE" in the process of management at the regional level]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Engineering and Computer Science*, 2019, no. 3, pp. 7-16 (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2019-3-7-16>

8. Averchenkova E. E., Averchenkov A. V., Goncharov D. I. O neobkhodimosti prinyatiya upravlencheskikh reshenii na osnove modelirovaniya sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya regiona v informatsionnoi sovetuyushchei sisteme [On the need to make managerial decisions based on modeling the socio-economic development of the region in the information advising system]. *Vestnik Bryankiy gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Bryank State Technical University*, 2018, no. 4 (65), pp. 76–81 (In Russ.).

9. IT-sistemy logistiki i gruzoperevozok [It-systems of logistics and cargo transportation]. (In Russ.). Available at: <https://www.reartek.com/it-sistemy-logistan.20/> (accessed: 29.01.2021).

10. TMS-sistema po avtomatizatsii postroeniya marshruta [TMS-system for automating route building]. (In Russ.). Available at: <https://getrelog.com/nioia>. (accessed: 29.01.2021).

11. Bondareva I.O. Kompleksnyi analiz riskov gruzovogo porta na osnove logiko-veroyatnostnogo i imitatsionnogo modelirovaniya [Comprehensive Risk Analysis of a Cargo Port Based on Logic-Probabilistic and Simulation Modeling]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; no. 24 (4): 91-106 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-91-106>

12. Sizov A.S., Dobritsa V.P., Dobroserdov O.G., Atakischev O. I., Zernushkin A.E., Khalin Yu.A., Silchenko R.S. Nechetkaya sistema otsenki i upravleniya privlekatel'nost'yu tekhnicheskikh ili ekonomicheskikh ob"ektov (na primere vybora firmy-postavshchika resursov) [Fuzzy System for Assessment and Mannagement of Attractiveness of Technical or Economic Objects (Case Study of the Selection of a Resource Supplier)]. *Izvestiya Yugo-*

Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University, 2019; 23(1): 95-106 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-1-95-106>.

13. Dedov S.V. Analiz atributov upravleniya resursnym obespecheniem innovatsion-noi deyatel'nosti [Analysis of Attributes of Management of Resource Provision of Innovative Activity]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2017; 21(5): 131-140 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2017-21-5-131-140>.

14. Berezhnaya L.Yu. *Organizatsionnye aspekty formirovaniya logisticheskogo tsentra po upravleniyu potokami tovarov narodnogo potrebleniya g. Orenburga* [Organizational aspects of the formation of a logistic center for managing the flow of goods and binodnodes in Orenburg]. Orenburg, Orenburg State University Publ., 2017. 163 p. (In Russ.).

15. Berezhnaya L.Yu. Formirovanie struktury logisticheskogo tsentra kak osnova ego funktsionirovaniya [Formation of the structure of a logistics center as the basis of its functioning]. *Privolzhskii nauchnyi vestnik = Privolzhsky Scientificits Functioning*, 2016, no. 8 (60) (In Russ.).

16. *Vidy skladov* [Types of warehouses]. Moscow, 2016. (In Russ.). Available at: <http://orterminal.ru/press/vidy-skladov.php> (accessed: 02.12.2020)

17. Kalitina I. A. *Yazyk sklada* [Language of the warehouse]. Moscow, LitRes: Samizdat Publ., 2019. 66 p. (In Russ.).

18. Melnikov I. V. *Sklad, transport i logistika* [Warehouse, transport and logistics]. Moscow, 2020. 30 p. (In Russ.).

19. Kolomiets E.A., Nikolaev V.N. Avtomatizirovannaya obrabotka i formirovanie geoprostranstvennoi informatsii v sotsial'nykh sistemakh [Automated processing and the formation of geospatial information in social systems]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2018; 22 (5): 82-95 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-5-82-95>

20. Smirnova A. V., Chernonosova N. V. *Logistika skladirovaniya* [Warehousing logistics]. Moscow, 2019. 51 p. (In Russ.).

21. Babenko I.V. Normirovanie v sisteme upravleniya zapasami material'nykh resursov [Norm Setting in the Inventory Management of Material Resources]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2016, no. 4, pp. 111-118 (In Russ.).

22. Epifanova V.I. Aktual'nost' informatsionnykh sistem i perspektivy ikh razvitiya [Information Systems and Their Development Prospectives]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2016, no.4, pp. 118-124 (In Russ.).

23. Averchenkova E. E., Gorbunov A. N. *Primenenie teorii upravleniya dlya opisaniya sistemy upravleniya regional'noi sotsial'no-ekonomicheskoi sistemo* [Application of Control Theory to Describe the Management of the Regional Socio-Economic System]. *Izvestiya Yu-go-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019; 23(4): 105-115 (In Russ.). [https:// doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-105-115](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-105-115).

Информация об авторах / Information about the Authors

Аверченков Андрей Владимирович,
доктор технических наук, доцент, Брянский
государственный технический университет,
г. Брянск, Российская Федерация,
e-mail: mahar@mail.ru,
ORCID: <http://0000-0003-0196-1332>

Andrew V. Averchenkov, Professor, Computer
Technological and System Department,
Bryansk State Technical University,
Bryansk, Russian Federation,
e-mail: lena_ki@inbox.ru,
ORCID: <http://0000-0003-0196-1332>

Аверченкова Елена Эдуардовна, кандидат
технических наук, доцент, Брянский
государственный технический университет,
г. Брянск, Российская Федерация,
e-mail: lena_ki@inbox.ru,
ORCID: <http://0000-0003-2098-6156>

Elena E. Averchenkova, Associate Professor,
Digital Economics Department,
Bryansk State Technical University,
Bryansk, Russian Federation,
e-mail: lena_ki@inbox.ru,
ORCID: <http://0000-0003-2098-6156>

Ковалев Владимир Владимирович,
магистрант, Брянский государственный
технический университет,
г. Брянск, Российская Федерация,
e-mail: jonbarrimor@gmail.com

Vladimir V. Kovalev, Post-Graduate Student,
Bryansk State Technical University,
Bryansk, Russian Federation,
e-mail: jonbarrimor@gmail.com

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-2-123-139>

Разработка нейронной модели полупроводникового датчика газа

О.Г. Бондарь¹, Е.О. Брежнева¹ ✉, К.Г. Андреев¹, Н.В. Поляков¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: bregnevaeo@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Разработка нейронной модели полупроводникового датчика газа с целью генерации данных для обучения устройства обработки информации газоанализаторов на основе искусственных нейронных сетей (ИНС). Поиск и оптимизация состава и объема очищающих данных. Нейронная модель датчика должна учитывать влияние на сигнал тех факторов, колебания которых вносят максимальный вклад в погрешности измерений. Апробация модели на полупроводниковых датчиках угарного газа и водорода.

Методы. Методы компьютерного моделирования, численные методы, теория нейронных сетей. Для сопоставления результатов моделирования и откликов реальных датчиков определялись относительная погрешность и среднеквадратическое отклонение.

Результаты. Проведены исследования различных структур нейронной модели полупроводникового датчика, осуществлен выбор структуры многослойной нейронной сети прямого распространения для двух полупроводниковых датчиков угарного газа и водорода, произведена оценка погрешностей моделирования, даны рекомендации по выбору оптимальной структуры и объему обучающих данных.

Заключение. Получены нейронные модели полупроводниковых датчиков угарного газа и водорода, сделаны выводы о возможности применения данной структуры ИНС при решении типовых задач. На основании анализа полученных погрешностей показана эффективность применения нейронных моделей датчиков для генерации обучающих данных. Максимальная относительная погрешность моделирования полупроводникового датчика монооксида углерода TGS2442 не превысила 5% по основной характеристике и 2% по дополнительным. Максимальная относительная погрешность моделирования полупроводникового датчика водорода TGS2442 не превысила 3% по основной характеристике и 1% по дополнительным.

Ключевые слова: полупроводниковые датчики газа; угарный газ; водород; температура; влажность; перекрестная чувствительность; искусственные нейронные сети; относительная погрешность; моделирование; среднеквадратическое отклонение, концентрация газа.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Разработка нейронной модели полупроводникового датчика газа / О.Г. Бондарь, Е.О. Брежнева, К.Г. Андреев, Н.В. Поляков // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(2): 123-139. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-2-123-139>.

Поступила в редакцию 19.04.2021

Подписана в печать 21.06.2021

Опубликована 24.08.2021

© Бондарь О.Г., Брежнева Е.О., Андреев К.Г., Поляков Н.В., 2021

Development of a Neural Model of a Semiconductor Gas Sensor

Oleg G. Bondar ¹, Ekaterina O. Brezhneva ¹ ✉, Kirill G. Andreev ¹,
Nikolay V. Polyakov ¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: bregnevaeo@mail.ru

Abstract

Purpose of research: Development of a neural model of a semiconductor gas sensor in order to generate data for training an information-processing device of gas analyzers based on artificial neural networks (ANN). Search and optimization of cleaning data composition and volume. The neural model of the sensor should take into account the influence of those factors on the signal, the fluctuations of which make the maximum contribution to the measurement errors. Testing of the model based on semiconductor carbon monoxide and hydrogen sensors.

Methods. Methods of computer modeling, numerical methods, theory of neural networks. To compare the simulation results and the responses of real sensors, the relative error and standard deviation were determined.

Results. Studies of various structures of the neural model of a semiconductor sensor have been carried out, the structure of a multilayer neural network of direct propagation for two semiconductor carbon monoxide and hydrogen sensors has been selected, modeling errors have been estimated, recommendations have been given for choosing the optimal structure and the amount of training data.

Conclusion. Neural models of semiconductor carbon monoxide and hydrogen sensors have been obtained, conclusions have been drawn about the possibility of using this ANN structure in solving typical problems. Based on the analysis of the errors obtained, the effectiveness of using neural models of sensors to generate training data has been shown. The maximum relative error of modeling the TGS2442 semiconductor carbon monoxide sensor did not exceed 5% for the main characteristic and 2% for additional ones. The maximum relative error of modeling of the TGS2442 semiconductor hydrogen sensor did not exceed 3% for the main characteristic and 1% for additional ones.

Keywords: semiconductor gas sensors; carbon monoxide; hydrogen; temperature; humidity; cross-sensitivity; artificial neural networks; relative error.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Bondar O. G., Brezhneva E. O., Andreev K. G., Polyakov N. V. Development of a Neural Model of a Semiconductor Gas Sensor. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(2): 123-139 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-2-123-139>.

Received 19.04.2021

Accepted 21.06.2021

Published 24.08.2021

Введение

Обучение ИНС требует наличия большого числа экспериментальных данных, представляющих собой совокупность значений входных параметров (концен-

трация газов, температура, влажность) и соответствующие им сигналы датчиков [1-7]. Специфика применения ИНС для обработки информации в газоаналитических системах накладывает дополнительные ограничения и требования к

процессу генерации данных [8-10]. Получение такого числа данных только экспериментальным путем нецелесообразно с точки зрения финансовых затрат и трудоемкости.

Существует альтернативный метод – применение математических моделей датчиков [11-12]. Достоинствами метода являются возможность экстраполяции данных и унификация моделей в рамках одного типа датчиков. К его недостаткам следует отнести сложность автоматизации процесса параметризации многофакторных моделей, а также рост погрешности воспроизведения влияния температуры и влажности на границах диапазонов. Снизить погрешности можно увеличив сложность моделей, что повлечет за собой усложнение процесса их параметризации.

В данной работе предлагается исследовать альтернативный метода генерации обучающих данных с помощью нейронных моделей самих датчиков. Для решения поставленной задачи необходимо осуществить выбор структуры нейронной сети и объем обучающих данных, необходимый для получения требуемого уровня погрешности воспроизведения характеристик датчиков не выше 5% (максимальная относительная погрешность) по каждому из факторов. Разработка и апробация нейронных моделей будет проводиться на полупроводниковых датчиках, обладающих рядом преимуществ по сравнению с другими типами датчиков [13].

Материалы и методы

Исследование возможности применения ИНС для решения задач аппроксимации исходных данных, в том числе и в области анализа состава воздушных сред, показало, что наибольшей эффективностью обладают многослойные нейронные сети прямого распространения [8]. В связи с чем, в данной работе осуществляется исследование различных структур фиксированной архитектуры ИНС. На рис. 1 представлена структурная схема многослойной нейронной сети прямого распространения с логистической функцией активации нейронов во входном и промежуточном слоях и линейной в выходном слое. Согласно проведенным ранее исследованиям, наилучший результат показал алгоритм обучения LM Левенберга – Марквардта (использует матрицу Якоби для оценки матрицы Гессе) [14].

На рис. 2 представлен алгоритм обучения нейронной модели датчика газа. На первом этапе проводилась оцифровка исходных характеристик датчиков с помощью полинома в программе *MatLab* с использованием встроенной функции *lsqcurvefit*, реализующей нелинейный метод наименьших квадратов. Исследования проводились для полупроводникового датчика водородного рода TGS821 фирмы *Figaro*. Результаты аппроксимации характеристик датчиков представлены в табл. 1.

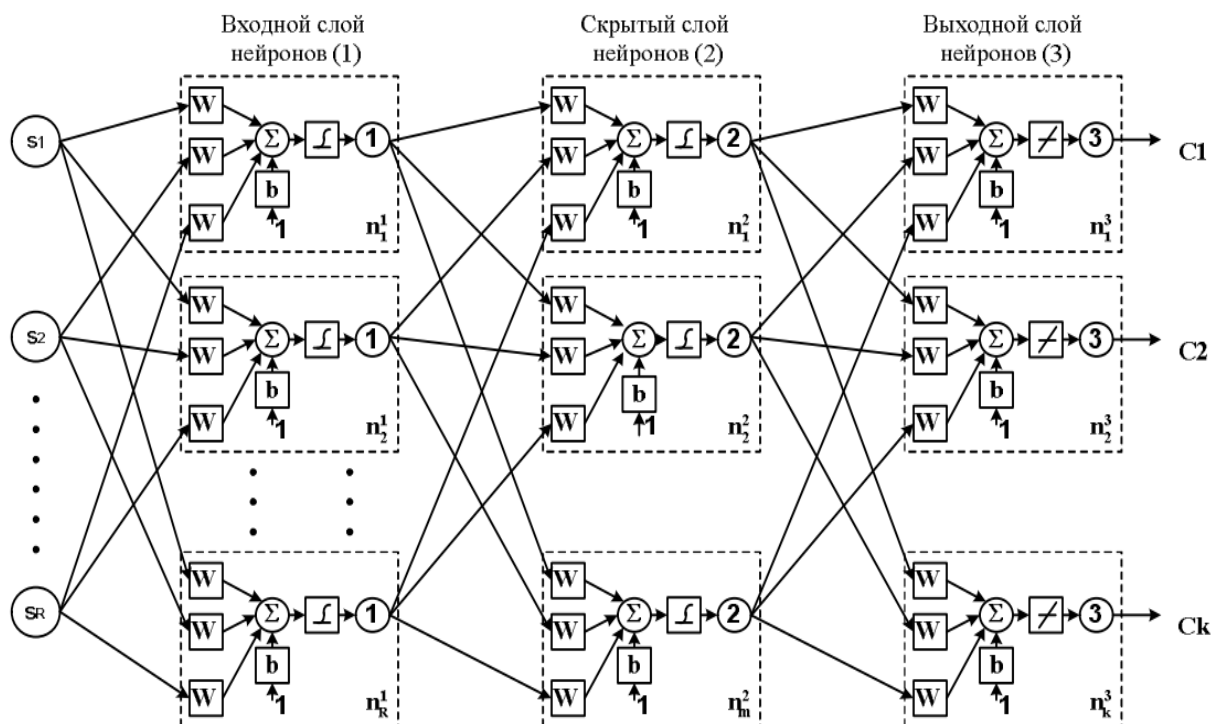


Рис. 1. Структурная схема нейронной сети прямого распространения

Fig. 1. Block diagram of a forward propagation neural network



Рис. 2. Алгоритм создания нейронной модели датчика

Fig. 2. Algorithm for creating a neural model of the sensor

Таблица 1. Погрешности аппроксимации характеристик TGS821**Table 1.** Approximation errors of TGS821 characteristic

№	Характеристика / Characteristic	СКО, %	Количество точек / Number of points
1	$Y(C_{H_2}), C_{CO}=0, T=20^{\circ}C, RH=65\%$	0,18	600
2	$Y(C_{CO}), C_{H_2}=0, T=20^{\circ}C, RH=65\%$	0,34	600
3	$Y(T), C_{H_2}=100, C_{CO}=0, RH=35\%$	0,06	500
4	$Y(T), C_{H_2}=100, C_{CO}=0, RH=65\%$	0,05	500
5	$Y(T), C_{H_2}=100, C_{CO}=0, RH=95\%$	0,05	500
6	$Y(RH), C_{H_2}=100, C_{CO}=0, T=20^{\circ}C$	0,001	500
-	Всего		3200

Для оценки объема обучающего множества обратимся к формуле *Baum* и *Haussler* [15]:

$$n \geq w/\varepsilon,$$

где w – количество весов сети; ε – величина ошибки.

Применение данной формулы требует информации о начальной структуре ИНС. Исследования проводились с исходной структурой сети 4-3-1. Количество нейронов во входном и выходном слоях определяется задачей проектирования сети (имитация многопараметрической функции): четыре входных параметра (концентрации основного и перекрестного газов, температура, влажность), один выходной параметр (сигнал датчика). Начальное число нейронов в скрытом слое выбрано равным полусумме нейронов во входном и выходном слоях [16-19]. Данная структура сети содержит 32 коэффициента и для обеспечения погрешности воспроизведения не свыше 1% (взят с запасом)

требует выборку объемом не менее 3200 точек. На основании анализа погрешностей, выпускаемых промышленностью газоанализаторов [20], зададимся максимальным значением величины погрешности воспроизведения характеристик равным 5%.

Воспроизведение характеристик в виде совокупности точек осуществляется блоком генерации выборки (см. рис. 1). Блок генерирует матрицу входных параметров размера $P \times N$ и матрицу выходного параметра размера $1 \times N$, где P – количество влияющих на сигнал датчика параметров; N – необходимое количество точек в выборке. Осуществляем предварительное нормирование данных в диапазоне 0-1. Значения факторов генерируются по равномерному закону распределения.

В процессе исследования варьировалось число нейронов в скрытом слое, осуществлялся контроль «эффекта переобучения», обучение каждой струк-

туры проводилось 3 раза, сохранялась сеть, показавшая наилучший результат. Количество точек по каждой характеристике, используемых при обучении нейронной сети, указано в табл. 1 в последнем столбце.

Результаты и их обсуждение

В табл. 2 представлены результаты исследования, направленного на поиск оптимальной структуры ИНС.

Таблица 2. Исследование погрешностей ИНС разных структур

Table 2. Study of the errors of the ANN of different structures

Структура ИНС	Объем обучающей выборки / The scope of the training choice	Эпох обучения пройдено / The epochs of education have been passed	Максимальная относительная погрешность, % / Maximum relative sinfulness, % /	Номер характеристики с максимальной погрешностью / The number of the characteristic with the maximum error
4-3-1	650	1867	20.4	2
	1500	1639	20.3	2
	3200	2000	26.4	2
4-4-1	650	1132	18.7	2
	1500	1669	16.6	2
	3200	1563	10.5	2
4-6-1	650	2000	6.5	2
	1500	2000	6.3	2
	3200	2000	4.5	2
4-10-1	650	174	>50	2
	1500	515	23.2	2
	3200	2000	4.5	2

По каждому набору обучающих данных проводилось три обучения, в табл. 2 представлены результаты с наименьшим значением относительной погрешности. На основании анализа результатов исследования была выбрана структура ИНС с шестью нейронами в

скрытом слое. Дальнейшее усложнение структуры не приводит к значительному снижению погрешности. В табл. 3 представлены результаты детального исследования погрешностей по каждой характеристике.

Таблица 3. Результат тестирования ИНС**Table 3.** ANN test result

Эпох обучения / Eras of learning	Номер характеристики / Feature number	Среднеквадратическая погрешность, % / Standard error, %	Максимальная относительная погрешность, % / Maximum relative error, %
2000	1	0.12	4.49
	2	0.07	2.03
	3	0.14	0.23
	4	0.05	0.10
	5	0.07	0.32
	6	0.1	0.30

Анализ результатов показал, что максимальные погрешности воспроизведения характерны для зависимостей сигнала датчика от концентрации газов. Величина погрешностей воспроизведения влияния факторов (температуры и влажности) позволяет сделать вывод о возможном снижении объема обучающих данных по этим характеристикам.

В табл. 4 представлены результаты эксперимента по поиску оптимального объема обучающих данных. С целью снижения погрешности воспроизведения основной характеристики, был увеличено количество точек в диапазоне 1000-3000 ppm.

Таблица 4. Измененный состав обучающей и контрольной выборок и погрешности тестирования модели датчика TGS821**Table 4.** Modified composition of the training and control samples and testing errors of the TGS821 sensor model

Характеристика / Characteristic	Диапазон / Range	Кол-во точек / Number of points	Макс. относительная погрешность, % / Max. relative sinfulness, %	СКО, %
1- Y(H ₂)	30..3000ppm	1000	2.98	0.79
	1000..3000ppm	250		
2- Y(CO)	30..3000ppm	500	2.74	0.06
3- Y(RH)	35..90%	100	0.67	0.36
4- Y(T) RH=35%	-10..40°C	100	0.06	0.02
5- Y(T) RH=65%	-10..40°C	100	0.72	0.13
6- Y(T) RH=95%	-10..40°C	100	0.74	0.15
Всего/Макс.		2150	2,98	0.79

Анализ полученных результатов позволил сделать выводы о возможности снижения количества точек в обучающей выборке по характеристикам 2-6, а также разбить на поддиапазоны основную характеристику 1, увеличив число точек в диапазоне минимальных и максимальных

концентраций. Итоговый состав выборки представлен в табл. 5. Объем тестирующей выборки составил 10 000 точек, что подтвердило отсутствие «эффекта переобучения» и интерполяционные свойства ИНС.

Таблица 5. Измененный состав обучающей и контрольной выборок и погрешности тестирования модели датчика TGS821

Table 5. Modified composition of the training and control samples and testing errors of the TGS821 sensor model

Характеристика / Characteristic	Диапазон / Range	Кол-во точек / Number of points	Макс. относительная погрешность, % / Max. relative sinfulness, %	СКО, %
1- Y(H ₂)	30..100ppm	65	3.84	0.2
	100..1000ppm	135	2.85	
	1000..3000ppm	400	0.93	
2- Y(CO)	30..3000ppm	250	3.2	0.2
3- Y(RH)	35..90%	50	2.5	1.23
4- Y(T) RH=35%	-10..40°C	50	1.84	0.33
5- Y(T) RH=65%	-10..40°C	50	3.63	0.91
6- Y(T) RH=95%	-10..40°C	50	1.68	0.52
Всего/Макс.		1050	3.84	1.23

При дальнейшем уменьшении объема обучающей выборки погрешности растут как по основной характеристике, так и по дополнительным. По результатам тестов, максимальная относительная погрешность ИНС не превышает 4%, а среднеквадратичное отклонение по каждой из характеристик не превышает 1.3%. Объем обучающей выборки составил 1050 точек.

График обучения ИНС представлен на рис. 3.

Результаты тестирования ИНС по каждой характеристике датчика представлены на рис. 3 – 6. На графиках $Y_{\text{СГЕН}}(X)$ – сгенерированная по графикам из технической документации зависимость сигнала датчика от параметра X . $Y_{\text{ПОЛУЧ}}(X)$ – полученная с помощью ИНС зависимость сигнала датчика от параметра X . Параметры CO , H_2 , RH и T – это концентрация угарного газа, концентрация водорода, относительная влажность и температура соответственно.

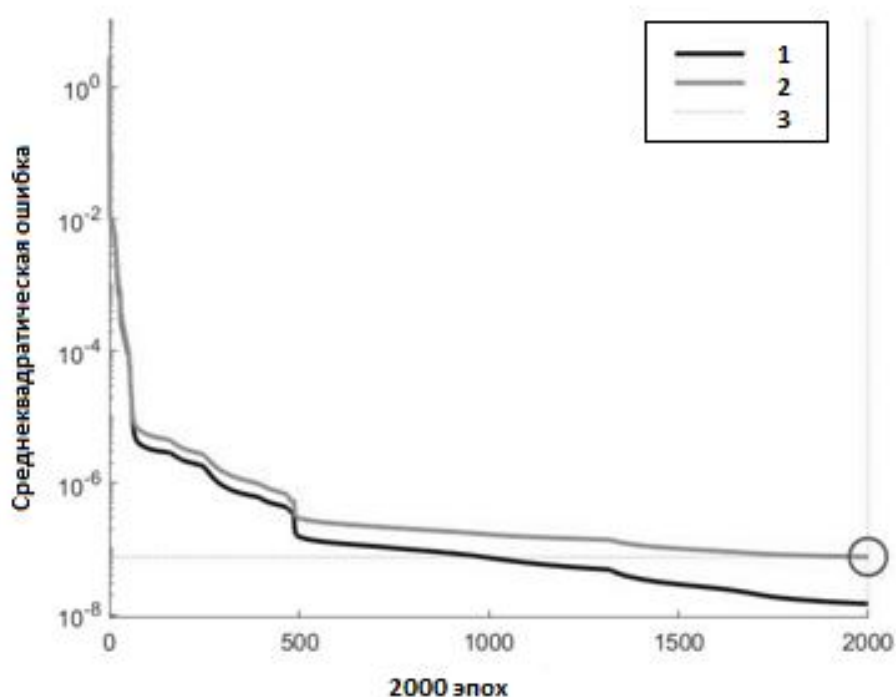


Рис. 3. График обучения ИНС для TGS821: 1 – обучающая выборка; 2 – контрольная выборка; 3 – лучший результат

Fig. 3. ANN training schedule for TGS821: 1 – training sample; 2 – control sample; 3 – best result

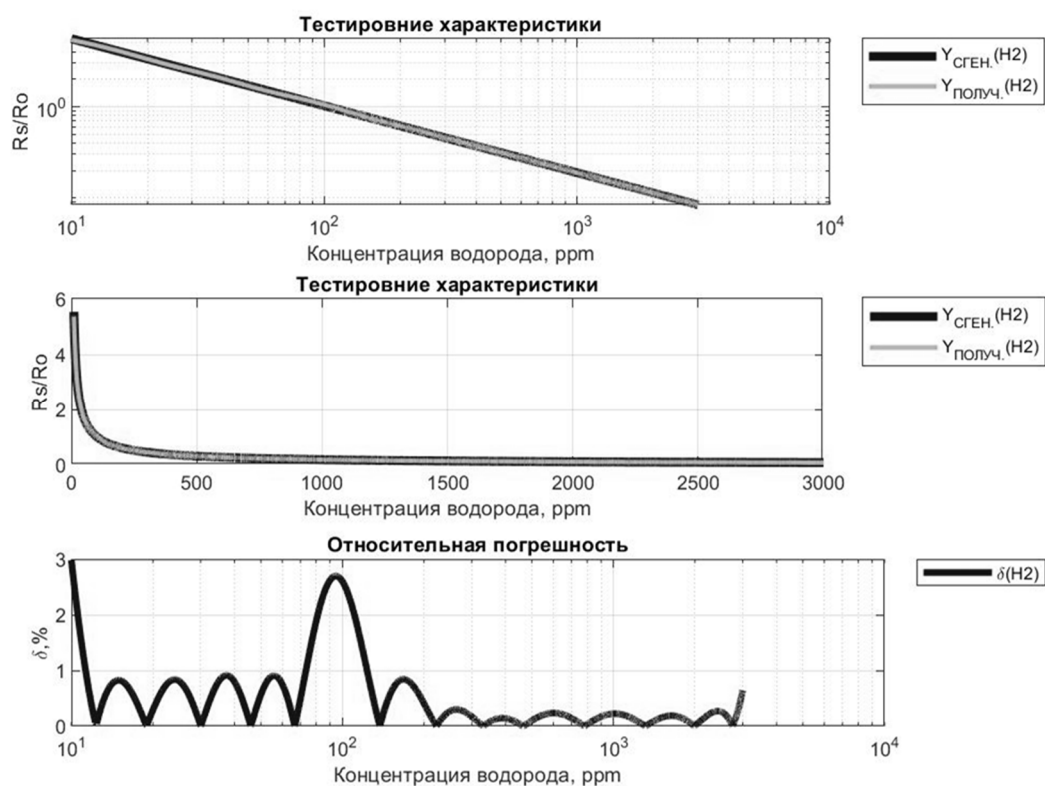


Рис. 4. Тестирование ИНС по воспроизведению характеристики 1

Fig. 4. Testing the ANN for reproducing characteristic 1

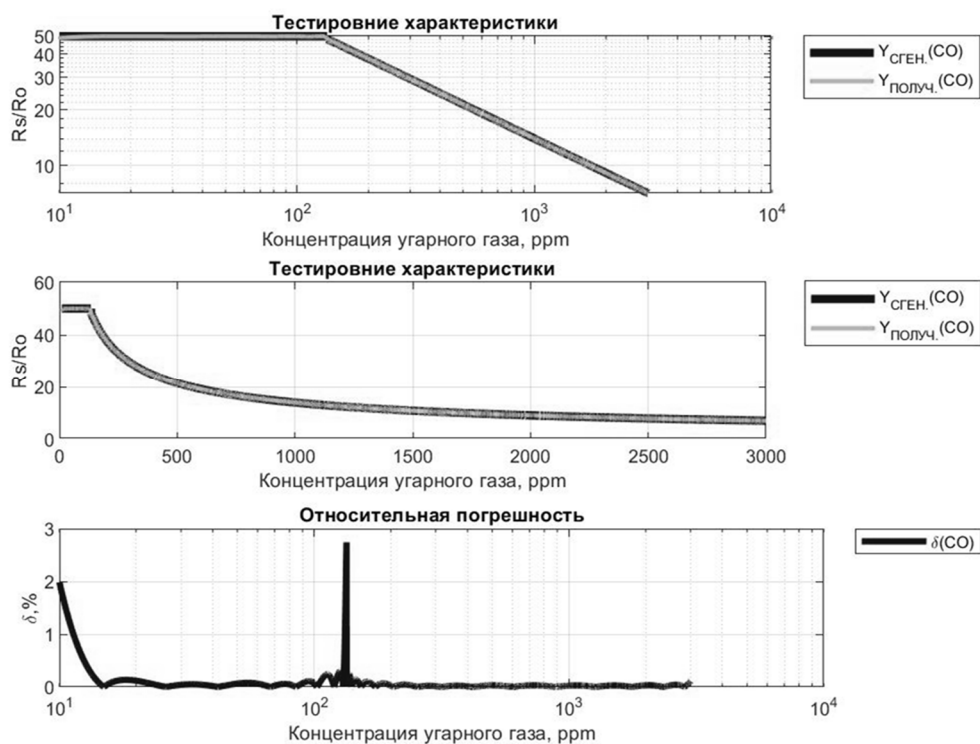


Рис. 5. Тестирование ИНС по воспроизведению характеристики 2

Fig. 5. Testing the ANN for reproducing characteristic 2

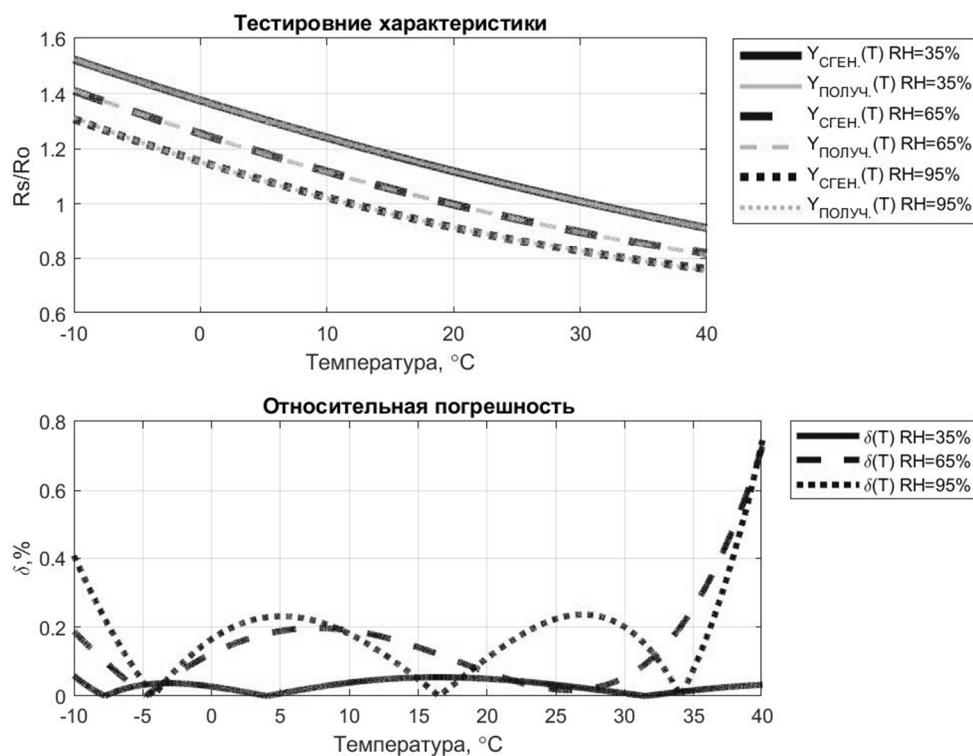


Рис. 6. Тестирование ИНС по воспроизведению температурной зависимости (характеристики 4-6)

Fig. 6. Testing of the ANN for reproducing the temperature dependence (characteristics 4-6)

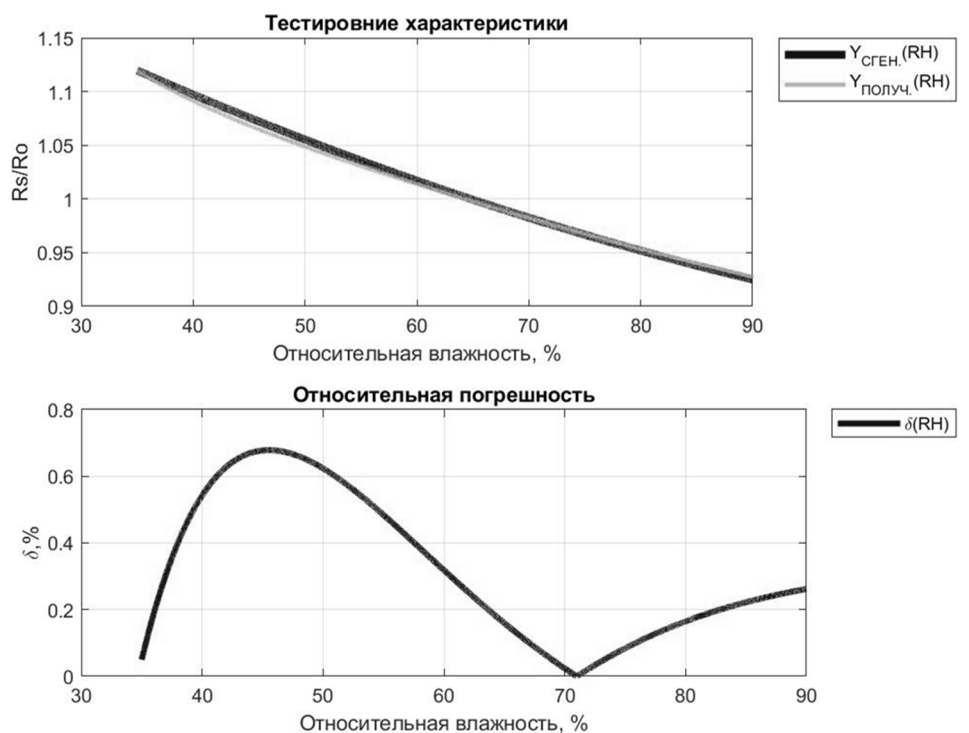


Рис. 7. Тестирование ИНС по характеристике 3

Fig. 7. Testing the ANN according to characteristic 3

Аналогичные исследования были проведены для датчика угарного газа TGS2442. Наилучшие результаты также

показала нейронная сеть структурой 4-6-1, погрешность тестирования не превысила 5% (табл. 6).

Таблица 6. Измененный состав обучающей и контрольной выборок и погрешности тестирования модели датчика TGS2442

Table 6. Modified composition of the training and control samples and testing errors of the TGS2442 sensor model

Характеристика / Characteristic	Диапазон / Range	Кол-во то- чек / Num- ber of points	Макс. относи- тельная по- грешность, % / Max. relative sinfulness, %	СКО, %
1- Y(CO)	30..3000ppm	1250	4.85	0.05
2- Y(H ₂)	30..3000ppm	500	2.03	0.11
3- Y(RH)CO=30ppm	35..90%	50	0.73	0.38
4- Y(RH)CO=100ppm	35..90%	50	0.7	0.39
5- Y(RH)CO=300ppm	35..90%	100	1.05	0.54
6- Y(T) CO=30ppm	-10..40°C	50	0.92	0.14
7- Y(T) CO=100ppm	-10..40°C	100	1	0.28
8- Y(T) CO=300ppm	-10..40°C	100	1.8	0.36
Всего/Макс.		2200	4.85	0.54

Полученные результаты демонстрируют высокую эффективность применения нейронных моделей датчиков для генерации обучающих данных. Реализация данной методики позволяет снизить погрешности воспроизведения дополнительных характеристик (чувствительность к влажности, температуре) с максимальных 8% (СКО), в случае использования математических моделей датчиков, до 0,54% (табл. 7).

Максимальная относительная погрешность воспроизведения температурной характеристики при математи-

ческом моделировании составляла 29% в диапазоне температур от +30 – +50 °С, предложенный метод генерации данных позволяет воспроизводить все характеристики с максимальной относительной погрешностью менее 5%.

Дополнительным достоинством является возможность автоматизации процесса создания нейронных моделей датчиков, в то время, как параметризация коэффициентов математических моделей для различных датчиков в одной партии требует трудоемких работ и реализации сложных алгоритмов.

Таблица 7. Сравнительный анализ методик генерации обучающих данных

Table 7. Comparative analysis of training data generation techniques

Тип датчика / Sensor type	Варьируе- мый фактор / Variable factor	Диапазон значений параметра / Range of parameter values	Условия / Conditions	Мат. модели / Mat. models		ИНС	
				δ_{max} , %	СКО, %	δ_{max} , %	СКО, %
Полупровод- никовый	Концентра- ция CO	30 – 1000 <i>ppm</i>	RH=50% $C_{H_2}=0$ об.%; $T = 293,15 K$	5	0,24	4,85	0,05
	Концентра- ция H_2	300 – 1000 <i>ppm</i>	RH=50% $C_{CO}=0$ об.%; $T = 293,15 K$	0,9	0,67	2,03	0,11
	Влажность	10 – 90 %	$C_{CO}=30-1000$ <i>ppm</i> $C_{H_2}=0$ об. %; $T = 293,15 K$	16	5,5	0,73	0,38
	Температура	-5 – +50°C	RH=50 %; $C_{CO}=30-1000$ <i>ppm</i> $C_{H_2}=0$ об. %	29	8,2	0,7	0,39

Выводы

В результате проведенных работ получены нейронные модели полупроводниковых датчиков газа, позволяющие воспроизводить сигнал при колебаниях параметров окружающей среды с относительной погрешностью менее 5% и генерировать обучающие данные в требуе-

мом количестве в автоматическом режиме. Полученные модели учитывают чувствительность к перекрестному газу, влажности и температуре и имеют одинаковую структуру 4-6-1. Определен оптимальный объем обучающих данных, подтверждены интерполяционные свойства многослойной нейронной сети прямого распространения.

Список литературы

1. Томакова Р.А., Филист С.А., Яа З.До. Универсальные сетевые модели для задач классификации биомедицинских данных // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 4-2 (43). С. 44-50.
2. Дашковский А.А., Примиский В.Ф. Математическое моделирование многокомпонентных газоаналитических измерений и анализ погрешностей // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2005. № 6/2 (18). С. 108-111.
3. Сазонов С.Ю., Титенко Е.А., Ханис Н.А. Подход к прогнозированию возникновения пожароопасной ситуации в дата-центре на основе нейронных сетей // Известия Юго-Западного государственного университета. 2015. № 4 (17). С. 8-14.
4. Swingler K. Applying neural networks: A practical guide. London: Academic Press, 1996. 345 p.
5. Foresee F.D., Hagan M.T. Gaus-Newton approximation to Bayesian regularization // Proceedings of the 1997 International Joint Conference on Neural Networks. 1997. P. 1930-1935.
6. Дрейзин В.Э., Гримов А.А. Измерительный блок для нейтронного спектрометра реального времени с вычислительным восстановлением энергетических спектров с помощью нейронных сетей // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 2-3. С. 223-228.
7. Применение нейронных сетей в задаче получения карты глубины из двумерного изображения/ Д.И. Михальченко, А.Г. Ивин, О.Ю. Сивченко, Е.А. Аксаментов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(3): 113-134. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-113-134>.
8. Дрейзин В. Э., Брежнева Е. О., Бондарь О. Г. Устройство обработки сигналов многокомпонентного газоанализатора // Приборы и Системы. Управление, контроль, диагностика. 2011. № 12. С. 43-48.

9. Бондарь О.Г., Брежнева Е.О., Чернышов Р.Е. Применение нейронных сетей в задаче количественного анализа состава воздушной среды // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(1): 159-174. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-24-1-159-174>.
10. Bondar O. G., Brezhneva E. O., Pozdnyakov V. V. Methods and Algorithms for Control of a Thermocatalytic Hydrogen Sensor // Measurement Techniques. August, 2018. Vol.61. No. 5. P.514-519.
11. Metal Oxide Semi-Conductor Gas Sensors in Environmental Monitoring / F. George., L. M. Cavanagh, A. Afonja, R. Binions // Sensors. 2010. P. 5469-5502.
12. Дрейзин В. Э., Брежнева Е. О. Моделирование газочувствительных датчиков // Информационно-измерительные диагностические и управляющие системы. Диагностика 2011: материалы 2-ой Международной науч.-техн. конф. Курск, 2011. С. 53-59.
13. Дрейзин В.Э., Брежнева Е. О. Сравнительный анализ характеристик промышленных газочувствительных датчиков // Датчики и системы. 2011. № 3. С. 68-78.
14. Дьяконов В. П., Круглов В. В. MatLab 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2. М: Солон – Пресс, 2006. 456 с.
15. Латыпова Рамиля Нейронные сети. М.: LAP LambertAcademicPublishing, 2012. 572 с.
16. Основы нейрокибернетики. М.: Высшая школа, 2015. 372 с.
17. Редько В.Г. Подходы к моделированию мышления. М:/: ИЛ, 2016. 392 с.
18. Редько В.Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект: Модели и концепции эволюционной кибернетики. М.: Высшая школа, 2017. 224 с.
19. Тадеусевич Рышард [и др.]. Элементарное введение в технологию нейронных сетей с примерами программ. Москва: СПб.: Питер, 2011. 408 с.
20. Брежнева Е. О., Дрейзин В. Э. Выбор сенсоров для разработки многосенсорного газоанализатора газовых смесей // Безопасность жизнедеятельности. 2011. № 4. С. 5-11.

References

1. Tomakova R.A., Filist SA, Yaa Z.D. Tomakova R.A. Universal'nye setevye modeli dlya zadach klassifikatsii biomeditsinskikh dannykh [Universal network models for classification problems of biomedical data]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 4-2 (43), pp. 44-50 (In Russ.).

2. Dashkovsky A. A., Primisikiy V. F. Matematicheskoe modelirovanie mnogokomponentnykh gazoanaliticheskikh izmerenii i analiz pogreshnostei [Mathematical modeling of multicomponent gaseous measurements and error analysis]. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii = Second-European Journal of Advanced Technologies*, 2005, no. 6/2 (18), pp. 108-111 (In Russ.).

3. Sazonov S. Yu., Titenko E. A., Khanis N. A. Podkhod k prognozirovaniyu vozniknoveniya pozharoопасnoi situatsii v data-tsentre na osnove neironnykh sete [Approach to predicting the occurrence of a fire hazard in a data center based on neural networks]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2015, no. 4 (17), pp. 8-14 (In Russ.).

4. Swingler K. *Applying neural networks: A practical guide*. London, Academic Press, 1996, 345 p.

5. Foresee F.D., Hagan M.T. Gaus-Newton approximation to Bayesian regularization. *Proceedings of the 1997 International Joint Conference on Neural Networks*, 1997, pp. 1930-1935.

6. Dreizin V. E., Grima A. A. Izmeritel'nyi blok dlya neitronnogo spektrometra real'nogo vremeni s vychislitel'nym vosstanovleniem energeticheskikh spektrov s pomoshch'yu neironnykh setei [Measurement unit for a real-time neutron spectrometer with numerical recovery of energy spectra using neural networks]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 2-3, pp. 223-228 (In Russ.).

7. Mikhalechenko D. I., Ivin A. G., Shevchenko O. Yu., Aksamentov E. A. Primenenie neironnykh setei v zadache polucheniya karty glubiny iz dvumernogo izobrazheniya [Application of Deep Neural Networks in the Problem of Obtaining Depth Maps from Two-Dimensional Images]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019; 23(3): 113-134 (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-113-134>.

8. Dreizin V. E., Brezhneva E. O., Bondar O. G. Ustroistvo obrabotki signalov mnogokomponentnogo gazoanalizatora [Signal processing Device for multicomponent gas analysis.]. *Pribory i Sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika = Devices and Systems Management, Control, Diagnostics*, 2011, no. 12, pp. 43-48 (In Russ.).

9. Bondar O. G., Brezhneva E. O., Chernyshov R. E. Primenenie neironnykh setei v zadache kolichestvennogo analiza sostava vozduшной sredy [Application of Neural Networks in the Problem of Quantitative Analysis of Air Composition]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2020, 24(1): 159-174 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-159-174>

10. Bondar O. G., Brezhneva E. O., Pozdnyakov V. V. Methods and Algorithms for Control of a Thermocatalytic Hydrogen Sensor. *Measurement Techniques*, August, 2018, vol.61, no. 5, pp.514-519.
11. George F., Cavanagh L. M., Afonja A., Binions R. Metal Oxide Semi-Conductor Gas Sensors in Environmental Monitoring. *Sensors*, 2010, pp. 5469-5502.
12. Dreizin V. E., Brezhnev E. O. [Modeling of gas-sensitive sensors]. *Materialy 2-oi Mezhdunarodnoi nauch.-tekhn. konf. "Informatsionno-izmeritel'nye diagnosticheskie i upravlyayushchie sistemy. Diagnostika 2011"* [Materials of the 2nd International scientific and technical conference "Information and measurement diagnostic and control systems. Diagnostics 2011"]. Kursk, 2011, pp. 53-59 (In Russ.).
13. Dreizin V. E., Brezhneva E. O. Sravnitel'nyi analiz kharakteristik promyshlennykh gazochuvstvitel'nykh datchikov [Comparative analysis of characteristics of industrial gas-sensitive sensors]. *Datchiki i sistemy = Sensors and Systems*, 2011, no. 3, pp. 68-78 (In Russ.).
14. Diakonov V. P., Kruglov V. V. *MatLab 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2*. Moscow, Solon-Press Publ., 2006. 456 p. (In Russ.).
15. Latypova Ramilya. *Neironnye seti* [Neural networks]. Moscow, LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 572 p. (In Russ.).
16. Osnovy neirokibernetiki [Fundamentals of Neurocybernetics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2015. 372 p. (In Russ.).
17. Redko V. G. Podkhody k modelirovaniyu myshleniya [Approaches to modeling thinking]. Moscow, IL Publ., 2016. 392 p. (In Russ.).
18. Redko V. G. *Evolutsiya, neironnye seti, intellekt: Modeli i kontseptsii evolyutsionnoi kibernetiki* [Evolution, neural networks, intelligence: Models and concepts of evolutionary Cybernetics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2017. 224 p. (In Russ.).
19. Tadeusevich Ryszard [et al.]. *Elementarnoe vvedenie v tekhnologiyu neironnykh setei s primerami programm* [Elementary introduction to neural network technology with examples of programs]. Moscow, Saint-Petersburg, Piter Publ., 2011. 408 p. (In Russ.).
20. Brezhneva E. O., Dreizin V. E. Vybor sensorov dlya razrabotki mnogosensornogo gazoanalizatora gazovykh smesei [Selection of sensors for the development of a multi-sensor gas analyzer for gas mixtures]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti = Life Safety*, 2011, no. 4, pp. 5-11 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Бондарь Олег Григорьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры Космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: b.og@mail.ru

Oleg G. Bondar, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Space Instrumentation and Communication Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: b.og@mail.ru

Брежнева Екатерина Олеговна, кандидат технических наук, доцент кафедры Космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: bregnevaeo@mail.ru

Ekaterina O. Brezhneva, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Space Instrumentation and Communication Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: bregnevaeo@mail.ru

Андреев Кирилл Геннадьевич, студент кафедры Космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: skyline.ozerk@gmail.com

Kirill G. Andreev, Student, Space Instrumentation and Communication Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: skyline.ozerk@gmail.com

Поляков Николай Владимирович, студент кафедры Космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: nikera2016@mail.ru

Nikolay V. Polyakov, Student, Space Instrumentation and Communication Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: nikera2016@mail.ru