

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Известия
Юго-Западного
государственного
университета**

Научный журнал

Том 29 № 3 / 2025

**Proceedings
of the Southwest
State University**

Scientific Journal

Vol. 29 № 3 / 2025



**Известия Юго-Западного
государственного университета
(Izvestiya Yugo-Zapadnogo 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, 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: 2.5.4; 2.5.5; 2.5.8.

Строительство: 2.1.1; 2.1.3; 2.1.9.

Информатика, вычислительная техника и управление: 1.2.2; 2.3.1; 2.3.3; 2.3.4; 2.3.6.

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:

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Борзов Дмитрий Борисович, д-р техн. наук, доцент; Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

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

Булычев Всеволод Валериевич, д-р техн. наук, профессор; Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал (г. Калуга, Россия);

Бхаттачарья Сиддхартха, д-р философии (PhD), профессор, Университет Христа (Крайст), Бангалор, Индия;

Бьянко Лино, д-р философии (PhD), профессор, Университет архитектуры, строительства и геодезии (Мальта);

Бычков Игорь Вячеславович, д-р техн. наук, профессор, академик РАН, Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова (г.Иркутск, Россия);

Грибова Валерия Викторовна, д-р техн. наук, чл.-кор. РАН, Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН (г. Владивосток, Россия);

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

Казанцев Виктор Борисович, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт биологии и биомедицины Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (г. Нижний Новгород, Россия);

Колчунов Виталий Иванович, д-р техн. наук, профессор, академик Российской академии архитектуры и строительных наук (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);

Мещеряков Роман Валерьевич, д-р техн. наук, профессор, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (г. Москва, Россия);

Новиков Дмитрий Александрович, д-р техн. наук, академик РАН, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (г. Москва, Россия);

Овчинников Виктор Васильевич, д-р техн. наук, профессор, Московский политехнический университет (г. Москва, Россия);

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

Петрешин Дмитрий Иванович, д-р техн. наук, профессор, Брянский государственный технический университет (г. Брянск, Россия);

Ронжин Андрей Леонидович, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (г. Санкт-Петербург, Россия);

Сизов Александр Семенович, д-р техн. наук, профессор, НИЦ ФГУП «18 ЦНИИ» МО РФ (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);

Черный Сергей Григорьевич, канд. техн. наук, доцент, Керченский государственный морской технологический университет (г. Керчь, 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, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия)

Грабовой Кирилл Петрович, д-р экон. наук, профессор, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (г. Москва, Россия);

Гридинев 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);

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 (Россия);

Кореневский 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).

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 №ФС77-85895 от 04.09.2023).

ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

Префикс DOI:10.21869

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

© Юго-Западный государственный университет, 2025

 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 30.09.2025.

Дата выхода в свет 28.11.2025. Формат 60x84/8.

Бумага офсетная. Усл.печ.л. 25,8.

Тираж 1000 экз. Заказ 49.



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 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: 2.5.4; 2.5.5; 2.5.8.

Construction: 2.1.1; 2.1.3; 2.1.9.

Computer science, computer engineering and control: 1.2.2; 2.3.1; 2.3.3; 2.3.4; 2.3.6.

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

Maksim V. Bobyr, Dr. of Sci. (Engineering), Professor,

Southwest State University (Kursk, Russia)

EDITORIAL BOARD

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

Dmitry B. Borzov, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

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

Vsevolod V. Bulychev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor; Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch (Kaluga, Russia);

Bhatgacharya Siddhartha, Doctor of Philosophy (PhD), Professor, Christ University (Christ), Bangalore, India;

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);

Igor V. Bychkov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, V.M. Matrosov Institute of System Dynamics and Control Theory (Irkutsk, Russia);

Sergey G. Cherny, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Kerch State Marine Technological University (Kerch, Russia);

Valeria V. Gribova, Dr. of Sci. (Engineering), Member of the Russian Academy of Sciences, Institute of Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Vladivostok, Russia);

Viktor B. Kazantsev, Dr. of Sci. (Physical and Mathematical), Professor, Institute of Biology and Biomedicine of the National Research Nizhny Novgorod State University named after N.I. Lobachevsky;

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

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

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

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

Roman V. Meshcheryakov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia);

Dmitry A. Novikov, Dr. of Sci. (Engineering), Academician of the Russian Academy of Sciences, V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia);

Viktor V. Ovchinnikov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Moscow Polytechnic University (Moscow, Russia);

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

Dmitry I. Petreshin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Bryansk State Technical University (Bryansk, Russia);

Andrey L. Ronzhin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (St. Petersburg, 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);

Zhanybaj T. Zhusubaliev, 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, Southwest State University (Kursk, Russia)

Kirill P. Grabovoy, Dr. of Sci. (Economics), Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russia);

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);

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 (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).

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 №ФС77-85895 от 04.09.2023).

ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

DOI Prefix: 10.21869

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

Printing office:

Printing Center

16+

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

Singed to print 30.09.2025.

Release date 28.11.2025. Format 60x84/8.

Offset paper. Printer's sheets 25,8.

Circulation 1000 copies. Order 49.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Оригинальные статьи

- Математическое моделирование силового взаимодействия экзоскелета и человека при реабилитации больных с повреждениями нижних конечностей 10**

Яцун С.Ф., Емельянова О.В., Савельева Е.В., Фурсов Г.А.

- Исследование заготовок нового сплава на основе порошков, полученных электроэрозионным диспергированием 26**

Агеев Е.В., Сабельников Б.Н.

СТРОИТЕЛЬСТВО

Оригинальные статьи

- Оптимизированная консольная конструкция с применением текстильно-армированного бетона для климатических условий юга России 37**

Борисов Н.О., Столлярев О.Н.

- Повышение экологических характеристик теплогенераторов систем автономного теплоснабжения 56**

Ежов В.С., Бурцев А.П., Седых А.Н., Сологубова А.В., Базартинова А.А.

- Математическое моделирование комбинированных систем утилизации низкопотенциальной теплоты сбросных газов и вентиляционных выбросов 72**

Бурцев А.П.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Оригинальные статьи

- Применение глубокого обучения сверточной нейронной сети для классификации жестов из набора данных Sign Language MNIST 86**

Бобырь М.В., Асеев А.А.

- Модель и реализация компилятора функционального языка Common LISP 99**

Чаплыгин А.А.

- Когнитивный алгоритм и программа конспектирования текста 113**

Лисицин Л.А., Лисицин А.Л., Блоха Д.Н.

- Гибридный генетический алгоритм для идентификации параметров нелинейных моделей с ограничениями в задачах импеданса биоматериала 124**

Корсунский Н.А., Томакова Р.А., Старков В.А.

- Математические модели и схемы конвейерной обработки унитарных кодов в однородных вычислительных системах 137**

Титенко Е.А., Сизов А.С., Титенко М.А.

- Разработка геоинформационной системы для мониторинга состояния государственной геодезической и государственной нивелирной сетей Курской области 157**

Аникина Е.И., Чугреев Н.А.

Программно-информационная система для конструирования веб-сайтов	171
<i>Ефремова И.Н., Петрик Е.А., Кириллов А.М.</i>	
Адаптивные нечеткие когнитивные карты с гибридной оптимизацией для прогнозирования продаж в условиях рыночной волатильности	182
<i>Сизов А.С., Халин Ю.А., Белых А.А.</i>	
Исследование влияния гаммы-коррекции изображения в задаче распознавания объектов на пешеходном переходе	193
<i>Милостная Н.А., Янгяева Н.И.</i>	
Подход к самообучению автоассоциативной модели нейронной сети высокого порядка.....	210
<i>Малышев А.В.</i>	
К сведению авторов	222

CONTENT

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original articles

Mathematical modeling of the force interaction between an exoskeleton and a human in the rehabilitation of patients with lower limb injuries	10
---	-----------

Yatsun S.F., Emelyanova O.V., Saveleva E.V., Fursov G.A.

Investigation of gas dynamic coatings based on electroerosive aluminum powders	26
---	-----------

Ageev E.V., Sabelnikov B.N.

CONSTRUCTION

Original articles

Optimized cantilever structure using textile-reinforced concrete for the climatic conditions of southern Russia	37
--	-----------

Borisov N.O., Stolyarov O.N.

Improving the environmental performance of heat generators in autonomous heat supply systems	56
---	-----------

Yezhov V.S., Burtsev A.P., Sedykh A.N., Sologubova A.V., Bazartinova A.A.

Mathematical modeling of combined low-potential heat recovery systems for exhaust gases and ventilation emissions	72
--	-----------

Burtsev A.P.

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Original articles

Applying deep learning convolutional neural network to classify gestures from MNIST Sign Language dataset	86
--	-----------

Bobyrs M.V., Aseev A.A.

Modeling and implementation of Common LISP functional language compiler	99
--	-----------

Chaplygin A.A.

A cognitive algorithm and a text annotation program	113
--	------------

Lisitsin L.A., Lisitsin A.L., Blokha D. N.

Hybrid genetic algorithm for identifying parameters of nonlinear models with constraints in biomaterial impedance problems	124
---	------------

Korsunsky N.A., Tomakova R.A., Starkov V.A.

Mathematical models and schemes of conveyor processing of unitary codes in homogeneous computing systems	137
---	------------

Titenko E.A., Sizov A.S., Titenko M.A.

Development of a geoinformation system for monitoring the status of the state geodetic and state leveling networks of the Kursk region	157
---	------------

Anikina E.I., Chugreev N.A.

Software and information system for web site construction	171
<i>Efremova I.N., Petrik E.A., Kirillov A.M.</i>	
Adaptive fuzzy cognitive maps with hybrid optimization for predicting sales in conditions of market volatility	182
<i>Sizov A.S., Khalin Y.A., Belykh A.A.</i>	
Investigation of the effect of gamma image correction in the problem of object recognition at a pedestrian crossing	193
<i>Milostnaya N.A., Yanglyaeva N.I.</i>	
An approach to self-training of a high-order autoassociative neural network model	210
<i>Malyshev A.V.</i>	
Information of the authors	222

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Оригинальная статья / Original article

УДК 62.52

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-10-25>



Математическое моделирование силового взаимодействия экзоскелета и человека при реабилитации больных с повреждениями нижних конечностей

С.Ф. Яцун¹ , О.В. Емельянова¹, Е.В. Савельева¹, Г.А. Фурсов¹

² Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

e-mail: teormeh@inbox.ru

Резюме

Цель исследования. Обеспечение заданной точности последовательных и параллельных движений в голеностопе, колене, бедре активного реабилитационного экзоскелета нижних конечностей с одновременной частичной разгрузкой голеностопного и коленного суставов от осевых нагрузок за счет установки одного из приводов вращательного движения на бедрном суставе. Задачи: разработка и реализация стратегии активно - пассивного движения (АПД), при которой фазы пассивного движения нижних конечностей (при этом, экзоскелет обеспечивает перемещение конечностей), сочетаются с фазами активного движения, когда сам пациент осуществляет желаемое движение, а экзоскелет ассистирует ему. Сравнительный анализ результатов экспериментов и оценка адекватности и применимости математической модели.

Методы. Исследование выполнено в соответствии с общепринятыми методами проведения и планирования экспериментальных исследований. При моделировании движения нижних конечностей учитываются параметры, характеризующие силовое взаимодействие экзоскелета и человека, что позволяет определять реакции в тазобедренном шарнире и синтезировать параметры системы управления с учетом внешних возмущающих воздействий.

Результаты. Разработана математическая модель движения нижних конечностей реабилитационного тренажерно - обучающего комплекса, отличающаяся от известных тем, что наряду с учетом кинематических и динамических особенностей движения звеньев реабилитационного устройства, учитываются параметры, характеризующие силовое взаимодействие экзоскелета и человека, что позволяет определять реакции в тазобедренном шарнире и синтезировать параметры системы управления с учетом внешних возмущающих воздействий.

Заключение. Предлагаемая в работе математическая модель и структура реабилитационного аппарата в виде плоского манипулятора – экзоскелета, оснащенного двумя приводами, один из которых совмещен с осью тазобедренного сустава человека, позволяет скомпенсировать влияние активных и реактивных сил, действующих на тазобедренный сустав человека при выполнении медицинских манипуляций.

Ключевые слова: математическая модель; экзоскелет; реабилитация; моделирование реабилитационного экзоскелета; разгрузка сустава.

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

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Госзадания Минобрнауки России по теме «Разработка методов синтеза адаптивных и интеллектуальных робототехнических устройств и комплексов в целях расширения функциональных технологических и производственных возможностей человека» (соглашение № 075-03-2025-526).

Для цитирования: Математическое моделирование силового взаимодействия экзоскелета и человека при реабилитации больных с повреждениями нижних конечностей / С.Ф. Яцун, О.В. Емельянова, Е.В. Савельева, Г.А. Фурсов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(3): 10-25. [https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-10-25](https://doi.org/10.21869/doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-10-25).

Поступила в редакцию 30.06.2025

Подписана в печать 21.07.2025

Опубликована 30.09.2025

Mathematical modeling of the force interaction between an exoskeleton and a human in the rehabilitation of patients with lower limb injuries

Sergey F. Yatsun¹✉, Oksana V. Emelyanova¹, Ekaterina V. Saveleva¹,
Gavriil A. Fursov¹

² Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Abstract

Purpose of research. Ensuring the specified accuracy of sequential and parallel movements in the ankle, knee, hip of an active rehabilitation exoskeleton of the lower extremities with simultaneous partial unloading of the ankle and knee joints from axial loads by installing one of the rotary motion actuators on the hip joint. Tasks. The development and implementation of an active - passive movement strategy (ADF), in which the phases of passive movement of the lower extremities (while the exoskeleton provides movement of the limbs) are combined with the phases of active movement, when the patient himself performs the desired movement, and the exoskeleton assists him. Comparative analysis of experimental results and assessment of the adequacy and applicability of the mathematical model.

Methods. The study was performed in accordance with generally accepted methods of conducting and planning experimental studies. When modeling the movement of the lower extremities, the parameters characterizing the force interaction of the exoskeleton and the human are taken into account, which makes it possible to determine reactions in the hip joint and synthesize the parameters of the control system taking into account external disturbing influences.

Results. A mathematical model of the movement of the lower extremities of a rehabilitation training complex has been developed, which differs from the known ones in that, along with taking into account the kinematic and dynamic features of the movement of the links of the rehabilitation device, parameters characterizing the force interaction of the exoskeleton and a person are taken into account, which makes it possible to determine reactions in the hip joint and synthesize the parameters of the control system taking into account external disturbing influences.

Conclusion. The mathematical model and structure of the rehabilitation device proposed in the paper in the form of a flat exoskeleton manipulator equipped with two actuators, one of which is aligned with the axis of the human hip joint,

makes it possible to compensate for the influence of active and reactive forces acting on the human hip joint during medical manipulations.

Keywords: mathematical model; exoskeleton; rehabilitation; modeling of rehabilitation exoskeleton.

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

Funding: The work was supported by the State Assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation on the topic "Development of methods for the synthesis of adaptive and intelligent robotic devices and complexes in order to expand the functional technological and production capabilities of humans" (Agreement № 075-03-2025-526)

For citation: Jatsun S.F., Emelyanova O.V., Saveleva E.V., Fursov G.A. Mathematical modeling of the force interaction between an exoskeleton and a human in the rehabilitation of patients with lower limb injuries. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University.* 2025; 29(3): 10-25 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-10-25>.

Received 30.06.2025

Accepted 21.07.2025

Published 30.09.2025

Введение

Различные травмы опорно-двигательного аппарата являются одними из распространенных повреждений, полученных вследствие военных, промышленных, спортивных, дорожно-транспортных и др. происшествий, а также возрастных нарушений функций организма. Они могут приводить к полной или частичной инвалидности, поэтому процесс восстановления двигательных функций организма и возвращение к активной социальной и трудовой деятельности зависит от правильности лечения и своевременности проведения реабилитационных мероприятий.

Одним из способов восстановления и реабилитации таких больных является применение специальных тренажеров, которые представляют собой инновационные человеко-машинные комплексы, включающие задающие устройства различного типа (джойстики с обратной свя-

зью, копирующие экзоскелеты, пульты управления) и электромеханические системы управления. Такие комплексы повышают качество проведения медицинских процедур за счет придания мобильности пациенту с повреждением опорно-двигательного аппарата, при том, что исполнительный орган робота, например – экзоскелет, обеспечивает заданное движение нижних конечностей, с одновременным объективным контролем за состоянием пациента и оценкой окружающей пациенту среды [1]. Существенной проблемой является то, что в существующих реабилитационных тренажерах отсутствует система адаптации тестовых воздействий с учетом индивидуальных параметров пациента и информации об условиях взаимодействия прибора и стопы человека, что особенно важно при наличии контрактуры и спастики. Система управления реабилитационного комплекса должна обеспечивать как режим пассивного движения

в суставах, осуществляющегося за счёт плавной и постепенной работы элементов аппарата, так и активного движения платформы, когда пациент самостоятельно выполняет движения с учетом параметров выбранного режима работы. Активный режим работы способствует восстановлению нейронных связей [2].

Рассмотрим некоторые аппараты, получившие распространение в области реабилитации нижних конечностей [3].

К активно-пассивным тренажерам нижних конечностей можно отнести:

– велотренажеры THERA-Trainer Tigo (Германия) (рис. 1, а), позволяющие осуществлять тренировки ослабленных мышц и уменьшать спастичность, а также улучшать кровообращение в конечностях¹.

– беговые дорожки, степперы, отличающиеся от спортивных более низкой скоростью и небольшим шагом ее изменения, что позволяет пациенту держать ситуацию под контролем. Например Lokomat Nanos (Швейцария), LEXO (Австрия) (рис.1, б) и др. используемые для восстановления навыков ходьбы, оборудованы длинными поручнями и ремнями безопасности².

¹ Реабилитационные тренажеры и их применение // Реабилитационные тренажеры: виды, модели, отличия, где и для чего применяются? URL: <https://www.kp.ru/guide/reabilitatsionnye-trenazhery.html>; Роботизированная механотерапия // Бека РУС; 2025. URL: <https://beka.ru/>

² Реабилитационное оборудование Ормед // Каталог реабилитационного оборудования и тренажеров; 2025. URL: <https://www.ormed.ru/katalog/APTROMOT® ACTIVE-K> // Тренажер для пассивной/активной разработки тазо-бедренного/коленного сустава. URL: <https://www.rusmedimport.com/catalog/rehabilitation/apparatus-dlya-nizhnih-konechnostey/artromot-active-k/>

– тренажеры для нижних конечностей, например линейка российских аппаратов «ОРМЕД FLEX», предназначены для проведения механотерапии тазобедренного, коленного и голеностопного суставов. Могут обеспечивать как постоянное пассивное движение, так и контролируемое активное движение одного или двух суставов, правильность которых отслеживается с помощью тензодатчика (рис. 1, в). Используются для предотвращения осложнений после переломов, травм, а также лечения заболевания суставов в послеоперационном периоде и др.³.

Линейка механотерапевтических реабилитационных аппаратов от компании «ARTROMOT» (Германия), используется как для непрерывной, разработки одного, так и для двух суставов, например коленного и (ARTROMOT ACTIVE-K) (рис. 1, г), принцип действия которого основан на использовании биологической обратной связи [4, 5].

Обзор существующих мехатронных реабилитационных аппаратов, разрешенных к применению, достаточно ограничен и в основном их использование основание на непрерывном, пассивном движении нижних конечностей. Некоторые модели могут одновременно обеспечивать движения в двух суставах, например голеностопном и коленном, причем привод расположен на пятке, которая

³ Rehabilitation simulator for ankle joint development Kinetec Breva Ankle CPM; URL: <https://medtehnika-1.ru/reabilitatsionnyi-trener-kinetec-breva-ankle-cpm>

находится в возвратно-поступательном движении. Это вызывает избыточное осевое воздействие на коленный и тазобедренный суставы.

Целью исследований является обеспечение заданной точности последовательных и параллельных движений в го-

леностопе, колене, бедре активного реабилитационного экзоскелета нижних конечностей с одновременной частичной разгрузкой голеностопного и коленного суставов от осевых нагрузок за счет установки одного из приводов вращательного движения на бедрном суставе.



Рис. 1. Механотерапевтические реабилитационные тренажеры: **а** – THERA-Trainer Tigo; **б** – LEXO; **в** – ОРМЕД FLEX -F01BA; **г** – ARTROMOT ACTIVE-K

Fig. 1. Mechanotherapy rehabilitation simulators: **a** – THERA-Trainer Tigo; **b** – LEXO; **c** – ОРМЕД FLEX -F01BA; **d** – ARTROMOT ACTIVE-K

Для этого необходимо разработать и реализовать стратегию активно - пассивного движения (АПД), при которой фазы пассивного движения нижних конечностей (при этом, экзоскелет обеспечивает перемещение конечностей), сочетаются с фазами активного движения, ко-

гда сам пациент осуществляет желаемое движение, а экзоскелет ассирирует ему [6, 7, 8].

Материалы и методы

Рассмотрим схему движения человека в реабилитационном аппарате –

экзоскелете. В общем случае, наиболее эффективно реабилитация проходит при одновременном воздействии на несколько суставов нижних конечностей. Обобщенная расчетная схема устройства в виде плоского манипулятора представлена на рис. 2. Он состоит из 3-х звеньев: звено 1 установлено на стойке с помощью активного цилиндрического шарнира; звено 2 связывает первый и третий звенья с помощью активных шарниров.

Звено 3 обеспечивает движение точки *C* пятки стопы пациента в экоскелете, которое происходит по опорной плоской поверхности *nm*. Возможен вариант как подвижной, в вертикальной плоскости ($b \neq \text{const}$), так и не подвижной поверхности ($b = \text{const}$). Точками *O*, *A*, *B* обозначены шарниры экзоскелета, совпадающие с суставами человека: бедерным, коленным и голеностопным соответственно [8, 9, 10].

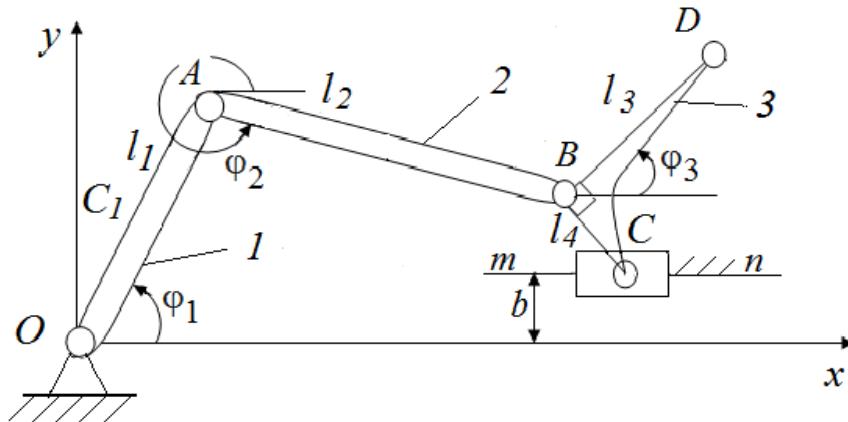


Рис. 2. Кинематическая схема плоского манипулятора – экзоскелета

Fig. 2. Kinematic scheme of a flat manipulator exoskeleton

Данный реабилитационный аппарат – экзоскелет оснащен двумя приводами. Один из них обеспечивает поворот стопы относительно голени, Второй – поворот бедра относительно точки *O*, при этом точка *C* перемещается вдоль оси *Ox*. Таким образом, данное реабилитационное устройство позволяет реализовать следующие режимы движения:

- 1) реабилитация коленного и тазобедренного суставов;
- 2) реабилитация голеностопного сустава;
- 3) реабилитация коленного, тазобедренного и голеностопного суставов.

Проведем математическое моделирование экзоскелета с шарнирами *O*, *A*, *B* в сагиттальной плоскости [11].

Рассмотрим режим, при котором голеностопный сустав неподвижен $\varphi_3 = \text{const}$. В этом случае система имеет одну степень свободы. Её движение происходит за счет движения точки *C* по прямой *nm*, соответственно точка *B* также совершает прямолинейное поступательное движение.

Проведем кинематический анализ экзоскелета, который позволит установить связи между шарнирами [8, 10, 12].

Определим кинематические характеристики центров масс звеньев OA и AB :

$$x_{C1} = \frac{l_1}{2} \cos \varphi_1; \quad y_{C1} = \frac{l_1}{2} \sin \varphi_1; \quad (1)$$

$$\dot{x}_{C1} = -\frac{l_1}{2} \dot{\varphi}_1 \sin \varphi_1; \quad \dot{y}_{C1} = \frac{l_1}{2} \dot{\varphi}_1 \cos \varphi_1; \quad (2)$$

$$\ddot{x}_{C1} = -\frac{l_1}{2} (\ddot{\varphi}_1 \sin \varphi_1 + \dot{\varphi}_1^2 \cos \varphi_1); \\ \ddot{y}_{C1} = \frac{l_1}{2} (\ddot{\varphi}_1 \cos \varphi_1 - \dot{\varphi}_1^2 \sin \varphi_1); \quad (3)$$

$$x_{C2} = l_1 \cos \varphi_1 + \frac{l_2}{2} \cos \varphi_2; \\ y_{C2} = l_1 \sin \varphi_1 - \frac{l_2}{2} \sin \varphi_2; \quad (4)$$

$$\dot{x}_{C2} = -l_1 \dot{\varphi}_1 \sin \varphi_1 - \frac{l_2}{2} \dot{\varphi}_2 \sin \varphi_2; \\ \dot{y}_{C2} = l_1 \dot{\varphi}_1 \cos \varphi_1 - \frac{l_2}{2} \dot{\varphi}_2 \cos \varphi_2; \quad (5)$$

$$\ddot{x}_{C2} = -l_1 (\ddot{\varphi}_1 \sin \varphi_1 + \dot{\varphi}_1^2 \cos \varphi_1) - \\ - \frac{l_2}{2} (\ddot{\varphi}_2 \sin \varphi_2 + \dot{\varphi}_2^2 \cos \varphi_2); \quad (6)$$

$$\ddot{y}_{C2} = l_1 (\ddot{\varphi}_1 \cos \varphi_1 - \dot{\varphi}_1^2 \sin \varphi_1) - \\ - \frac{l_2}{2} (\ddot{\varphi}_2 \cos \varphi_2 - \dot{\varphi}_2^2 \sin \varphi_2). \quad (7)$$

Поскольку величины φ_1 и φ_2 взаимосвязаны, их начальные значения необходимо предварительно согласовать.

Кинематические характеристики точки C_3 в прямолинейном поступательном движении, при $y_{C3} = b_3$:

$$x_{C3} = l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 + x_{BC3}; \\ y_{C3} = b_3 = l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin \varphi_2 + y_{BC3}; \quad (8)$$

$$\dot{x}_{C3} = -l_1 \dot{\varphi}_1 \sin \varphi_1 - l_2 \dot{\varphi}_2 \sin \varphi_2; \quad (9)$$

$$\ddot{x}_{C3} = -l_1 (\ddot{\varphi}_1 \sin \varphi_1 + \dot{\varphi}_1^2 \cos \varphi_1) - \\ - l_2 (\ddot{\varphi}_2 \sin \varphi_2 + \dot{\varphi}_2^2 \cos \varphi_2). \quad (10)$$

Из (8) получим формулу, связывающую углы φ_1 и φ_2 :

$$\sin \varphi_2 = \frac{1}{l_2} (b_3 - l_1 \sin \varphi_1), \quad (11)$$

тогда:

$$\varphi_2 = \begin{cases} \arcsin \left(\frac{b_3 - l_1 \sin \varphi_1}{l_2} \right), & \text{если } b_3 - l_1 \sin \varphi_1 \geq 0; \\ 2\pi + \arcsin \left(\frac{b_3 - l_1 \sin \varphi_1}{l_2} \right), & \text{если } b_3 - l_1 \sin \varphi_1 < 0. \end{cases} \quad (12)$$

Рассмотрим движение манипулятора-экзоскелета под действием управляемого момента M , момента сопротивления мышечной системы M_C , действующих на звено OA , сил тяжести G_1, G_2, G_3 – бедра, голени и стопы приложенных в соответствующих центрах масс звеньев C_1, C_2, C_3 (рис.3).

Для получения дифференциального уравнения, описывающего движение манипулятора - экзоскелета под действием управляемого момента M , воспользуемся уравнением Лагранжа II рода [8, 13]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i. \quad (13)$$

С учетом сил и моментов сопротивления, действующих на звенья манипулятора, обобщенные силы примут вид [8, 9, 14, 15]:

$$Q_i = \frac{\sum_{i=1}^n F_i \delta q_i}{\delta q_i} - \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} - \frac{\partial \Phi}{\partial q_i}, \quad (14)$$

где T , Π – кинетическая и потенциальная энергии системы; Φ – диссипативная функция Рэлея; $q_i = \varphi_1$ – обобщенная координата:

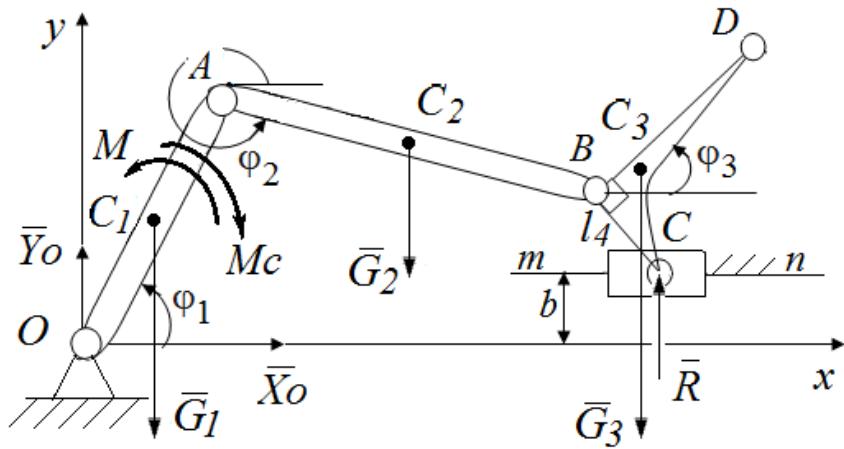


Рис. 3. Расчетная схема манипулятора – экзоскелета: \bar{X}_o , \bar{Y}_o – реакции в шарнире O ; \bar{R} – реакция опорной поверхности

Fig. 3. Calculation scheme of the exoskeleton manipulator: \bar{X}_o , \bar{Y}_o – reactions in the hinge O ; \bar{R} – reaction of the support surface

В предположении отсутствия мышечного тонуса, диссипативная функция Рэлея и ее производная, представляющая собой момент сопротивления M_C , имеют вид:

$$\Phi = \frac{\mu \dot{\phi}_1^2}{2}, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\phi}_1} = \mu \dot{\phi}_1, \quad (15)$$

где μ – реологический параметр, определяющие физико-механические свойства мышечной системы нижних конечностей пациента.

Определив кинетическую и потенциальную энергию и их производные, подставив в уравнение (13) получим дифференциальное уравнение, описывающее движение экзоскелета под действием управляющего момента M :

$$\begin{aligned} J_{10} * \ddot{\phi}_1 - \frac{m_2}{2} l_1 l_2 \ddot{\phi}_2 \cos(\phi_1 + \phi_2) - \\ - \frac{m_2}{2} l_1 l_2 \dot{\phi}_2 (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2) \sin(\phi_1 + \phi_2) = \\ = M - \mu \dot{\phi}_1 - G_1 \frac{l_1}{2} \cos \phi_1 - \\ - G_2 (l_1 \cos \phi_1 - \frac{l_2}{2} \cos \phi_2) = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Определим силы, действующие в тазобедренном шарнире X_o , Y_o и реакцию R опоры в точке C методом Даламбера. Силы инерции, приложенные в точках C_1 , C_2 , B , силы тяжести G_1 , G_2 , G_3 , управляющий момент M и реакция R образуют произвольную плоскую уравновешенную систему сил. Условием равновесия которой являются уравнения [5]:

$$\begin{cases} \sum X_i = X_O + F_{C_1}^x + F_{C_2}^x + F_{C_3}^x = 0; \\ \sum Y_i = Y_O + F_{C_1}^y + F_{C_2}^y + F_{C_3}^y - G_1 - G_2 - G_3 + R = 0; \\ \sum M_{oi} = M + M_O(F_{C_1}) + M_O(F_{C_2}) + M_O(F_{C_3}) + M_O(G_1) + \\ + M_O(G_2) + M_O(G_3) + M_O(R) = 0. \end{cases} \quad (17)$$

Определим силы инерции с учетом ускорений точек C_1 , C_2 , C_3 , определенные в (3), (6), (7), (10):

$$\begin{aligned} F_{C_1}^x &= m_1 \ddot{x}_1 = m_1 \frac{l_1}{2} (\ddot{\phi}_1 \sin \varphi_1 + \dot{\phi}_1^2 \cos \varphi_1); \\ F_{C_2}^x &= m_2 \ddot{x}_2 = m_2 \left[-l_1 (\ddot{\phi}_1 \sin \varphi_1 + \dot{\phi}_1^2 \cos \varphi_1) - \frac{l_2}{2} (\ddot{\phi}_2 \sin \varphi_2 + \dot{\phi}_2^2 \cos \varphi_2) \right]; \end{aligned} \quad (18)$$

$$F_{C_3}^x = m_3 \ddot{x}_3 = m_3 (-l_1 \ddot{\phi}_1 \sin \varphi_1 - l_1 \dot{\phi}_1^2 \cos \varphi_1 - l_2 \dot{\phi}_2 \sin \varphi_2 - l_2 \dot{\phi}_2^2 \cos \varphi_2); \quad (19)$$

$$\begin{aligned} F_{C_1}^y &= m_1 \ddot{y}_1 = m_1 \frac{l_1}{2} (\ddot{\phi}_1 \cos \varphi_1 - (\dot{\phi}_1)^2 \sin \varphi_1); \\ F_{C_2}^y &= m_2 \ddot{y}_2 = m_2 (l_1 \dot{\phi}_1 \cos \varphi_1 - l_1 \dot{\phi}_1^2 \sin \varphi_1 + \frac{l_2}{2} \dot{\phi}_2 \cos \varphi_2 - \frac{l_2}{2} \dot{\phi}_2^2 \sin \varphi_2); \end{aligned} \quad (20)$$

$$F_{C_3}^y = m_3 \ddot{y}_3 = 0.$$

Определим моменты сил инерции относительно точки O :

$$M_O(F_{C_1}) = m_1 \frac{l_1}{2} (\ddot{\phi}_1 \sin \varphi_1 - \dot{\phi}_1^2 \cos \varphi_1) \frac{l_1}{2} \sin \varphi_1 - m_1 \frac{l_1}{2} (\ddot{\phi}_1 \cos \varphi_1 - \dot{\phi}_1^2 \sin \varphi_1) \frac{l_1}{2} \cos \varphi_1; \quad (21)$$

$$\begin{aligned} M_O(F_{C_2}) &= m_2 (-l_1 \dot{\phi}_1 \sin \varphi_1 - l_1 \dot{\phi}_1^2 \cos \varphi_1 - \frac{l_2}{2} \dot{\phi}_2 \sin \varphi_2 - \frac{l_2}{2} \dot{\phi}_2^2 \cos \varphi_2) (l_1 \sin \varphi_1 - \frac{l_2}{2} \sin \varphi_2) + \\ &+ m_2 (l_1 \ddot{\phi}_1 \cos \varphi_1 - l_1 \dot{\phi}_1^2 \sin \varphi_1 + \frac{l_2}{2} \ddot{\phi}_2 \cos \varphi_2 - \frac{l_2}{2} \dot{\phi}_2^2 \sin \varphi_2) (l_1 \cos \varphi_1 + \frac{l_2}{2} \cos \varphi_2); \end{aligned} \quad (22)$$

$$M_O(F_{C_3}) = m_3 (-l_1 \dot{\phi}_1 \sin \varphi_1 - l_1 \dot{\phi}_1^2 \cos \varphi_1 - l_2 \dot{\phi}_2 \sin \varphi_2 - l_2 \dot{\phi}_2^2 \cos \varphi_2) b. \quad (23)$$

Подставим полученные выражения в уравнения (17):

$$\begin{aligned} \sum X_i &= X_O + m_1 \frac{l_1}{2} (\ddot{\phi}_1 \sin \varphi_1 - \dot{\phi}_1^2 \cos \varphi_1) + m_2 (-l_1 \dot{\phi}_1 \sin \varphi_1 - l_1 \dot{\phi}_1^2 \cos \varphi_1 - \frac{l_2}{2} \dot{\phi}_2 \sin \varphi_2 - \\ &- \frac{l_2}{2} \dot{\phi}_2^2 \cos \varphi_2) + m_3 (-l_1 \dot{\phi}_1 \sin \varphi_1 - l_1 \dot{\phi}_1^2 \cos \varphi_1 - l_2 \dot{\phi}_2 \sin \varphi_2 - l_2 \dot{\phi}_2^2 \cos \varphi_2) = 0; \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \sum Y_i &= Y_O + m_1 \frac{l_1}{2} (\ddot{\phi}_1 \cos \varphi_1 - \dot{\phi}_1^2 \sin \varphi_1) + m_2 (l_1 \dot{\phi}_1 \cos \varphi_1 - l_1 \dot{\phi}_1^2 \sin \varphi_1 + \\ &+ \frac{l_2}{2} \ddot{\phi}_2 \cos \varphi_2 - \frac{l_2}{2} \dot{\phi}_2^2 \sin \varphi_2) - G_1 - G_2 - G_3 + R = 0. \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \sum M_{oi} &= M + m_1 \frac{l_1}{2} (\ddot{\phi}_1 \sin \varphi_1 - \dot{\phi}_1^2 \cos \varphi_1) \frac{l_1}{2} \sin \varphi_1 - \\ &- m_1 \frac{l_1}{2} (\ddot{\phi}_1 \cos \varphi_1 - \dot{\phi}_1^2 \sin \varphi_1) \frac{l_1}{2} \cos \varphi_1 + m_2 (-l_1 \dot{\phi}_1 \sin \varphi_1 - l_1 \dot{\phi}_1^2 \cos \varphi_1 - \\ &- \frac{l_2}{2} \dot{\phi}_2 \sin \varphi_2 - \frac{l_2}{2} \dot{\phi}_2^2 \cos \varphi_2) (l_1 \sin \varphi_1 - \frac{l_2}{2} \sin \varphi_2) + m_2 (l_1 \dot{\phi}_1 \cos \varphi_1 - \\ &- l_1 \dot{\phi}_1^2 \sin \varphi_1 + \frac{l_2}{2} \ddot{\phi}_2 \cos \varphi_2 - \frac{l_2}{2} \dot{\phi}_2^2 \sin \varphi_2) (l_1 \cos \varphi_1 + \frac{l_2}{2} \cos \varphi_2) + \\ &+ m_3 (-l_1 \dot{\phi}_1 \sin \varphi_1 - l_1 \dot{\phi}_1^2 \cos \varphi_1 - l_2 \dot{\phi}_2 \sin \varphi_2 - l_2 \dot{\phi}_2^2 \cos \varphi_2) b + M_o(G_1) + \\ &+ M_o(G_2) + M_o(G_3) + M_o(R) = 0. \end{aligned} \quad (26)$$

Результаты и их обсуждение

Математическая модель, представленная в виде уравнений (24) – (26) является виртуальным двойником экзоскелета и позволяет решать две задачи: 1 – по заданному закону изменения управляющего момента $M(t)$, определяем закон изменения угла поворота $\varphi_1(t)$; 2 – синтез параметров электроприводов манипулятора, по заданным законам изменения обобщенных координат $\varphi_1(t)$ рассчитываем момент $M(t)$.

Получив выражение $M(t)$, можно определить зависимость мощности электропривода в шарнире O манипулятора от времени.

$$P_1(t) = M(t) \dot{\varphi}_1(t).$$

Максимальное значение мощности найдем исходя из условий:

$$\frac{\partial}{\partial t} P_1(t_0) = 0; \quad \frac{\partial^2}{\partial t^2} P_1(t_0) \geq 0.$$

Значение $t = t_0$ соответствует максимуму функции $P_1(t)$.

Определив максимальные значения мощностей, можно подобрать электродвигатели, и определить токи, которые обеспечат данные моменты.

Графики зависимости требуемой механической мощности P_1 и управляющего момента M от времени t в тазобедренном шарнире приведены на рис. 4. Для $M(t) = mt; t \in [0, T]; m = 3; T = 2$.

В результате моделирования получим зависимости углов поворота тазобедренного шарнира φ_1 и голеностопного φ_2 от времени, а также их скоростей

$\dot{\varphi}_1(t), \dot{\varphi}_2(t)$ и ускорений $\ddot{\varphi}_1(t), \ddot{\varphi}_2(t)$ для различных физико-механических свойств мышечной системы пациента μ (рис. 5, 6).

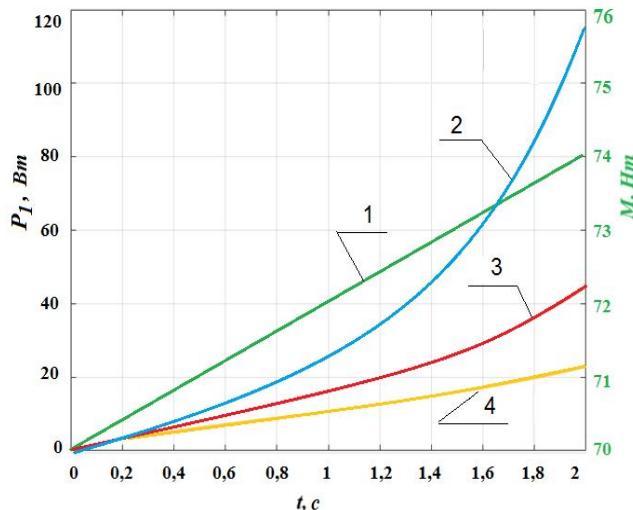


Рис. 4. Графики зависимостей:

1 – управляющего момента M и 2-4 требуемой механической мощности P_1 , от времени t в тазобедренном шарнире для различных значений реологического параметра мышц μ :
2 – $\mu=0$; 3 – $\mu=25$; 4 – $\mu=50$

Fig. 4. Dependency graphs: 1 – the control torque M and 2-4 of the required mechanical power P_1 from the time t in the hip joint for different values of the rheological parameter of the muscles μ :
2 – $\mu=0$; 3 – $\mu=25$; 4 – $\mu=50$

На основании полученных данных рис. 5, 6 рассмотрим изменение конфигурации экзоскелета при выполнении упражнений (рис. 7).

На графиках рис. 7 видно, что угол φ_1 не превышает 75° , что соответствует наложенным на испытуемого ограничениям. Следовательно, экзоскелет выполняет движения под действием заданного момента $M(t)$, не превышая диапазон углов поворота звеньев, ограниченных анатомическими особенностями человека.

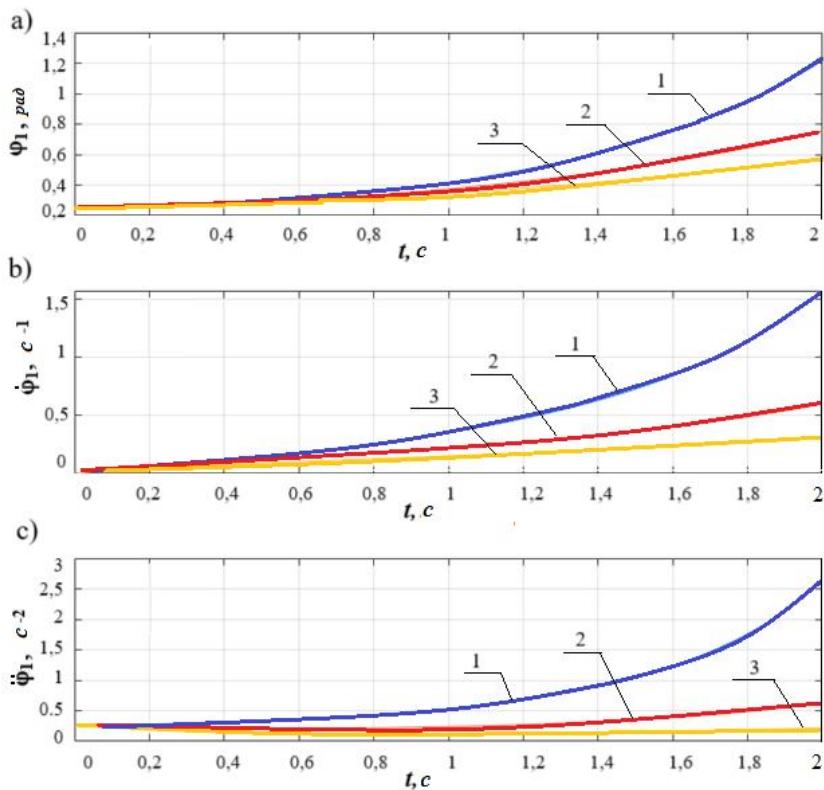


Рис. 5. Графики изменения: **a** – φ_1 ; **b** – $\dot{\varphi}_1$; **c** – $\ddot{\varphi}_1$ от времени t для **1** – $\mu=0$; **2** – $\mu=25$; **3** – $\mu=50$

Fig. 5. Graphs of changes: **a** – φ_1 ; **b** – $\dot{\varphi}_1$; **c** – $\ddot{\varphi}_1$ from time t for **1** – $\mu=0$; **2** – $\mu=25$; **3** – $\mu=50$

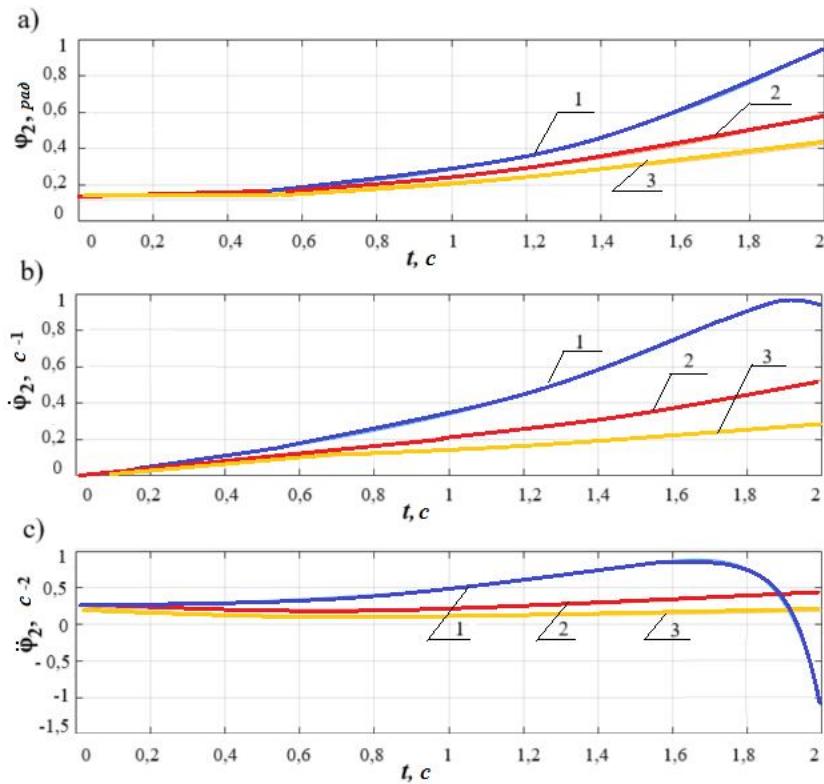


Рис. 6. Графики изменения: **a** – φ_2 ; **b** – $\dot{\varphi}_2$; **c** – $\ddot{\varphi}_2$ от времени t для **1** – $\mu=0$; **2** – $\mu=25$; **3** – $\mu=50$

Fig. 6. Graphs of changes: **a** – φ_2 ; **b** – $\dot{\varphi}_2$; **c** – $\ddot{\varphi}_2$ from time t for **1** – $\mu=0$; **2** – $\mu=25$; **3** – $\mu=50$

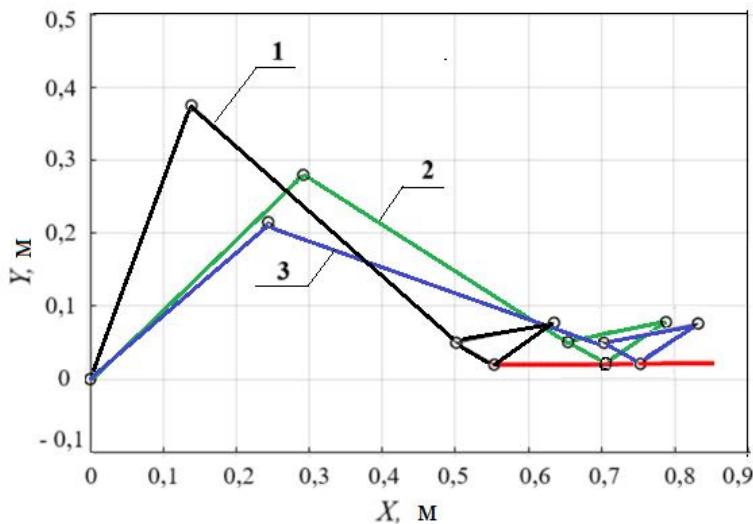


Рис. 7. График изменения конфигурации экзоскелета при: **1** – $\mu=0$; **2** – $\mu=25$; **3** – $\mu=50$

Fig. 7. Graph of changes in the configuration of the exoskeleton at: **1** – $\mu=0$; **2** – $\mu=25$; **3** – $\mu=50$

Наблюдается существенная зависимость характера движения (объем движений в суставах) от параметра μ , определяющего момент сопротивления мышечной системы. Исследование влияния реологического параметра μ , на величину

реакций X_0 , Y_0 , действующих в тазобедренном суставе, и реакции R показывает значительное уменьшение этих реакций с ростом μ , связанных с падением объема движений в конечности (рис. 8).

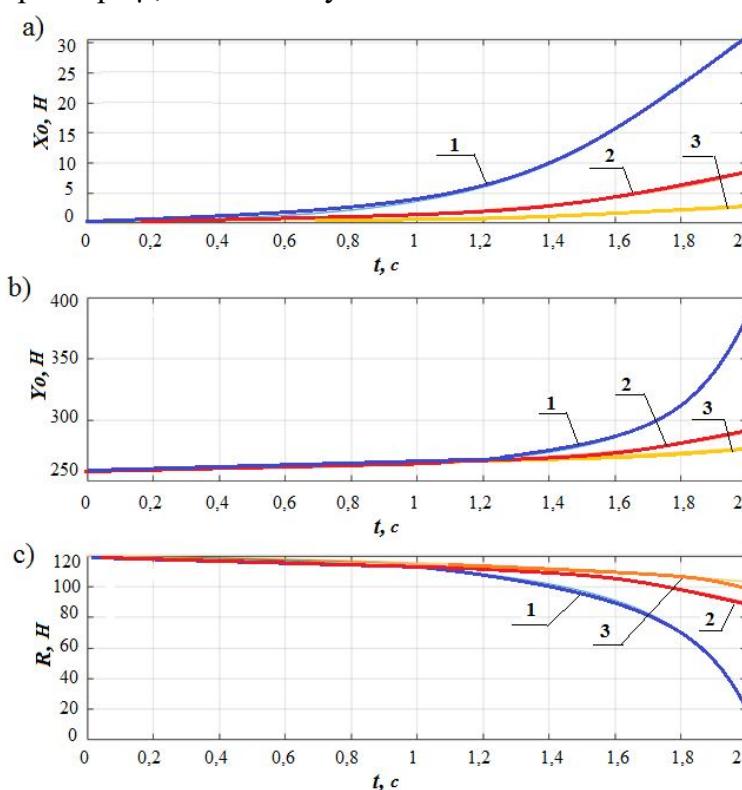


Рис. 8. Графики изменения реакций: **a** – X_0 ; **b** – Y_0 ; **c** – R от времени t для **1** – $\mu=0$; **2** – $\mu=25$; **3** – $\mu=50$

Fig. 8. Graphs of reaction changes: **a** – X_0 ; **b** – Y_0 ; **c** – R from time t for **1** – $\mu=0$; **2** – $\mu=25$; **3** – $\mu=50$

Выводы

1. Проведенный анализ технических решений реабилитационного тренажерно-обучающего комплекса для реабилитации пациентов с нарушениями функций нижних конечностей показал, что применение существующих линейных приводных систем приводит к появлению значительных силовых воздействий в тазобедренном суставе, что снижает эффективность процесса реабилитации.

2. Разработана структура реабилитационного аппарата в виде плоского экзоскелета, оснащенного двумя приводами, один из которых совмещен с осью тазобедренного сустава человека. Такая схема позволяет скомпенсировать влияние активных и реактивных сил, действующих на тазобедренный сустав человека при выполнении медицинских манипуляций.

3. Разработана математическая модель реабилитационного экзоскелета, отличающаяся от известных тем, что наряду с учетом кинематических и динамических особенностей движения звеньев реабилитационного устройства, учитываются параметры, характеризующие взаимодействие экзоскелета и человека, что позволяет определять реакции в тазобедренном шарнире и синтезировать параметры системы управления с учетом внешних возмущающих воздействий.

Установлено, что при линейном изменении управляющего момента происходит нелинейное изменение угловой скорости движения и как следствие снижение потребляемой мощности электропривода тазобедренного шарнира.

Список литературы

1. Knyazev A. A., Yatsun A. S., Fedorov A. V. Information systems of the device for active-passive mechanotherapy of the ankle joint // International Journal of Open Information Technologies. 2023. Vol. 11, № 4. P. 47-54.
2. Bonato P., Reinkensmeyer D., Manto M. Two decades of breakthroughs: charting the future of NeuroEngineering and Rehabilitation // Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation. 2025. Vol. 22, № 1. P. 1-2. <https://doi.org/10.1186/s12984-025-01580-5>.
3. Shi D. et al. A review on lower limb rehabilitation exoskeleton robots // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2019. Vol. 32, № 1. P. 1-11. <https://doi.org/10.1186/s10033-019-0389-8>.
4. Sanchez-Manchola M. et al. Development of a robotic lower-limb exoskeleton for gait rehabilitation: AGoRA exoskeleton // 2018 IEEE ANDESCON. – IEEE, 2018. P. 1-6. DOI: 10.1109/ANDESCON.2018.8564692.

5. Different profiles of upper limb function in four types of neuromuscular disorders / A. Bergsma, M. M. Janssen, A. C. Geurts, E. H. Cup, I. J.. de Groot // Neuromuscular disorders. 2017. Vol. 27(12). P. 1115-1122. <https://doi.org/10.1016/j.nmd.2017.09.003>
6. The assistive gait devices and their implementation in activities of daily living for patients with neuromuscular disease: A systematic review and meta-analysis / M. Mijic, C. Wirner-Piotrowski, A. Jung, K. Gutschmidt, M. Arndt, N. García-Angarita, ... B. Schoser // Journal of Neuromuscular Diseases. 2024. P. 22143602241289216. DOI: 10.1177/22143602241289216
7. Павловский М. А., Акинфеева Л. Ю., Бойчук О. Ф. Теоретическая механика. Динамика. Киев: Выща шк., 1990. 480 с.
8. Safarov D. I., Tistsov E. D., Yatsun S. F. Simulation of interaction between a person and a rehabilitation exoskeleton // International Journal of Open Information Technologies. 2024. Vol. 12, №. 4. P. 108-115. DOI: 10.25559/INJOIT.2307-8162.12.202404.108-115.
9. Emelyanova O., Tistsov E., Jatsun S. Automation Control of the Movement of Robotic Device for Patient Positioning // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE, 2024. P. 537-542. DOI: 10.1109/RusAutoCon61949.2024.10693953.
10. Jatsun S., Emelyanova O., Fursov G. Modeling of Controlled Motion of a Rehabilitation Exoskeleton for the Lower Extremities // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2025. P. 682-687. DOI: 10.1109/ICIEAM65163.2025.11028542.
11. The effectiveness of wearable upper limb assistive devices in degenerative neuromuscular diseases: A systematic review and meta-analysis / M. Gandolla, A. Antonietti, V. Longatelli, A. Pedrocchi // Frontiers in bioengineering and biotechnology. 2020. Vol. 7. P. 450. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00450>.
12. Muramatsu H., Katsura S. Repetitive motion-reproduction based on a motion-copying system for automation of human motions // 2017 56th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE). IEEE, 2017. P. 1443-1446. DOI: 10.23919/SICE.2017.8105611.
13. Miura K., Matsui A., Katsura S. Synthesis of motion-reproduction systems based on motion-copying system considering control stiffness // IEEE/ASME Transactions On Mechatronics. 2015. Vol. 21, № 2. P. 1015-1023. DOI: 10.1109/TMECH.2015.2478897.
14. Monitoring contact behavior during assisted walking with a lower limb exoskeleton / X. Wan, Y. Liu, Y. Akiyama, Y. Yamada // IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering. 2020. Vol. 28, no. 4. P. 869-877. DOI: 10.1109/TNSRE.2020.2979986.
15. Bembli S., Haddad N. K., Belghith S. Computer aided decision model to control an exoskeleton-upper limb system // International conference on advanced systems and emergent technologies (IC_ASET). IEEE. Hammamet, Tunisia, 2019. P. 166-172. DOI: 10.1109/ASET.2019.8871010.

References

1. Knyazev A. A., Yatsun A. S., Fedorov A. V. Information systems of the device for active-passive mechanotherapy of the ankle joint. *International Journal of Open Information Technologies*. 2023; 11(4): 47-54.
2. Bonato P., Reinkensmeyer D., Manto M. Two decades of breakthroughs: charting the future of NeuroEngineering and Rehabilitation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2025; 22(1): 1-2. <https://doi.org/10.1186/s12984-025-01580-5>.
3. Shi D., et al. A review on lower limb rehabilitation exoskeleton robots. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2019; 32(1): 1-11. <https://doi.org/10.1186/s10033-019-0389-8>.
4. Sanchez-Manchola M., et al. Development of a robotic lower-limb exoskeleton for gait rehabilitation: AGoRA exoskeleton. *2018 IEEE ANDESCON*. IEEE, 2018. P. 1-6. DOI: 10.1109/ANDESCON.2018.8564692.
5. Bergsma, A., Janssen, M. M., Geurts, A. C., Cup, E. H., & de Groot, I. J.. Different profiles of upper limb function in four types of neuromuscular disorders. *Neuromuscular disorders*. 2017; 27(12): 1115-1122.<https://doi.org/10.1016/j.nmd.2017.09.003>
6. Mijic M., Wirner-Piotrowski C., Jung A., Gutschmidt K., Arndt M., García-Angarita N., ... & Schoser B. The assistive gait devices and their implementation in activities of daily living for patients with neuromuscular disease: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Neuromuscular Diseases*. 2024; 22143602241289216. DOI: 10.1177/22143602241289216
7. Pavlovsky M. A., Akinfieva L. Yu., Boychuk O. F. Theoretical mechanics. Dynamics. Kiev, 1990. 480 p. (In Russ.).
8. Safarov D. I., Tistsov E. D., Yatsun S. F. Simulation of interaction between a person and a rehabilitation exoskeleton. *International Journal of Open Information Technologies*. 2024; 12(4): 108-115. DOI: 10.25559/INJOIT.2307-8162.12.202404.108-115.
9. Emelyanova O., Tistsov E., Jatsun S. Automation Control of the Movement of Robotic Device for Patient Positioning. *International Russian Automation Conference (RusAuto-Con)*. IEEE. 2024. P. 537-542. DOI: 10.1109/RusAutoCon61949.2024.10693953.
10. Jatsun S., Emelyanova O., Fursov G. Modeling of Controlled Motion of a Rehabilitation Exoskeleton for the Lower Extremities. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. IEEE.2025. P. 682-687. DOI: 10.1109/ICIEAM65163.2025.11028542
11. Gandolla, M., Antonietti, A., Longatelli, V., & Pedrocchi, A.. The effectiveness of wearable upper limb assistive devices in degenerative neuromuscular diseases: A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*. 2020; 7: 450. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00450> .
12. Muramatsu H., Katsura S. Repetitive motion-reproduction based on a motion-copying system for automation of human motions. *2017 56th Annual Conference of the Soci-*

ety of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE). IEEE, 2017. P. 1443-1446. DOI: 10.23919/SICE.2017.8105611.

13. Miura K., Matsui A., Katsura S. Synthesis of motion-reproduction systems based on motion-copying system considering control stiffness. *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*. 2015. 21(2): 1015-1023. DOI: 10.1109/TMECH.2015.2478897.

14. Wan X., Liu Y., Akiyama Y., Yamada Y. Monitoring contact behavior during assisted walking with a lower limb exoskeleton. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering*. 2020. 28(4): 869-877. DOI: 10.1109/TNSRE.2020.2979986.

15. Bembli, S., Haddad, N. K., Belghith, S. Computer aided decision model to control an exoskeleton-upper limb system .*International conference on advanced systems and emergent technologies (IC_ASET)*. IEEE. Hammamet, Tunisia, 2019. P. 166-172. DOI: 10.1109/ASET.2019.8871010.

Информация об авторах / Information about the Authors

Яцун Сергей Фёдорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой мехатроники, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7420-0772>

Емельянова Оксана Викторовна, кандидат технических наук, доцент, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: oks-emelyanova@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6067-3114>

Савельева Екатерина Владимировна, преподаватель, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5993-3791>

Фурсов Гавриил Анатольевич, студент, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: from.skveki1@mail.ru

Sergey F. Yatsun, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7420-0772>

Oksana V. Emelyanova, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: oks-emelyanova@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6067-3114>

Ekaterina V. Saveleva, Lecturer, Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: katyasavelkursk@yandex.ru

Gavriil A. Fursov, Student, Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: from.skveki1@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 961

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-26-36>**Исследование заготовок нового сплава на основе порошков, полученных электроэррозионным диспергированием****Е.В. Агеев¹ , Б.Н. Сабельников¹**

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

e-mail: ageev_ev@mail.ru

Резюме

Цель работы. Изучение микроструктуры экспериментальных заготовок новых безвольфрамовых твердых сплавов.

Методы. Экспериментальный твердросплавный порошковый материал (шихту) сплавляли методом синтеза материалов путем импульсного плазменного сплавления, позволяющего получать высококачественные компактные изделия из металлических порошков и композитов с минимальными потерями материала и энергии (SPS – Spark Plasma Sintering). Метод основан на воздействии электрического тока высокого напряжения и импульсивного характера на металлические частицы, находящиеся внутри пресс-формы. Этот процесс сопровождается образованием высокотемпературной плазмы, возникающей непосредственно вокруг каждой отдельной металлической частицы. Плазма вызывает быстрое локальное повышение температуры и давления, что способствует интенсивному диффузионному взаимодействию частиц и образованию плотных структурированных изделий. Микроструктура сплава была исследована на растровом электронном микроскопе QUANTA 600 FEG.

Результаты. Сплав имеет сложную микроструктуру, состоящую из различных фаз и включений. 1. Фаза карбida титана (TiC): крупные зерна, которые представляют собой карбид титана (TiC), имеют правильную форму и распределены равномерно по всему объему сплава; карбид титана является важной составляющей сплава, так как он обеспечивает высокую твердость и износостойкость. 2. Матрица сплава: между зернами карбида титана расположена матрица сплава, которая, состоит из никеля (Ni) и молибдена (Mo). Эта матрица обеспечивает пластичность и прочность сплава; матрица имеет зернистую морфологию, что указывает на наличие мелких зерен, которые являются результатом термообработки в процессе импульсного плазменного сплавления. 3. Дефекты и дислокации: имеются мелкие дефекты и дислокации, особенно вблизи границ раздела фаз. Эти дефекты могут способствовать формированию дополнительного резервуара прочности и устойчивости к усталостным разрушениям.

Заключение. Исследование микроструктуры нового безвольфрамового твердого сплава показало, что сплав имеет сложную двухфазную структуру, состоящую из карбида титана и матрицы, обогащенной никелем и молибденом. Такая структура обеспечивает сплаву высокую твердость, износостойкость и прочность. Наличие дефектов и дислокаций может способствовать улучшению механических свойств сплава. Эти результаты подтверждают перспективность разработки новых безвольфрамовых твердых сплавов, которые могут стать альтернативой традиционным материалам, содержащим дорогостоящий вольфрам.

Ключевые слова: безвольфрамовые твердые сплавы; электроэррозионное диспергирование; шихта; Spark Plasma Sintering; микроструктура; импульсное плазменное сплавление.

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

Финансирование: Работа выполнена в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» проекта «Приоритет 2030».

Для цитирования: Агеев Е.В., Сабельников Б.Н. Исследование заготовок нового сплава на основе порошков, полученных электроэррозионным диспергированием // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(3): 26-36. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-26-36>.

Поступила в редакцию 23.05.2025

Подписана в печать 18.06.2025

Опубликована 30.09.2025

Investigation of gas dynamic coatings based on electroerosive aluminum powders

Evgeny V. Ageev¹✉, Boris N. Sabelnikov¹

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

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Abstract

Purpose of research. Study of the microstructure of experimental blanks of new tungsten-free hard alloys.

Methods. The experimental solid-alloy powder material (charge) was fused by the method of material synthesis by pulsed plasma fusion, which makes it possible to obtain high-quality compact products from metal powders and composites with minimal material and energy losses (SPS - Spark Plasma Sintering). The method is based on the effect of high voltage and impulsive electric current on metal particles inside the mold. This process is accompanied by the formation of a high-temperature plasma that occurs directly around each individual metal particle. Plasma causes a rapid local increase in temperature and pressure, which contributes to the intense diffusion interaction of particles and the formation of dense structured products. The microstructure of the alloy was studied using a QUANTA 600 FEG scanning electron microscope.

Results. The alloy has a complex microstructure consisting of various phases and inclusions. 1. Titanium Carbide (TiC) phase: large grains, which are titanium carbide (TiC), have a straight shape and are evenly distributed throughout the entire volume of the alloy; Titanium carbide is an important component of the alloy, as it provides high hardness and wear resistance. 2. Alloy matrix: an alloy matrix is located between the grains of titanium carbide, which consists of nickel (Ni) and molybdenum (Mo). This matrix ensures the ductility and strength of the alloy; The matrix has a granular morphology, which indicates the presence of small grains, which are the result of heat treatment during pulsed plasma fusion. 3. Defects and dislocations: There are minor defects and dislocations, especially near the interface. These defects can contribute to the formation of an additional reservoir of strength and resistance to fatigue damage.

Conclusion. A study of the microstructure of a new tungsten-free hard alloy has shown that the alloy has a complex two-phase structure consisting of titanium carbide and a matrix enriched in nickel and molybdenum. This structure provides the alloy with high hardness, wear resistance and durability. The presence of defects and dislocations can help improve the mechanical properties of the alloy. These results confirm the prospects of developing new tungsten-free hard alloys that can become an alternative to traditional materials containing expensive tungsten.

Keywords: tungsten-free hard alloys; electroerosion dispersion; charge; Spark Plasma Sintering; microstructure; pulsed plasma fusion.

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

Funding: The work was carried out as part of the implementation of the development program of the South-Western State University under the «Priority 2030» project.

For citation. Ageev E. V., Sabelnikov B. N. Investigation of gas dynamic coatings based on electroerosive aluminum powders. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University.* 2025; 29(3): 26-36 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-26-36>.

Received 23.05.2025

Accepted 18.06.2025

Published 30.09.2025

Введение

Твёрдые сплавы представляют собой группу материалов, отличающихся повышенной твердостью, износостойкостью и прочностью. Они состоят преимущественно из карбидов вольфрама WC, карбидов (карбонитридов) титана TiC (TiCN) и кобальта Со либо никеля Ni, молибдена Mo и хрома Cr, соединённых методом порошковой металлургии.

Основные свойства твёрдых сплавов:

- высокая прочность и устойчивость к истиранию;
- способность выдерживать высокие температуры и механические нагрузки;
- хорошее сопротивление коррозии и химическому воздействию агрессивных сред.

Благодаря этим свойствам область применения твёрдых сплавов достаточно обширна. Твердые сплавы нашли широкое применение в строительных технологиях благодаря своим уникальным свойствам. Вот некоторые области их использования:

1. Инструментальная оснастка.

– **Фрезы:** Твердый сплав используется для изготовления фрез, применяемых при обработке древесины, бетона и камня. Это позволяет увеличить срок

службы инструмента и повысить качество обработки поверхности.

– **Долото и буровые коронки:** Карбидные вставки применяются в долоте и коронках для пробивания скважин, тоннелей и глубоких шахт. Их высокая твёрдость обеспечивает высокую производительность и долговечность оборудования.

– **Строгальные ножи:** Ножи из твёрдых сплавов используются для строгания древесины и металла, обеспечивая гладкую поверхность и долгий срок эксплуатации.

2. Абрзивные инструменты.

Абрзивы на основе карбидов применяют в шлифовании поверхностей различных материалов. Например, в камнеобработке и изготовлении деталей высокой точности.

3. Металлоконструкции.

Твердосплавные покрытия наносятся на металлоконструкции, работающие в условиях повышенных нагрузок и температур. Это увеличивает стойкость к износу и повышает общую надежность конструкций.

4. Направляющие рельсы и колеса эскалаторов.

Для повышения долговечности направляющих элементов эскалаторов ис-

пользуют напыление твердых сплавов на рабочие поверхности колес и рельсов. Это снижает износ и продлевает срок службы механизмов.

5. Конвейеры и транспортеры.

Покрытие конвейерных лент и роликов твёрдым сплавом уменьшает трение и предотвращает повреждения от абразивных частиц, увеличивая срок службы всей системы транспортировки грузов.

Таким образом, твердые сплавы играют важную роль в повышении эффективности и надежности технологий и инструментов, способствуя улучшению качества работ и снижению затрат на эксплуатацию и ремонт оборудования.

Целью исследования является изучение микроструктуры экспериментальных

заготовок новых безвольфрамовых твердых сплавов.

Материалы и методы

Экспериментальный твердосплавный порошковый материал (шихту) сплавляли методом синтеза материалов путем импульсного плазменного сплавления, позволяющего получать высококачественные компактные изделия из металлических порошков и композитов с минимальными потерями материала и энергии (SPS – Spark Plasma Sintering). Схема сплавления экспериментального твердосплавного порошкового материала плазменно-искровым методом представлена на рис. 1.

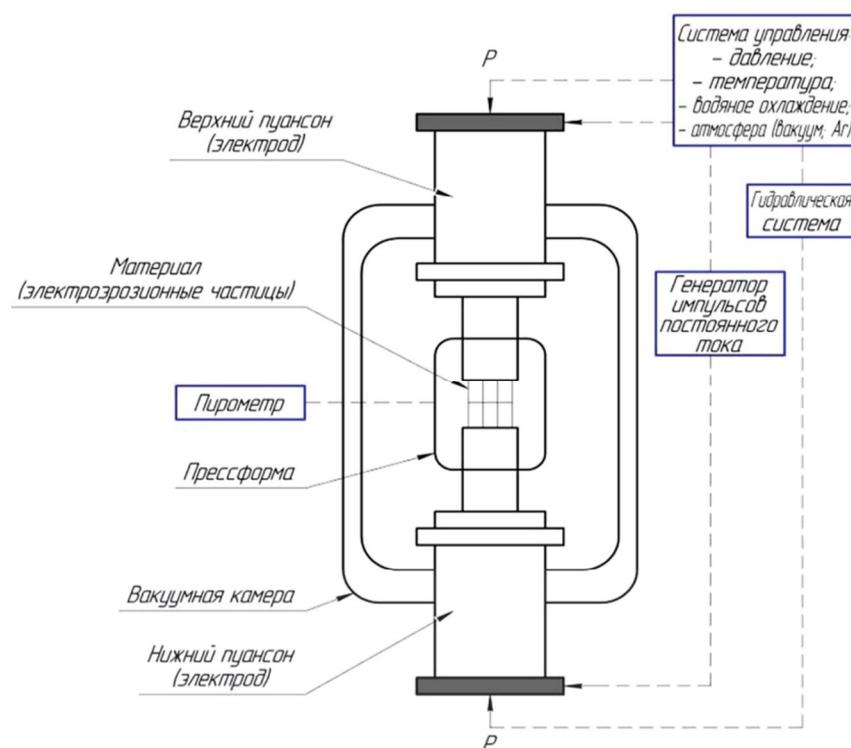


Рис. 1. Схема сплавления электроэррозионного безвольфрамового твердосплавного порошкового материала плазменно-искровым методом

Fig. 1. Scheme of sintering of electroerosive tungsten-free carbide powder material by plasma-spark method

Метод основан на воздействии электрического тока высокого напряжения и импульсивного характера на металлические частицы, находящиеся внутри пресс-формы. Этот процесс сопровождается образованием высокотемпературной плазмы, возникающей непосредственно вокруг каждой отдельной металлической частицы. Плазма вызывает быстрое локальное повышение температуры и давления, что способствует интенсивному диффузионному взаимодействию частиц и образованию плотных структурированных изделий.

Основные этапы процесса SPS включают:

1. Подготовка порошка исходного состава.
2. Заполнение пресс-формы порошком.
3. Обжатие порошка приложением внешнего давления.

4. Импульсное воздействие электрическим током.

5. Охлаждение полученного образца.

Благодаря своей универсальности и высоким эксплуатационным характеристикам, SPS синтез становится всё более востребованным в промышленности и научных исследованиях.

Микроструктура сплава была исследована на растровом электронном микроскопе QUANTA 600 FEG (рис. 2).

Растровый электронный микроскоп (РЭМ) QUANTA 600 FEG представляет собой современное устройство, предназначенное для исследования микроструктуры и элементного анализа образцов различной природы. Этот прибор сочетает высокую разрешающую способность с возможностью детального изучения химического состава исследуемых объектов.

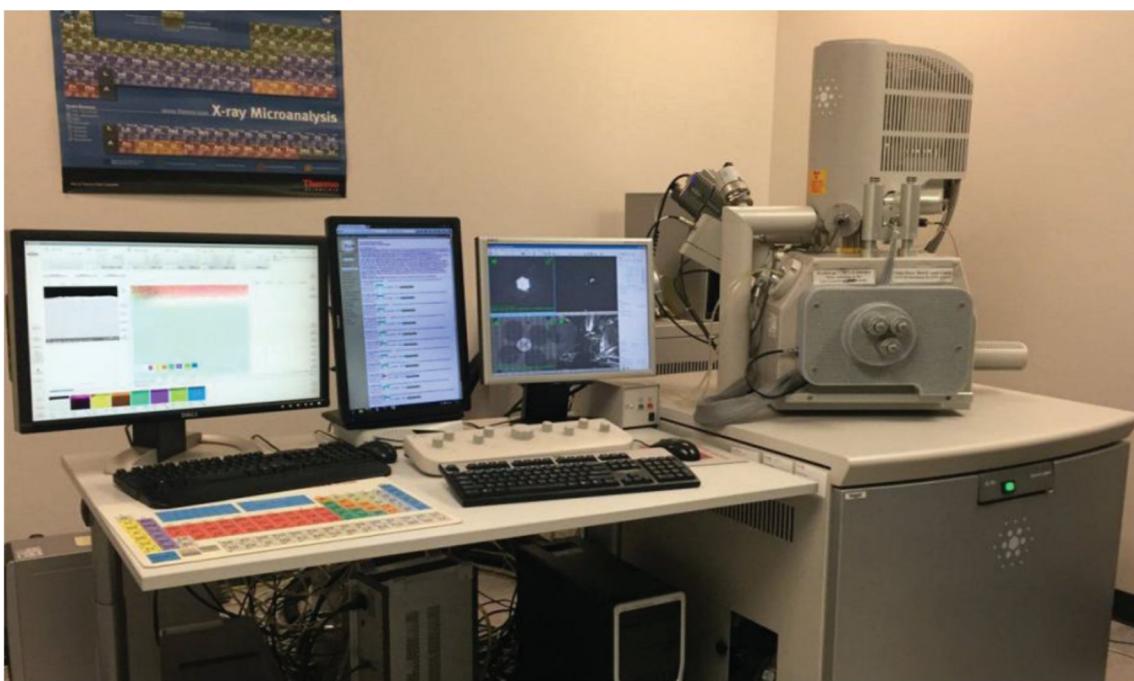


Рис. 2. Электронный сканирующий микроскоп Quanta 600 FEG

Fig. 2. A scanning Quanta 600 FEG electron microscope

QUANTA 600 FEG оснащен полевым эмиссионным катодом (Field Emission Gun – FEG), обеспечивающим чрезвычайно стабильный поток электронов с низким уровнем шума и высокой степенью фокусировки пучка. Благодаря этому достигается высокое разрешение изображений вплоть до уровня атомарного масштаба.

Принцип работы прибора заключается в следующем:

1. Образец помещается внутрь вакуумной камеры микроскопа.
2. Электронный луч направляется на образец и сканирует его поверхность, формируя двумерное изображение.
3. Вторичные электроны, возникающие вследствие взаимодействия первичного электронного потока с поверхностью образца, регистрируются специальными датчиками.

4. Изображение строится путём измерения интенсивности вторичных электронов в каждом пикселе кадра.

Дополнительные возможности РЭМ QUANTA 600 FEG позволяют проводить энергетический дисперсионный спектральный анализ (EDS), рентгеновский микроанализ (WDS), фазовый контраст и трехмерную визуализацию структуры образцов.

Элементный состав сплава был исследован на энергодисперсионном анализаторе рентгеновского излучения фирмы EDAX (рис. 2).

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 представлены результаты исследования микроструктуры образца.

На изображении видно, что сплав имеет сложную микроструктуру, состоящую из различных фаз и включений.

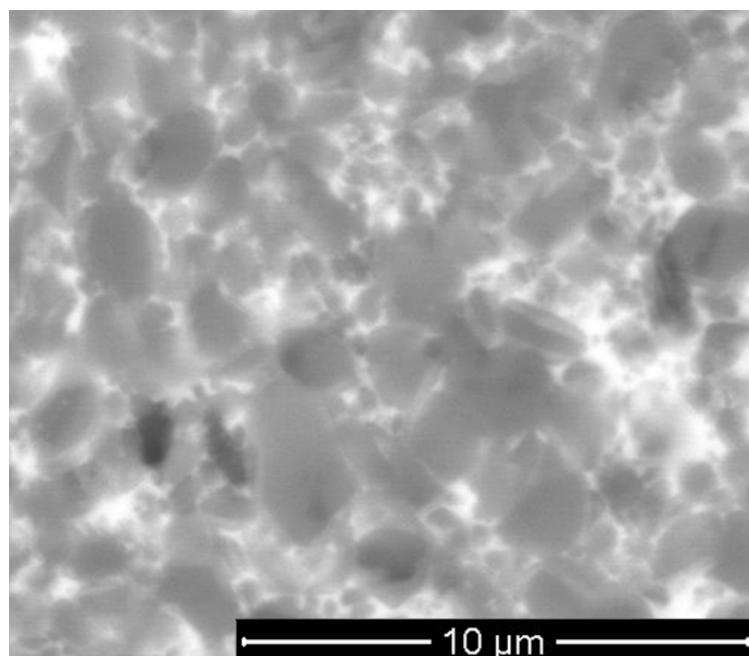


Рис. 3. Микроструктура нового безвольфрамового экспериментального твердого сплава

Fig. 3. Microstructure of a new experimental tungsten-free hard alloy

1. Фаза карбида титана (TiC):

- На изображении видны крупные зерна, которые, представляют собой карбид титана (TiC). Эти зерна имеют неправильную форму и распределены равномерно по всему объему сплава.
- Карбид титана является важной составляющей сплава, так как он обеспечивает высокую твердость и износостойкость.

2. Матрица сплава:

- Между зернами карбида титана расположена матрица сплава, которая, состоит из никеля (Ni) и молибдена (Mo). Эта матрица обеспечивает пластичность и прочность сплава.
- Матрица имеет зернистую морфологию, что указывает на наличие мелких зерен, которые являются результатом термообработки в процессе импульсного плазменного сплавления.

3. Дефекты и дислокации:

- На изображении также видны мелкие дефекты и дислокации, особенно вбли-

зи границ раздела фаз. Эти дефекты могут способствовать формированию дополнительного резервуара прочности и устойчивости к усталостным разрушениям.

Выводы

Исследование микроструктуры нового бевольфрамового твердого сплава показало, что сплав имеет сложную двухфазную структуру, состоящую из карбида титана и матрицы, обогащенной никелем и молибденом. Такая структура обеспечивает сплаву высокую твердость, износостойкость и прочность. Наличие дефектов и дислокаций может способствовать улучшению механических свойств сплава. Эти результаты подтверждают перспективность разработки новых бевольфрамовых твердых сплавов, которые могут стать альтернативой традиционным материалам, содержащим дорогостоящий вольфрам.

Список литературы

1. Агеев Е.В., Семенихин Б.А., Латыпов Р.А. Исследование микротвердости порошков, полученных электроэррозионным диспергированием твердого сплава // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агронженерный университет имени В.П. Горячкина". 2011. № 1 (46). С. 78-80.
2. Разработка и исследование твердосплавных изделий из порошков, полученных электроэррозионным диспергированием вольфрамсодержащих отходов / Р.А. Латыпов, Г.Р. Латыпова, Е.В. Агеев, А.А. Давыдов // Международный научный журнал. 2013. № 2. С. 107-112.
3. Свойства порошков из отходов твердых сплавов ВК8 и Т15К6, полученных методом электроэррозионного диспергирования / Р.А. Латыпов, А.Б. Коростелев, Е.В. Агеев, Б.А. Семенихин // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2010. № 7. С. 2-6.

4. Агеева Е.В., Хорьякова Н.М., Агеев Е.В. Исследование формы и морфологии электроэрозионных медных порошков, полученных из отходов // Вестник машиностроения. 2014. № 8. С. 73-75.

5. Properties of the coatings fabricated by plasma-jet hard-facing by dispersed mechanical engineering wastes / R.A. Latypov, G.R. Latypova., E.V. Ageev, A.Y. Altukhov, E.V. Ageeva // Russian metallurgy (Metally). 2018. Т. 2018, № 6. С. 573-575.

6. Исследование гранулометрического состава порошков, полученных электроэрозионным диспергированием твердого сплава и используемых при восстановлении и упрочнении деталей автотракторной техники / Е.В. Агеев, В.Н. Гадалов, В.И. Серебровский, Б.А. Семенихин, Е.В. Агеева, Р.А. Латыпов, Ю.П. Гнездилова // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2010. № 4. С. 76-79.

7. Новиков Е.П., Агеева Е.В., Чумак-Жунь Д.А. Изучение формы и морфологии порошка, полученного из отходов алюминия методом электроэрозионного диспергирования // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2015. № 4 (17). С. 13-17.

8. Агеева Е.В., Агеев Е.В., Карпенко В.Ю. Изучение формы и элементного состава порошка, полученного из вольфрамсодержащих отходов инструментальных материалов электроэрозионным диспергированием в водной среде // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 4 (112). С. 14-17.

9. X-ray analysis of the powder of micro- and nanometer fractions, obtained from wastes of alloy T15K6 in aqueous medium / E.V. Ageeva, E.V. Ageev, S.V. Pikalov, E.A. Vorobiev, A.N. Novikov // Журнал нано- и электронной физики. 2015. Т. 7, № 4. С. 04058.

10. Агеева Е.В., Хорьякова Н.М., Агеев Е.В. Морфология и элементный состав медных электроэрозионных порошков, пригодных к спеканию // Вестник машиностроения. 2014. № 10. С. 66-68.

11. Исследование алюминиевого порошка, полученного методом электроэрозионного диспергирования в дистиллированной воде / Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, Е.П. Новиков // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2016. № 4. С. 19-22.

12. Хорьякова Н.М., Агеев Е.В., Агеева Е.В. Электроэрозионные медные порошки для гальванических покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 4 (112). С. 18-20.

13. Агеев Е.В., Агеева Е.В., Воробьев Е.А. Гранулометрический и фазовый составы порошка, полученного из вольфрамсодержащих отходов инструментальных материалов электроэрозионным диспергированием в керосине // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 4 (112). С. 11-14.

14. Оценка износостойкости электроискровых покрытий, полученных с использованием электроэрозионных порошков быстрорежущей стали / Е.В. Агеева, Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев, А.Ю. Алтухов, В.Ю. Карпенко // Известия высших учебных заведений. Порошковая металургия и функциональные покрытия. 2015. № 1. С. 71-76.

15. Быстрорежущая сталь, диспергированная в керосине / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, Е.А. Воробьев, М.А. Зубарев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2014. № 5 (56). С. 21-25.
16. Агеева Е.В., Королев М.С. Получение порошкового материала из свинцово-сурьмянистой пластины кислотного аккумулятора // Современные материалы, техника и технологии. 2021. № 1 (34). С. 4-12.
17. Агеева Е.В., Игнатенко Н.М., Хардиков С.В. Исследование производительности процесса ээд при получении порошкового материала из отходов стали X13 // Современные материалы, техника и технологии. 2021. № 3 (36). С. 4-9.
18. Агеева Е.В., Хардиков С.В., Агеева А.Е. Структура и свойства спеченных образцов из электроэррозионных хромсодержащих порошков, полученных в бутиловом спирте // Современные материалы, техника и технологии. 2021. № 6 (39). С. 4-11.
19. Хардиков С.В., Агеева Е.В., Агеева А.Е. Анализ характеристик износостойкости спеченных изделий из электроэррозионного порошка стали X13, полученного в бутиловом спирте // Современные материалы, техника и технологии. 2021. № 6 (39). С. 58-64.
20. Порошковая шарикоподшипниковая сталь, полученная диспергированием в керосине / Е.В. Агеева, А.Г. Ивахненко, В.В. Куц, С.В. Хардиков // Современные материалы, техника и технологии. 2017. № 5 (13). С. 10-15.

References

1. Ageev E.V., Semenikhin B.A., Latypov R.A. Investigation of the microhardness of powders obtained by electroerosion dispersion of a hard alloy. *Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya "Moskovskii gosudarstvennyi agroinzhenernyi universitet imeni V.P. Goryachkina" = Bulletin of the Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Goryachkin Moscow State Agroengineering University".* 2011; (1): 78-80. (In Russ.).
2. Latypov R.A., Latypova G.R., Ageev E.V., Davydov A.A. Development and research of carbide products from powders obtained by electroerosion dispersion of tungsten-containing waste. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal = International Scientific Journal.* 2013; (2): 107-112. (In Russ.).
3. Latypov R.A., Korostelev A.B., Ageev E.V., Semenikhin B.A. Properties of powders from waste of hard alloys VK8 and T15K6 obtained by electroerosion dispersion. *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik = All materials. An encyclopedic reference book.* 2010; (7): 2-6. (In Russ.).
4. Ageeva E.V., Khoryakova N.M., Ageev E.V. Investigation of the shape and morphology of electroerosive copper powders obtained from waste. *Vestnik mashino-stroeniya = Bulletin of Mechanical Engineering.* 2014; (8): 73-75. (In Russ.).

5. Latypov R.A., Latypova G.R., Ageev E.V., Altukhov A.Y., Ageeva E.V. Properties of the coatings fabricated by plasma-jet hard-facing by dispersed mechanical engineering wastes. *Russian metallurgy (Metally)*. 2018; 2018(6): 573-575. (In Russ.).
6. Ageev E.V., Gadalov V.N., Serebrovsky V.I., Semenikhin B.A., Ageeva E.V., Latypov R.A., Gnezdilova Yu.P. Investigation of the granulometric composition of powders obtained by electroerosion dispersion of a hard alloy and used in the restoration and hardening of parts of automotive equipment. *Vestnik Kurskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii = Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy*. 2010; (4): 76-79. (In Russ.).
7. Novikov E.P., Ageeva E.V., Chumak-Zhun D.A. Study of the shape and morphology of powder obtained from aluminum waste by electroerosion dispersion. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2015; (4): 13-17. (In Russ.).
8. Ageeva E.V., Ageev E.V., Karpenko V.Yu. Study of the shape and elemental composition of powder obtained from tungsten-containing waste of tool materials by electroerosion dispersion in an aqueous medium. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Hardening technologies and coatings*. 2014; (4): 14-17. (In Russ.).
9. Ageeva E.V., Ageev E.V., Pikalov S.V., Vorobiev E.A., Novikov A.N. X-ray analysis of the powder of micro- and nanometer fractions, obtained from wastes of alloy T15K6 in aqueous medium. *Zhurnal nano- i elektronnoi fiziki = Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2015; 7(4): 04058. (In Russ.).
10. Ageeva E.V., Khoryakova N.M., Ageev E.V. Morphology and elemental composition of copper electroerosion powders suitable for sintering. *Vestnik mashinostroeniya = Bulletin of Mechanical Engineering*. 2014; (10): 66-68. (In Russ.).
11. Latypov R.A., Ageev E.V., Ageeva E.V., Novikov E.P. Investigation of aluminum powder obtained by electroerosion dispersion in distilled water. *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik = All materials. An encyclopedic reference book*. 2016; (4): 19-22. (In Russ.).
12. Khoryakova N.M., Ageev E.V., Ageeva E.V. Electroerosive copper powders for electroplating. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Hardening technologies and coatings*. 2014; (4): 18-20. (In Russ.).
13. Ageev E.V., Ageeva E.V., Vorobyev E.A. Granulometric and phase compositions of powder obtained from tungsten-containing waste of tool materials by electroerosion dispersion in kerosene. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Hardening technologies and coatings*. 2014; (4): 11-14. (In Russ.).
14. Ageeva E.V., Latypov R.A., Ageev E.V., Altukhov A.Yu., Karpenko V.Yu. Assessment of the wear resistance of electric spark coatings obtained using electroerosive powders of high-speed steel. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya = Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Powder metallurgy and functional coatings*. 2015; (1): 71-76. (In Russ.).

15. Ageeva E.V., Ageev E.V., Vorobyov E.A., Zubarev M.A. High-speed steel dispersed in kerosene. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University.* 2014; (5): 21-25. (In Russ.).
16. Ageeva E.V., Korolev M.S. Obtaining powder material from a lead-antimony plate of an acid battery. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, machinery and technologies.* 2021; (1): 4-12. (In Russ.).
17. Ageeva E.V., Ignatenko N.M., Hardikov S.V. Investigation of the performance of the EDM process in the production of powder material from waste steel X13. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, machinery and technologies.* 2021; (3): 4-9. (In Russ.).
18. Ageeva E.V., Hardikov S.V., Ageeva A.E. Structure and properties of sintered samples from electroerosive chromium-containing powders obtained in butyl alcohol. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, machinery and technologies,* 2021; (6): 4-11. (In Russ.).
19. Hardikov S.V., Ageeva E.V., Ageeva A.E. Analysis of wear resistance characteristics of sintered products made of electroerosion powder of steel X13 obtained in butyl alcohol. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, machinery and technologies.* 2021; (6): 58-64. (In Russ.).
20. Ageeva E.V., Ivakhnenko A.G., Kutz V.V., Hardikov S.V. Powdered ball bearing steel obtained by dispersion in kerosene. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, machinery and technologies.* 2017; (5): 10-15. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

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: <https://orcid.org/0000-0002-3862-8624>, SPIN-код: 7007-6649

Сабельников Борис Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sabelnikovboris1@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8819-699X>, SPIN-код: 4016-6781

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: <https://orcid.org/0000-0002-3862-8624>, SPIN-код: 7007-6649

Boris N. Sabelnikov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Industrial and Civil Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sabelnikovboris1@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8819-699X>, SPIN-code: 4016-6781

СТРОИТЕЛЬСТВО

CONSTRUCTION

Оригинальная статья / Original article

УДК 624.072.21

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-37-55>



Оптимизированная консольная конструкция с применением текстильно-армированного бетона для климатических условий юга России

Н.О. Борисов¹ О.Н. Столяров¹

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
ул. Политехническая, д. 29, г. Санкт-Петербург 195251, Российская Федерация

e-mail: borisov.n@edu.spbstu.ru

Резюме

Цель исследования. Целью данного исследования является анализ конструктивных возможностей и ограничений применения текстильно-армированного бетона (ТАБ) в кровельных системах спортивных сооружений, с особым вниманием к консольной конструкции крыши стадиона, адаптированной под климатические условия Сочи.

Методы. В исследовании используется расчетная модель консольной кровельной конструкции, выполненной из ТАБ, с геометрией консольного выноса 22,735 м и общей шириной 84,4 м. Для анализа применяются численные методы с использованием конечно-элементной модели в ANSYS. Рассматриваются нагрузки, включая снеговые и ветровые, с соответствующими нормативами для Сочи. В ходе расчётов исследуются различные варианты толщины покрытия и длины консольного выноса.

Результаты. Результаты расчётов показывают, что применение ТАБ значительно улучшает жесткость конструкции, снижая вертикальные перемещения консоли на 30–35% по сравнению с традиционным армоконкретом. Также, при уменьшении толщины покрытия до 200 мм, сохраняется достаточная жесткость конструкции, что позволяет уменьшить материалоёмкость. В результате удлинение консольного выноса на 3–4 м возможно без превышения предельных значений прогибов.

Заключение. Исследование показало, что использование ТАБ для кровельных конструкций спортивных сооружений позволяет добиться значительных улучшений в жесткости и материалоёмкости, обеспечивая возможность увеличения пролётов или сокращения толщины покрытия без потери эксплуатационных характеристик. Это открывает новые возможности для проектирования лёгких и эффективных конструкций в условиях южных регионов России.

Ключевые слова: текстильно-армированный бетон; консольная конструкция; кровельные системы; прогиб консоли; материалоёмкость.

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

© Борисов Н.О., Столяров О.Н., 2025

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2025; 29(3): 37-55

Для цитирования: Борисов Н.О., Столяров О.Н. Оптимизированная консольная конструкция с применением текстильно-армированного бетона для климатических условий юга России // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(3): 37-55. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-37-55>.

Поступила в редакцию 22.05.2025

Подписана в печать 15.07.2025

Опубликована 30.09.2025

Optimized cantilever structure using textile-reinforced concrete for the climatic conditions of southern Russia

Nikita O. Borisov¹ , Oleg N. Stolyarov¹

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29, Polytechnicheskaya str., St. Petersburg 195251, Russian Federation

 e-mail: borisov.n@edu.spbstu.ru

Abstract

Purpose of research. The aim of this study is to analyze the structural capabilities and limitations of using textile-reinforced concrete (TRC) in roofing systems for sports facilities, with particular focus on a stadium roof cantilever structure designed for the climatic conditions of Sochi.

Methods. The study uses a computational model of a cantilever roofing structure made of TRC, with a cantilever length of 22.735 m and a total width of 84.4 m. Numerical methods with finite element modeling in ANSYS are employed. Loads, including snow and wind, are applied based on the regulatory standards for Sochi. Different scenarios of cover thickness and cantilever length variations are analyzed.

Results. The results show that TRC significantly enhances the stiffness of the structure, reducing vertical displacements of the cantilever by 30-35% compared to traditional reinforced cement. Furthermore, reducing the cover thickness to 200 mm maintains sufficient stiffness, leading to material savings. Extending the cantilever by 3-4 meters is feasible without exceeding the allowable deflection limits.

Conclusion. The study demonstrates that the use of TRC in roofing structures for sports facilities leads to significant improvements in stiffness and material efficiency, allowing for either increased spans or reduced cover thickness without compromising performance. This presents new opportunities for the design of lightweight and efficient structures in the southern regions of Russia.

Keywords: textile-reinforced concrete; cantilever structure; roofing systems; console deflection; material efficiency.

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

For citation: Borisov N. O., Stolyarov O. N. Optimized cantilever structure using textile-reinforced concrete for the climatic conditions of southern Russia. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(3): 37-55 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-37-55>.

Received 22.05.2025

Accepted 15.07.2025

Published 30.09.2025

Введение

Текстильно-армированный бетон (ТАБ) продолжает привлекать внимание исследователей благодаря своей легкости, вы-

сокой прочности и устойчивости к агрессивным воздействиям. Его использование позволяет значительно улучшить сейсмическую устойчивость конструк-

ций, как показали эксперименты с кирпичными стенами [1]. Применение инновационных методов производства, таких как экструзия с решетчатыми структурами, позволяет существенно сократить массу конструкций [2]. ТАБ эффективно улучшает несущую способность кирпичных конструкций, увеличивая их жесткость и сопротивление нагрузкам [3]. В исследованиях колонн установлено, что увеличение количества слоев текстильной арматуры значительно повышает их прочность и деформационную устойчивость [4]. В условиях сложных нагрузок, таких как растяжение и изгиб, материал сохраняет свою конструктивную целостность [5].

Численные модели показывают, что взаимодействие между текстилем и бетонной матрицей играет ключевую роль в передаче напряжений [6]. Исследования композитных балок подтверждают, что использование ТАБ позволяет повысить гибкость и прочность конструкций [7]. Анализ поверхности между слоями бетона и арматуры также выявляет возможности повышения несущей способности [8]. Особое внимание уделяется устойчивости ТАБ к огневым воздействиям и термомеханическим нагрузкам, что критично для обеспечения безопасности конструкций [9]. Экспериментальные исследования показывают эффективность материала при высокоскоростных ударных воздействиях [10]. ТАБ активно применяется для спортивных сооружений благодаря своей способности уменьшить массу конструкций и улуч-

шить их долговечность [11]. Применение углеродных и базальтовых текстильных сеток позволяет улучшить механические свойства и снизить риск разрушений [12, 13].

Численные исследования показывают, что ТАБ сохраняет прочность даже при значительном удлинении консольных элементов [14]. Оптимизация формы и толщины текстильной арматуры позволяет добиться высоких прочностных характеристик [2, 15]. Исследования огибающих конструкций и адаптивных систем на основе текстильных материалов подтверждают их потенциал для архитектурных решений [16]. Применение ТАБ также актуально для временных и сборных конструкций [17]. Особое внимание уделяется анализу вибрационных характеристик конструкций и разработке методов их демпфирования [18]. Численные методы продолжают играть важную роль в моделировании конструкций, что позволяет проводить оптимизацию формы и минимизировать массу [19]. Влияние текстильной арматуры на характеристики сцепления и сопротивления разрушению остается важной темой исследований [20]. Кроме того, развитие многослойных конструкций на основе ТАБ позволяет достичь новых уровней прочности и гибкости [21].

Оптимизация параметров текстильной арматуры и анализ различных моделей взаимодействия с бетонной матрицей открывают возможности для проектирования более эффективных конструкций

[22, 23]. Анализ огибающих структур подтверждает их устойчивость при различных нагрузках [24]. Влияние толщины армирующих слоев на прочностные характеристики также остается актуальным направлением исследований [8]. Исследования показывают, что ТАБ обеспечивает высокую устойчивость к изгибным и растягивающим воздействиям [10, 25]. Численные и экспериментальные модели подтверждают его эффективность при проектировании сложных конструктивных систем [26, 27]. ТАБ также демонстрирует устойчивость к динамическим воздействиям и вибрациям, что особенно важно для временных и сборных конструкций [28, 29]. Анализ испытаний [30] уменьшенных прототипов консольного навеса с применением ТАБ показывает верность применяемых конечноэлементных моделей и позволяет перейти к расчётам полноценной конструкции.

Цель исследования: анализ конструктивных возможностей и ограничений применения текстильно-армированного бетона (ТАБ) в кровельных системах спортивных сооружений на примере консольной конструкции крыши стадиона для климатических условий Сочи.

Задачи:

1. Сбор и анализ нагрузок для климатических условий Сочи.
2. Определение возможности сокращения толщины покрытия на основе увеличенной прочности ТАБ по сравнению с армоцементными конструкциями.

3. Анализ конструктивной устойчивости при удлинении выноса консоли с шаговой вариацией длины.

4. Построение графической зависимости прогиба от длины консоли для выявления предельных состояний.

5. Оценка возможности сокращения материала или увеличения покрытия козырька без снижения эксплуатационной надежности конструкции.

Объект исследования: консольная кровля стадиона, выполненная из текстильно-армированного бетона.

Предмет исследования: конструктивные параметры и эксплуатационные характеристики кровли при изменении толщины покрытия и длины выноса консоли.

Актуальность: применение текстильно-армированного бетона открывает новые перспективы для проектирования лёгких и устойчивых конструкций кровель спортивных сооружений. Его высокая прочность и устойчивость к агрессивным средам позволяет снизить материалоёмкость и увеличить площадь покрытия. Данное исследование направлено на поиск наиболее эффективных решений для консольных кровельных конструкций с учётом климатических особенностей южных регионов России.

Материалы и методы

Расчётная модель представляет собой консольную кровельную конструкцию козырька стадиона из текстильно-армированного бетона (ТАБ). Основная геометрия кровли включает длину консольного выноса 22,735 м, общую ши-

рину 84,4 м, разделённую на 16 равных пролётов, а также первоначальную толщину покрытия 300 мм. Конструкция имеет изогнутую форму с усреднённым углом наклона 15°. Жесткость конструкции обеспечивается 17 консольными балками, размещенными между пролётами и работающими совместно с плитой покрытия. Борта и кромки отсутствуют, проектирование носит схематичный характер.

В модели учитывается совместная работа плиты и балок в рамках конечно-элементной схемы, однако жесткое соединение между ними не моделируется – узлы сопряжения не разрабатывались, что обосновано общей концепцией пред-

варительного инженерного анализа и допущением о распределенной совместной работе. Модель имеет симметричную конфигурацию, и на её прикладываются равномерно распределенные нагрузки. Конструкция закреплена жестко с одного конца, противоположный край остаётся свободным – классическая консольная схема.

Расчёты выполняются для варианта конструкции из текстильно-армированного бетона, с сопоставлением результатов с параметрами армоцементной кровли (ферроцемент), принятой как исходный прототип. Используются физико-механические характеристики, представленные в табл. 1.

Таблица 1. Физико-механические характеристики бетонов, принимаемые при расчёте

Table 1. Physical and mechanical characteristics of concrete considered during the calculation

Параметр / Parameter	Армоцемент (исходный вариант) / Reinforced cement (original version)	ТАБ (расчётный вариант) / TRC (calculated version)
Модуль упругости, Е, ГПа	25	35
Средняя плотность, ρ, кг/м ³	2600	2300
Коэффициент Пуассона, ν	0,2	0,2
Прочность на растяжение, МПа	2,5	3,0

В качестве армирующего материала используется сетка из щелочестойкого стекловолокна. Моделирование повреждений и трещинообразования в расчётной модели не проводится, что обусловлено предварительным инженерным характером анализа и отсутствием необходимости в детальной микромеханике разрушения.

Модель реализована в ANSYS, расчёт выполняется в линейной постановке, статический анализ, геометрическая нелинейность не учитывается. Тип конечно-элементов – трёхмерные тетраэдрические объемные элементы. Данный тип элементов обеспечивает возможность корректного описания пространственной геометрии и распределен-

ния напряжений внутри плиты и балок. При расчетах контролируются значения продольных растягивающих напряже-

ний (рис. 1), а также перемещение свободного конца консоли (рис. 2).

Учтённые в расчётной модели виды нагрузок представлены в табл. 2.

Таблица 2. Виды нагрузок

Table 2. Types of loads

Тип нагрузки / Type of loads	Параметр / Parameter	Значение / Value
Снеговая нагрузка	Снеговой район	II
	Нормативная нагрузка, кПа	1,0
Ветровая нагрузка	Ветровой район	III
	Нормативное давление, кПа	0,38
	Коэффициент формы	1,3–2,0
Собств. Вес	Текстильно-армированный бетон, т/м ³	2,3
Доп. Нагрузки	Временные технологические нагрузки, кПа	0,2–0,3

Полная формула для расчета суммарной нагрузки:

$$q_{total} = q_{dead} + q_{snow} \psi_1 + \dots + q_{wind} \psi_2 + q_t \psi_3, \quad (1)$$

где q_{dead} – собственный вес конструкции;

q_{snow} – снеговая нагрузка;

q_{wind} – ветровая нагрузка;

q_t – временные технологические нагрузки (0,3 кПа);

ψ_1, ψ_2, ψ_3 – коэффициенты сочетания (обычно $\psi \in [0,7;1,0]$, по СП).

Основные комбинации нагрузок (СП 20.13330.2016):

1. Основные сочетания:

1.1. Постоянная нагрузка + длительная:

$$q_{total} = q_{dead} + q_{snow}. \quad (2)$$

1.2. Постоянная нагрузка + кратковременная:

$$q_{total} = q_{dead} + q_{wind} + q_t. \quad (3)$$

2. Комбинированное сочетание:

2.1. Постоянная + снег + ветер:

$$q_{total} = q_{dead} + q_{snow} \cdot 0,95 + \dots + q_{wind} + q_t \cdot 0,9. \quad (4)$$

Расчет ветровой нагрузки:

$$q_{wind} = C k(z_e) q_0, \quad (5)$$

где C – аэродинамический коэффициент (0,25–1,6 для навесов с углом наклона 15° в зависимости от направления ветра);

$k(z_e)$ – коэффициент, учитывающий изменение в зависимости от высоты ветрового давления (0,5–0,85 для городской территории, высота от 0 до 20 м);

q_0 – нормативное значение давления ветра (0,38 кПа для Сочи).

Модель используется для выполнения двух серий параметрических расчётов:

1. Уменьшение толщины покрытия – от исходных 300 мм с шагом 50 мм, с целью определения тренда и анализа

возможной материалоемкости и несущей способности конструкции при использовании ТАБ.

2. Удлинение выноса консоли – с шагом 1 м, до момента превышения допустимого вертикального перемещения свободного конца консоли.

Для каждого расчёта фиксируются:

- максимальные вертикальные перемещения конца консоли;

– возникающие напряжения в зоне растяжения (сравнение с пределом в 3,0 МПа);

– расчет эквивалентного распределённого давления, приводящего к тем же прогибам, что и комплексное нагружение, для построения графика зависимости деформации от прикладываемой нагрузки.

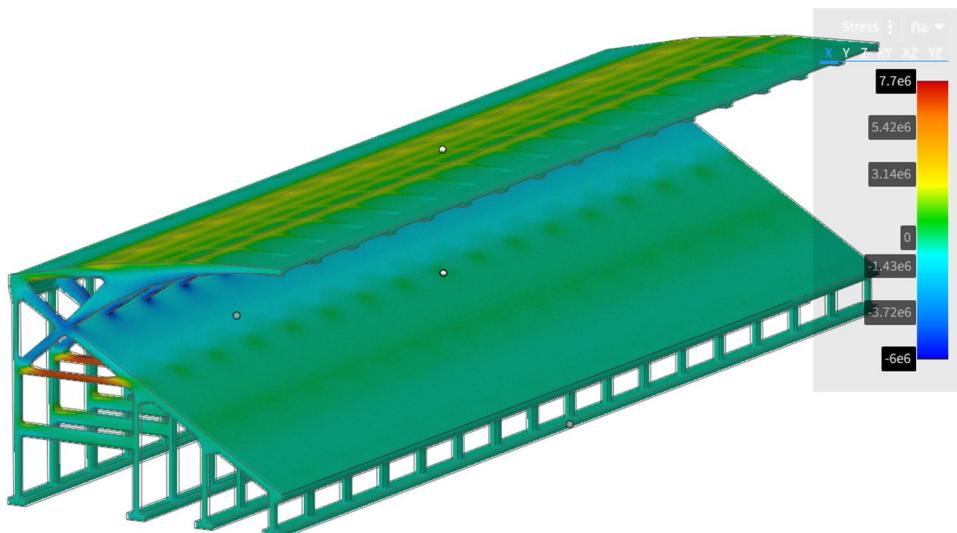


Рис. 1. Модель рассчитываемого покрытия в комплексе ANSYS с отображением распределения напряжений по направлению вдоль консольной конструкции кровли

Fig. 1. Model of the calculated coating in the ANSYS complex with display of stress distribution in the direction along the cantilever roof structure

В целях сопоставимости различных расчётных сценариев нагрузки, возникающие от сочетания постоянных, длительных и кратковременных воздействий были приведены к эквивалентной равномерно распределённой нагрузке. Под эквивалентной нагрузкой в данном случае понимается такое условное распределённое давление по поверхности покрытия, которое вызывает в расчётной модели те же максимальные вертикаль-

ные перемещения (прогибы), что и реальные расчётные сочетания нагрузок. Это позволяет унифицировать подход к анализу и построить обобщённые зависимости деформативности конструкции от геометрических параметров.

Для исходной конструкции из армоконструкции (толщина покрытия 300 мм, длина консольного выноса 22,735 м) получены значения, представленные в табл. 3.

Данные расчёты используются в дальнейшем в качестве референтных значений для анализа конструкций с применением

текстильно-армированного бетона (ТАБ), с различной толщиной покрытия и удлинённым выносом консоли.

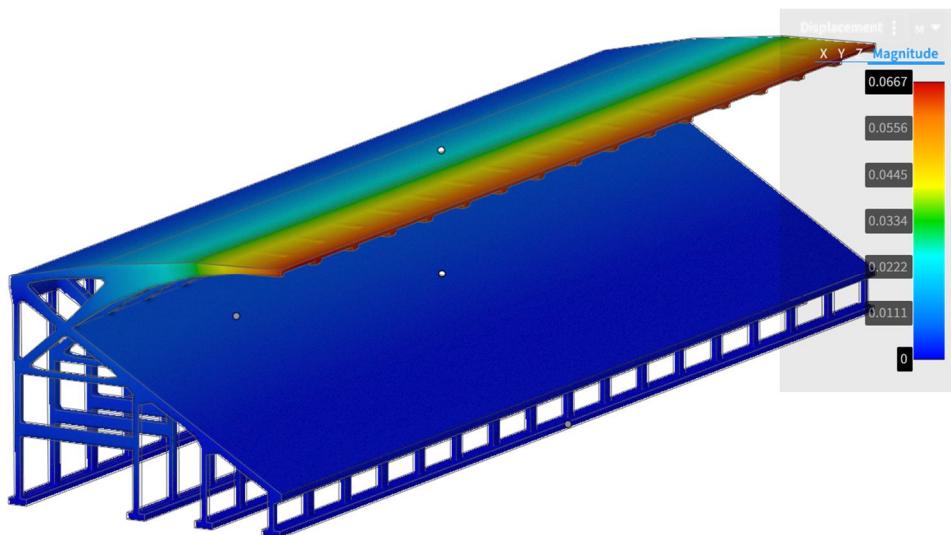


Рис. 2. Модель рассчитываемого покрытия в комплексе ANSYS с отображением распределения вертикальных перемещений

Fig. 2. Model of the calculated coating in the ANSYS complex with display of the distribution of vertical displacements

Таблица 3. Результаты расчёта исходной конструкции

Table 3. Results of calculation of the initial version

Тип загружения / Load type	Эквивалентная нагрузка (МН) / Equivalent load (MN)	Прогиб (мм) / Deflection (mm)
Постоянные и длительные нагрузки	23,79	147,00
Постоянные и кратковременные нагрузки	22,32	138,60
Комбинированная нагрузка	24,37	150,60

Первым этапом анализа стала оценка влияния замены материала конструкции на ТАБ при неизменной геометрии. Результаты, представленные в табл. 4, показали значительное снижение вертикальных перемещений.

Таким образом, даже без изменения толщины покрытия, жесткость конструкции существенно возрастает, позволяя в

далнейшем рассматривать либо снижение материоёмкости, либо увеличение пролётов без ухудшения эксплуатационных характеристик.

На следующем этапе исследовалась возможность увеличения длины консольного выноса при сохранении толщины покрытия 300 мм (ТАБ). Результаты расчётов представлены в табл. 5.

Таблица 4. Сравнение результатов расчетов исходной армоцементной конструкции и варианта с применением текстильно-армированного бетона**Table 4.** Comparison of calculation results for the original reinforced cement structure and the version using textile-reinforced concrete

Тип загружения / Load type	Эквивалентная нагрузка (МН) / Equivalent load (MN)	Прогиб ТАБ (мм) / Deflection TRC (mm)	Прогиб армоцемент (мм) / Deflection reinforced cement (mm)	Разница / Difference (%)
Постоянные и длительные нагрузки	21,20	98,55	147,00	-32,9%
Постоянные и кратковременные нагрузки	19,76	92,25	138,60	-33,5%
Комбинированная нагрузка	21,78	101,25	150,60	-32,8%

Таблица 5. Анализ результатов расчётов консольной конструкции при увеличении длины выноса**Table 5.** Analysis of the calculation results of the cantilever structure with an increase in the extension length

Длина консоли (м) / Console length (m)	Экв. нагрузка (МН) / Equivalent load (MN)	Прогиб (мм) / Deflection (mm)	Предел, мм / Limit, mm	Превышение предела / Exceeding limit
22,735	21,78	101,25	181,88	[]
23,735	22,18	132,75	189,88	[]
24,735	22,28	167,85	197,88	[]
25,735	22,59	208,35	205,88	[X]
26,735	22,63	269,55	213,88	[X]

Как видно, допустимая граница прогиба по предельному состоянию ($2L/250$) начинает превышаться уже при выносе более 25,5–26 м (рис. 3), что определяет предельно допустимую длину консольного выноса конструкции с текущей толщиной покрытия.

Таким образом, при использовании ТАБ возможно увеличить длину консо-

ли L на 3–4 метра по сравнению с исходной системой, без выхода за предельно допустимые значения деформаций $f_U = 2L/250$.

Была также проведена серия расчетов при последовательном уменьшении толщины покрытия до 250 мм и 200 мм при фиксированной длине консоли 22,735 м. Результаты представлены в табл. 6.

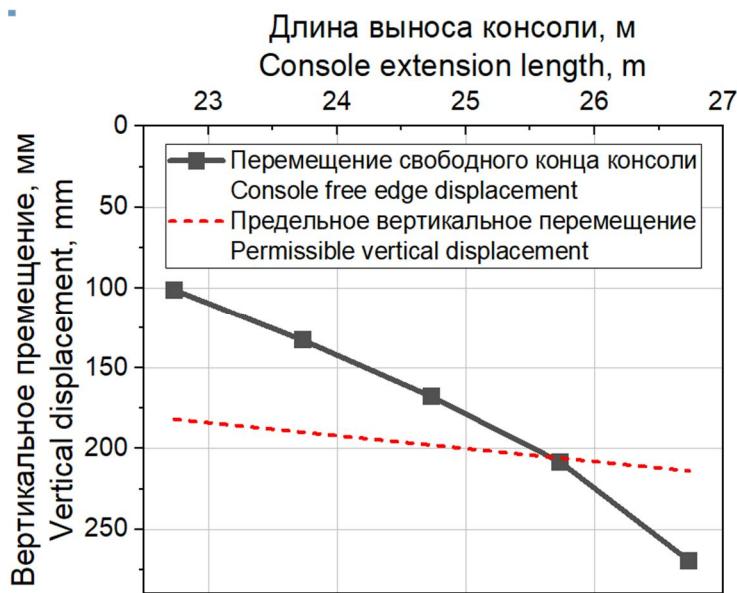


Рис. 3. Прогиб свободного конца консоли при увеличении длины выноса

Fig. 3. Deflection of the console free end with an increase in the extension length

Таблица 6. Результаты расчётов консольной конструкции при уменьшении толщины покрытия

Table 6. Results of cantilever structure calculations with a decrease in the coating thickness

Толщина покрытия (мм) / Coating thickness (mm)	Экв. нагрузка (МН) / Equivalent load (MN)	Прогиб (мм) / Deflection (mm)
300	21,78	101,25
250	19,09	96,30
200	15,16	86,85

Основным результатом стало снижение как нагрузки, так и прогиба при уменьшении толщины. Основная причина – уменьшение собственного веса покрытия, который в рассматриваемой схеме составляет значительную долю от общей нагрузки. Таким образом, жёсткость конструкции остаётся достаточной, а снижение толщины приводит к снижению деформаций. Это подтверждает, что в условиях высокой прочности ТАБ, толщина покрытия определяется в первую очередь не прочностными сооб-

ражениями, а требованиями к долговечности, эксплуатации и защитным слоям.

Результаты и их обсуждение

Полученные расчётные данные позволяют провести комплексное сравнение различных вариантов конструктивной реализации кровельной системы: на основе традиционного армоцемента и современного текстильно-армированного бетона (ТАБ). Результаты анализа продемонстрировали преимущества ТАБ как с точки зрения деформативности, так и потенци-

альной возможности уменьшения материоемкости конструкции или увеличения покрытия консоли.

На рис. 4 представлена зависимость эквивалентной нагрузки от прогиба свободного конца консоли при увеличении длины выноса. Для сопоставления на графике также показаны результаты

расчётов для армоцемента и исходной конструкции из ТАБ.

Из графика (рис. 4) видно, что при одинаковом уровне прогибов на конструкцию из армоцемента воздействует существенно большая эквивалентная нагрузка, что отражает более низкую жёсткость материала.

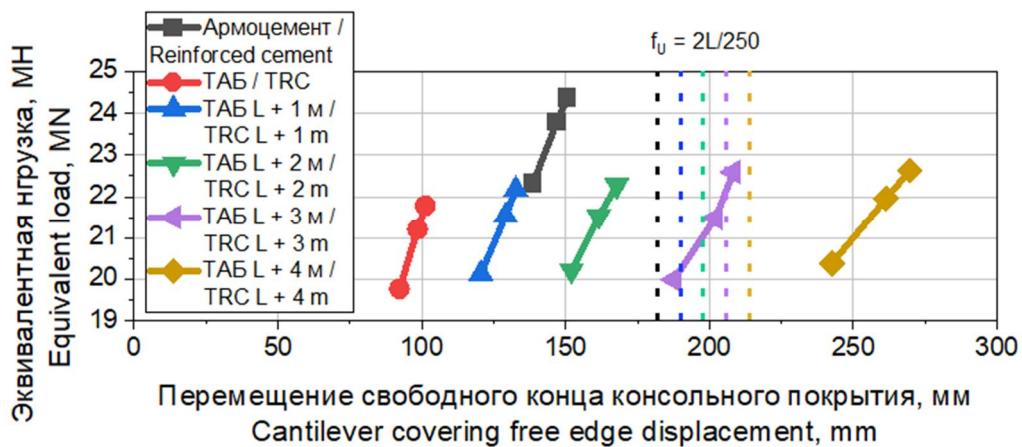


Рис. 4. Зависимость эквивалентной вертикальной силы от перемещения края консольной конструкции при удлинении выноса консоли

Fig. 4. Dependence of the equivalent vertical force on the displacement of the cantilever structure edge with an increase in the cantilever overhang

В то же время конструкция из ТАБ способна выдерживать аналогичное воздействие с меньшим прогибом либо допускать увеличение длины выноса без превышения предельных деформаций. Граница допустимого прогиба по условию $2L/250$ обозначена на графике пунктирной линией. Видно, что при длине консоли более 25,7 м (удлинение на 3 м или на 13%) происходит её пересечение.

Таким образом, ТАБ обеспечивает возможность увеличения покрытия без ущерба для эксплуатационной надёжности, что критически важно в архитектуре крупных спортивных и общественных объектов.

На рис. 5 приведена зависимость эквивалентной нагрузки от прогиба при поэтапном снижении толщины покрытия. Аналогично первому случаю, результаты армоцементной конструкции включены для сравнения.

Характерной особенностью здесь является то, что при снижении толщины покрытия наблюдается не увеличение, а наоборот, уменьшение прогиба. Анализ показывает, что это вызвано уменьшением собственного веса покрытия, составляющего основную часть общей нагрузки при заданных геометрических параметрах.

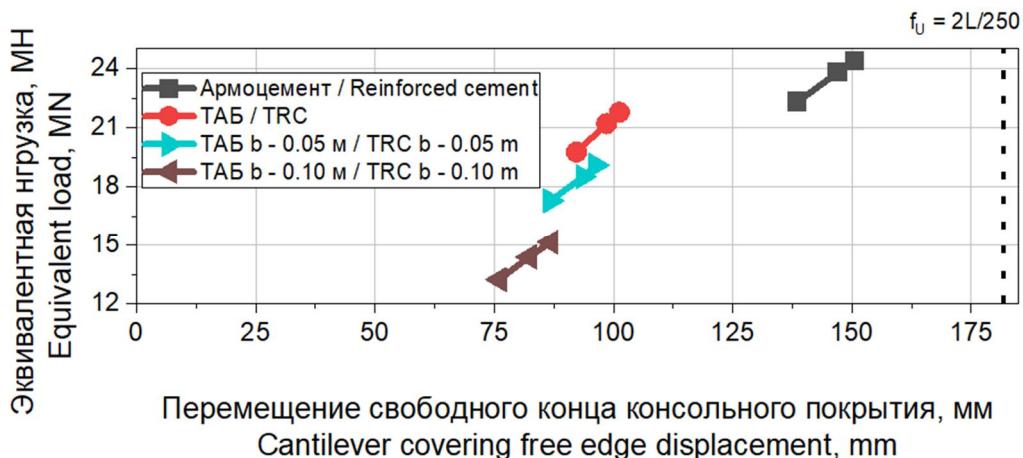


Рис. 5. Зависимость эквивалентной вертикальной силы от перемещения края консольной конструкции при уменьшении поперечного сечения

Fig. 5. Dependence of the equivalent vertical force on the displacement of the cantilever structure edge with a decrease in the cross-section thickness

Таким образом, в рассматриваемой схеме толщина покрытия при использовании ТАБ определяется не предельными состояниями по деформациям или прочности, а скорее требованиями к защитным слоям, долговечности или конструктивной технологии. Это открывает возможности для существенного снижения материалоемкости конструкции без ущерба её несущей способности.

Сравнение вариантов показало, что применение ТАБ приводит к снижению вертикальных перемещений на 30–35% при тех же габаритах, либо позволяет увеличить длину консоли до 3–4 м, оставаясь в пределах допустимых прогибов. При этом эквивалентные нагрузки для достижения аналогичных деформаций существенно ниже, чем в армоцементной конструкции.

Таким образом, ТАБ даёт проектировщику возможность гибкого выбора: либо снижать массу и толщину кон-

струкции, либо увеличивать пролёт при сохранении эксплуатационных характеристик. Это делает материал особенно перспективным для архитектурных решений с большими выносами, изгибами и высокими требованиями к визуальной лёгкости.

Выводы

Проведённое исследование позволило всесторонне оценить конструктивные возможности применения текстильно-армированного бетона (ТАБ) в кровельных системах спортивных сооружений на примере консольной конструкции стадиона, адаптированной под климатические условия Сочи.

На первом этапе был выполнен сбор и анализ нагрузок, характерных для южных регионов России. Установлено, что при расчётах необходимо учитывать снеговые и ветровые воздействия, соответствующие II снеговому и III ветро-

вому районам. Эти данные были приведены к эквивалентной равномерно распределённой нагрузке, что позволило унифицировать подход к моделированию и обеспечить сопоставимость различных сценариев.

Вторым направлением анализа стало определение оптимальной толщины покрытия с учётом повышенной жёсткости и прочности ТАБ по сравнению с армоцементом. Расчёты показали, что даже при толщине 300 мм прогиб конструкции из ТАБ снижается на 30–35% по сравнению с аналогичной конструкцией из армоцемента. Дополнительный анализ показал, что при уменьшении толщины покрытия до 250 мм и даже 200 мм конструкция остаётся в пределах нормативных требований по деформациям. Более того, снижение толщины приводит к уменьшению собственного веса и, как следствие, снижению прогибов, что позволяет оптимизировать конструкцию с точки зрения материоёмкости без ущерба для её эксплуатационной надёжности.

В рамках третьей задачи была проанализирована возможность удлинения консольного выноса. Моделирование показало, что при использовании ТАБ допустимая длина консоли может быть увеличена на 3–4 метра по сравнению с исходной схемой без превышения предельных вертикальных перемещений. При длине выноса до 25,7 м конструкция остаётся в пределах нормативного предела прогиба $f_U = 2L/250$, что свидетельствует о высоком потенциале ТАБ для создания протяжённых, но при этом жёстких кровельных элементов.

Для выявления предельных состояний и анализа эффективности конструктивных решений были построены графические зависимости прогиба и эквивалентной нагрузки от длины выноса и толщины покрытия. На графиках чётко прослеживается тенденция ускоренного роста деформаций при приближении к предельной длине консоли, а также эффект снижения нагрузки при уменьшении толщины покрытия. Это подчёркивает высокую чувствительность консольных конструкций к изменениям геометрии, а также демонстрирует эффективность применения эквивалентной нагрузки в расчётной модели.

Заключительным результатом исследования стала комплексная оценка проектного потенциала ТАБ. Показано, что использование данного материала открывает две стратегические возможности: либо существенное снижение толщины покрытия с уменьшением собственного веса и материоёмкости, либо увеличение длины консольного выноса при сохранении нормативной надёжности конструкции. Это делает ТАБ высокоэффективным решением для современного архитектурного проектирования лёгких, визуально прозрачных и технологичных кровель спортивных сооружений, особенно в условиях климатических нагрузок южных регионов.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение долговечности ТАБ в агрессивных климатических условиях, разработку методов

оценки его качества в процессе эксплуатации, а также исследование воздействия динамических нагрузок, таких как землетрясения или сильные ветры, на

конструкции. Кроме того, стоит рассмотреть оптимизацию производства ТАБ для снижения его стоимости и расширения областей применения.

Список литературы

1. Effects of textile-reinforced concrete on the cyclic shear behavior of damaged confined brick masonry walls / F. Qu, S. Yin, F. Wang, B. Wang // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 78. P. 107717. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107717>.
2. Fabrication of lightweight, carbon textile reinforced concrete components with internally nested lattice structure using 2-layer extrusion by LabMorTex / M. Kalthoff [et al.] // Constr Build Mater. 2023. Vol. 395. P. 132334. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132334>.
3. Jing L., Wang N., Yin S. Shear performance of textile-reinforced concrete (TRC)-strengthened brick masonry walls // Constr Build Mater. 2023. Vol. 397. P. 132401. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132401>.
4. Compressive behaviour of concrete columns confined with textile reinforced concrete composites / Y. Li, S. Yin, Q. Wang, and B. Zhou // Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 96. P. 110587. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110587>.
5. Textile reinforced concrete members subjected to tension, bending, and in-plane loads: Experimental study and numerical analyses / A. Sciegaj, S. Almfeldt, F. Larsson, K. Lundgren // Constr Build Mater. 2023. Vol. 408. P. 133762. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133762>.
6. Numerical model of tensile behavior of textile reinforced concrete (TRC) based on stress field analysis / S. Ye, C. Lu, P. She, Z. Li, T. Xie, C. K. Y. Leung // Constr Build Mater. 2023. Vol. 407. P. 133568. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133568>.
7. Flexural behavior of composite beams with textile reinforced concrete (TRC) permanent formwork considering interface characteristics / C. Wang, S. Yin, Y. Zhao, Y. Li // Journal of Building Engineering. 2025. Vol. 99. P. 111602. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111602>.
8. Priyanga R., Muthadhi A. Bending analysis of textile reinforced concrete sandwich panels: Experimental and numerical evaluation // Constr Build Mater. 2024. Vol. 439. P. 137213. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137213>.
9. Numerical study of thermomechanical behaviour of reinforced concrete beams with and without textile reinforced concrete (TRC) strengthening: Effects of TRC thickness and thermal loading rate / N. Douk, X. H. Vu, A. Si Larbi, M. Audebert, R. Chatelin // Eng Struct. 2021. Vol. 231. P. 111737. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111737>.

10. Esaker M., Thermou G. E., Neves L. Behaviour of Textile Reinforced Concrete panels under high-velocity impact loading // Constr Build Mater. 2024. Vol. 445. P. 137806, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137806>.
11. Immanuel S., Kaliyamoorthy B. Investigating the effect of textile layers on the flexural response of Textile Reinforced Concrete (TRC) panels // Structures. 2025. Vol. 71. P. 108112. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.108112>.
12. Hutaibat M., Ghiassi B., Tizani W. Bond behaviour of prestressed basalt textile reinforced concrete // Constr Build Mater. 2024. Vol. 438. P. 137309. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137309>.
13. Betz P., Marx S., Curbach M. Biaxial compressive capacity of textile-reinforced concrete // Case Studies in Construction Materials. 2024. Vol. 20. P. e02986. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02986>.
14. Kumar D., Ali S. F., Arockiarajan A. Theoretical and experimental studies on large deflection analysis of double corrugated cantilever structures // Int J Solids Struct. 2021. Vol. 228. P. 111126. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2021.111126>.
15. Study on the factors influencing bending spalling failure in BFRP textile-reinforced concrete / X. Zhang, X. Wang, X. Liang, Y. Zhang, Z. Wu // Journal of Building Engineering. 2025. Vol. 99. P. 111468. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111468>.
16. Integrated analysis of kinematic form active structures for architectural applications: Experimental verification / M. Van Craenenbroeck, S. Puystiens, L. De Laet, D. Van Hemelrijck, W. Van Paepengem, and M. Mollaert // Eng Struct. 2016. Vol. 123. P. 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.05.032>.
17. Stability Analysis for Cofferdams of Pile Wall Frame Structures / R. Xue, S. Bie, L. Guo, P. Zhang // KSCE Journal of Civil Engineering. 2019. Vol. 23, no. 9. P. 4010–4021. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-1320-7>.
18. Vibration damping method of cantilever structure considering redundant constraint of monocrystalline blade casting mold shell / X. Huiyu, B. Guangfu, Z. Da, S. Huaitao // Measurement. 2024. Vol. 236. P. 115100. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115100>.
19. Ma S., Chen M., Skelton R. E. Design of a new tensegrity cantilever structure // Compos Struct. 2020. Vol. 243. P. 112188. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112188>.
20. Thermal conductivity of nano- and micro-crystalline diamond films studied by photothermal excitation of cantilever structures / L. Saturday [et al.] // Diam Relat Mater. 2021. Vol. 113. P. 108279. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108279>.
21. High-sensitivity narrow-band T-shaped cantilever Fabry-perot acoustic sensor for photoacoustic spectroscopy / J. Wang [et al.] // Photoacoustics. 2024. Vol. 38. P. 100626. <https://doi.org/10.1016/j.pacs.2024.100626>.
22. Leclerc M., Léger P., Tinawi R. Computer aided stability analysis of gravity dams—CADAM // Advances in Engineering Software. 2003. Vol. 34, no. 7. P. 403–420. [https://doi.org/10.1016/S0965-9978\(03\)00040-1](https://doi.org/10.1016/S0965-9978(03)00040-1).

23. Out-of-plane shear performance of textile reinforced concrete sandwich panel: Numerical analysis and parametric study / J.-Q. Huang, M.-L. Dan, X. Chong, Q. Jiang, Y.-L. Feng, Y.-W. Wang // *Structures*. 2025. Vol. 71. P. 108080. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.108080>.
24. Bai X., Chen M. Lightweight design of tensegrity Michell truss subject to cantilever loads. *Compos Struct.* 2025. P. 118925. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2025.118925>.
25. Experimental and numerical simulation of pull-out response in textile-reinforced concrete / S. G. Venigalla, A. B. Nabilah, N. A. Mohd Nasir, N. A. Safiee, F. N. A. Abd Aziz // *Structures*. 2023. Vol. 57. P. 105132. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105132>.
26. Lai Y., Wu Y., Wang G. Novel long-span cable-stayed deck arch bridge: Concept and structural characteristics // *Eng Struct.* 2024. Vol. 308. P. 118026. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118026>.
27. Gernay T. Performance-based design for structures in fire: Advances, challenges, and perspectives // *Fire Saf J.* 2024. Vol. 142. P. 104036. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.104036>.
28. Madhavi M. A., Madhavi T. C. Flexural behavior of warp knitted textile reinforced concrete impregnated with cementitious binder // *Case Studies in Construction Materials*. 2024. Vol. 20. P. e02884. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02884>.
29. FEM-based real-time task planning for robotic construction simulation / Q. Xu, A. Zhu, G. Xu, Z. Shao, J. Zhang, and H. Zhang // *Autom Constr.* 2025. Vol. 170. P. 105935. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105935>.
30. Борисов Н. О., Столяров О. Н. Преимущества применения текстильно-армированного бетона в конструкциях консольного типа // Архитектура, строительство, транспорт. 2025. Т. 5(1). С. 81–92. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-81-92> EDN: QMXDMF

References

- Qu F., Yin S., Wang F., Wang B. Effects of textile-reinforced concrete on the cyclic shear behavior of damaged confined brick masonry walls. *Journal of Building Engineering*. 2023; 78:107717. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107717>.
- Kalthoff M., et al. Fabrication of lightweight, carbon textile reinforced concrete components with internally nested lattice structure using 2-layer extrusion by LabMorTex. *Constr Build Mater.* 2023; 395: 132334. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132334>.
- Jing L., Wang N., Yin S. Shear performance of textile-reinforced concrete (TRC)-strengthened brick masonry walls. *Constr Build Mater.* 2023; 397: 132401. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132401>.
- Li Y., Yin S., Wang Q., Zhou B. Compressive behaviour of concrete columns confined with textile reinforced concrete composites. *Journal of Building Engineering*. 2024; 96: 110587. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110587>.

5. Sciegaj A., Almfeldt S., Larsson F., Lundgren K. Textile reinforced concrete members subjected to tension, bending, and in-plane loads: Experimental study and numerical analyses. *Constr Build Mater.* 2023; 408: 133762. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133762>.
6. Ye S., Lu C., She P., Li Z., Xie T., Leung C. K. Y. Numerical model of tensile behavior of textile reinforced concrete (TRC) based on stress field analysis. *Constr Build Mater.* 2023; 407:133568. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133568>.
7. Wang C., Yin S., Zhao Y., Li Y. Flexural behavior of composite beams with textile reinforced concrete (TRC) permanent formwork considering interface characteristics. *Journal of Building Engineering.* 2025; 99: 111602. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111602>.
8. Priyanga R. Muthadhi A. Bending analysis of textile reinforced concrete sandwich panels: Experimental and numerical evaluation. *Constr Build Mater.* 2024; 439: 137213. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137213>.
9. Douk N., Vu X. H., Si Larbi A., Audebert M., Chatelin R. Numerical study of thermomechanical behaviour of reinforced concrete beams with and without textile reinforced concrete (TRC) strengthening: Effects of TRC thickness and thermal loading rate. *Eng Struct.* 2021; 231: 111737. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111737>.
10. Esaker M., Thermou G. E., Neves L. Behaviour of Textile Reinforced Concrete panels under high-velocity impact loading. *Constr Build Mater.* 2024; 445: 137806. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137806>.
11. Immanuel S., Kaliyamoorthy B. Investigating the effect of textile layers on the flexural response of Textile Reinforced Concrete (TRC) panels. *Structures.* 2025; 71: 108112. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.108112>.
12. Hutaibat M., Ghiassi B., Tizani W. Bond behaviour of prestressed basalt textile reinforced concrete. *Constr Build Mater.* 2024; 438: 137309. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137309>.
13. Betz P., Marx S., Curbach M. Biaxial compressive capacity of textile-reinforced concrete. *Case Studies in Construction Materials.* 2024; 20: e02986. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02986>.
14. Kumar D., Ali S. F., Arockiarajan A., Theoretical and experimental studies on large deflection analysis of double corrugated cantilever structures. *Int J Solids Struct.* 2021; 228: 111126. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2021.111126>.
15. Zhang X., Wang X., Liang X., Zhang Y., Wu Z. Study on the factors influencing bending spalling failure in BFRP textile-reinforced concrete. *Journal of Building Engineering,* 2025; 99: 111468. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111468>.
16. Van Craenenbroeck M., Puystiens S., Laet L. De, Van Hemelrijck D., Van Paepengem W., Mollaert M., Integrated analysis of kinematic form active structures for architectural applications: Experimental verification. *Eng Struct.* 2016; 123: 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.05.032>.

17. Xue R., Bie S., Guo L., Zhang P. Stability Analysis for Cofferdams of Pile Wall Frame Structures. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2019; 23(9): 4010–4021. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-1320-7>.
18. Huiyu X., Guangfu B., Da Z., Huaitao S. Vibration damping method of cantilever structure considering redundant constraint of monocrystalline blade casting mold shell. *Measurement*. 2024; 236: 115100. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115100>.
19. Ma S., Chen M., Skelton R. E. Design of a new tensegrity cantilever structure. *Compos Struct*. 2020; 243: 112188.: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112188>.
20. Saturday L., et al., Thermal conductivity of nano- and micro-crystalline diamond films studied by photothermal excitation of cantilever structures. *Diam Relat Mater*. 2021; 113: 108279. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108279>.
21. Wang J., et al. High-sensitivity narrow-band T-shaped cantilever Fabry-perot acoustic sensor for photoacoustic spectroscopy. *Photoacoustics*. 2024; 38: 100626. <https://doi.org/10.1016/j.pacs.2024.100626>.
22. Leclerc M., Léger P., Tinawi R. Computer aided stability analysis of gravity dams—CADAM. *Advances in Engineering Software*. 2003; 34(7): 403–420. [https://doi.org/10.1016/S0965-9978\(03\)00040-1](https://doi.org/10.1016/S0965-9978(03)00040-1).
23. Huang J.-Q., Dan M.-L., Chong X., Jiang Q., Feng Y.-L., Wang Y.-W. Out-of-plane shear performance of textile reinforced concrete sandwich panel: Numerical analysis and parametric study. *Structures*. 2025; 71: 108080. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.108080>.
24. Bai X., Chen M. Lightweight design of tensegrity Michell truss subject to cantilever loads. *Compos Struct*, 2025. P. 118925. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2025.118925>.
25. Venigalla S. G., Nabilah A. B., Mohd Nasir N. A., Safiee N. A., Abd Aziz F. N. A. Experimental and numerical simulation of pull-out response in textile-reinforced concrete. *Structures*. 2023; 57: 105132. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105132>.
26. Lai Y., Wu Y., Wang G. Novel long-span cable-stayed deck arch bridge: Concept and structural characteristics. *Eng Struct*. 2024; 308: 118026. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118026>.
27. Gernay T. Performance-based design for structures in fire: Advances, challenges, and perspectives. *Fire Saf J*. 2024; 142: 104036. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.104036>.
28. Madhavi M. A., Madhavi T. C. Flexural behavior of warp knitted textile reinforced concrete impregnated with cementitious binder. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 20: e02884. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02884>.
29. Xu Q., Zhu A., Xu G., Shao Z., Zhang J., Zhang H. FEM-based real-time task planning for robotic construction simulation. *Autom Constr*. 2025; 170: 105935. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105935>.

30. Borisov N. O., Stolyarov O. H. Advantages of using textile-reinforced concrete in cantilever-type structures. *Arkhitektura, stroitel'stvo, transport = Architecture, construction, transport.* 2025; 5(1): 81-92. (In Russ.). <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-81-92> EDN: QMXDMF

Информация об авторах / Information about the Authors

Борисов Никита Олегович, аспирант,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,
e-mail: borisov.n@edu.spbstu.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7769-4931>

Столяров Олег Николаевич, доктор
технических наук, доцент ВШГиЭ,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,
e-mail: stolyarov_on@spbstu.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2930-5022>

Nikita O. Borisov, Post-Graduate Student, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: borisov.n@edu.spbstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7769-4931>

Oleg N. Stolyarov, Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Higher School of Hydraulic and Power Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: stolyarov_on@spbstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2930-5022>

Оригинальная статья / Original article

УДК 66.074.3

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-56-71>

Повышение экологических характеристик теплогенераторов систем автономного теплоснабжения

**В.С. Ежов¹, А.П. Бурцев¹✉, А.Н. Седых¹, А.В. Сологубова¹,
А.А. Базартинова¹**

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

✉ e-mail: ap_burtsev@mail.ru

Резюме

Цель исследования. В статье рассматривается инновационный метод повышения экологических характеристик теплогенераторов в системах автономного теплоснабжения, основанный на применении гранулированного доменного шлака в качестве адсорбента с целью удаления вредных веществ из дымовых газов, а именно оксидов азота и углерода. Представлены результаты экспериментов, подтверждающих эффективность этого метода.

Методы. В исследовании рассмотрена работа опытно-промышленной установки с расчётом ее эффективности. Для этого использованы данные, полученные в ходе экспериментов на этой установке, которая была установлена на дымовую трубу с целью очистки дымовых газов от вредных газов (оксиды азота и углерода).

Результаты. Разработанная опытно-промышленная установка позволяет снизить содержание оксидов азота в сбросных и дымовых газах в атмосферу на 50-55%, также удалось снизить концентрацию оксидов углерода на 27,7%. Снижение оксидов углерода в выбросах варьируется от 16,7 до 26,7%. В процессе работы установки использовался доменный шлак с гранулами размером от 5 до 10 мм. Установка эффективно очищает дымовые и сбросные газы в течение 720 часов между циклами регенерации доменного шлака, на который требуется до 52,5 литров воды.

Заключение. Опытно-промышленная установка очистки дымовых газов теплогенераторов систем поквартирного теплоснабжения с использованием адсорбционной очистки и гранулированного доменного шлака в качестве адсорбента является эффективным методом управления экологическими параметрами. Она позволяет снизить содержание вредных компонентов в дымовых газах, включая оксиды азота (NO_x), в том числе NO , оксид углерода (CO) и диоксид углерода (CO_2). Метод позволяет управлять экологическими параметрами теплогенераторов, исключать необходимость отвода и утилизации конденсата и повышать технико-экономические и экологические параметры теплогенерирующей системы поквартирного теплоснабжения.

Ключевые слова: теплогенератор; автономное теплоснабжение; очистка дымовых газов; адсорбция; гранулированный доменный шлак; оксиды азота; диоксид углерода; экологические характеристики; опытно-промышленная установка; регенерация.

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

© Ежов В.С., Бурцев А.П., Седых А.Н., Сологубова А.В., Базартинова А.А., 2025

Для цитирования: Повышение экологических характеристик теплогенераторов систем автономного теплоснабжения / В.С. Ежов, А.П. Бурцев, А.Н. Седых, А.В. Сологубова, А.А. Базартинова // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(3): 56-71. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-56-71>.

Поступила в редакцию 07.07.2025

Подписана в печать 11.08.2025

Опубликована 30.09.2025

Improving the environmental performance of heat generators in autonomous heat supply systems

Vladimir S. Yezhov¹, Alexey P. Burtsev¹✉, Alexander N. Sedykh¹,
Anna V. Sologubova¹, Arina A. Bazartinova¹

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

✉ e-mail: ap_burtsev@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The article discusses an innovative method for improving the environmental performance of heat generators in autonomous heat supply systems based on the use of granular blast furnace slag as an adsorbent to remove harmful substances from flue gases, namely nitrogen and carbon oxides. The results of experiments confirming the effectiveness of this method are presented.

Methods. The study examines the operation of a pilot plant with the calculation of its effectiveness. To do this, we used the data obtained during experiments on this installation, which was installed on a chimney in order to purify flue gases from harmful gases (nitrogen and carbon oxides).

Results. The developed pilot plant makes it possible to reduce the content of nitrogen oxides in exhaust and flue gases into the atmosphere by 50-55%, and it was also possible to reduce the concentration of carbon oxides by 27,7%. The reduction of carbon oxides in emissions ranges from 16,7 to 26,7%. Blast furnace slag with granules from 5 to 10 mm in size was used during the operation of the installation. The unit effectively cleans flue and exhaust gases for 720 hours between blast furnace slag regeneration cycles, which requires up to 52,5 liters of water.

Conclusion. Pilot-industrial flue gas purification plant for heat generators of residential heating systems using adsorption purification and granular blast furnace slag as an adsorbent is an effective method of managing environmental parameters. It reduces the content of harmful components in flue gases, including nitrogen oxides (NO_x), including NO, carbon monoxide (CO) and carbon dioxide (CO_2). The method makes it possible to control the environmental parameters of heat generators, eliminate the need for condensate removal and disposal, and improve the technical, economic and environmental parameters of the heat generating system for apartment-by-apartment heat supply.

Keywords: heat generator; autonomous heat supply; flue gas purification; adsorption; granular blast furnace slag; nitrogen oxides; carbon monoxide; environmental characteristics; pilot plant; regeneration.

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

For citation: Yezhov V. S., Burtsev A. P., Sedykh A. N., Sologubova A. V., Bazartinova A. A. Improving the environmental performance of heat generators in autonomous heat supply systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(3): 56-71 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-56-71>.

Received 07.07.2025

Accepted 11.08.2025

Published 30.09.2025

Проблема повышения экологических характеристик теплогенераторов для поквартирного отопления требует разработки эффективных и экономичных методов [1]. Основные критерии для их применения включают экологическую эффективность и технико-экономическую обоснованность [2].

Экологичность подразумевает применение технологий, которые позволяют сократить выбросы вредных веществ в окружающую среду, а технико-экономическая обоснованность предполагает использование недорогих и доступных реагентов, стандартизованных процессов, надежного и простого в эксплуатации оборудования [3].

Многие каталитические методы очистки дымовых и сбросных газов отличаются высокой стоимостью катализаторов и сложностью в использовании, что приводит к увеличению стоимости энергии [4]. Некatalитические и абсорбционные методы требуют применения химических реагентов [5], специализированного оборудования и дополнительных производственных площадей, что снижает их эффективность и экологичность [6, 7].

Установка дополнительных теплообменных поверхностей увеличивает аэродинамическое сопротивление и снижает КПД теплогенератора, что повышает стоимость тепловой энергии [8, 9]. Эти методы не подходят для малых теплогенераторов из-за громоздкости оборудования

ния и невозможности снижения температуры отходящих газов.

Материалы и методы

Адсорбция является более подходящим методом для очистки выхлопных газов малых теплогенераторов. Это универсальный процесс, позволяющий удалять примеси из газовой среды с помощью пористых твердых адсорбентов [10, 11]. Адсорбция избирательна и обратима, что позволяет выделять адсорбированные вещества [12].

По характеру взаимодействия адсорбента с веществом различают физическую и химическую адсорбцию. Физическая адсорбция обусловлена межмолекулярными силами и является обратимой, требуя активации энергии порядка 4...12 кДж/моль. Химическая адсорбция включает химическое взаимодействие между адсорбентом и адсорбтивом, что делает ее менее обратимой [13].

Адсорбционные методы позволяют очищать газы при высоких температурах, что делает их подходящими для систем автономного теплоснабжения. Они обладают высокой экологической эффективностью и могут быть адаптированы для малых теплогенераторов, что делает их перспективным решением для контроля экологической чистоты [14].

Химический состав доменного шлака, полученного в рамках одной технологической схемы, демонстрирует высокую степень однородности. На рис. 1 представлен репрезентативный химический

состав доменного шлака, который наглядно иллюстрирует его стабильность.

Данные свидетельствуют о том, что вариативность химического состава доменных шлаков находится в пределах допустимых значений, что подтверждает их относительную инвариантность [15, 16].

Свойства шлака как вяжущего материала зависят от его химического состава (рис. 2), содержания аморфных

веществ, степени измельчения и наличия добавок.

При стандартных условиях реакция между тонкоизмельченным доменным шлаком и водой протекает медленно. Однако этот процесс значительно ускоряется при использовании активирующих веществ, таких как гидроксид кальция, щелочи и гипс [17].

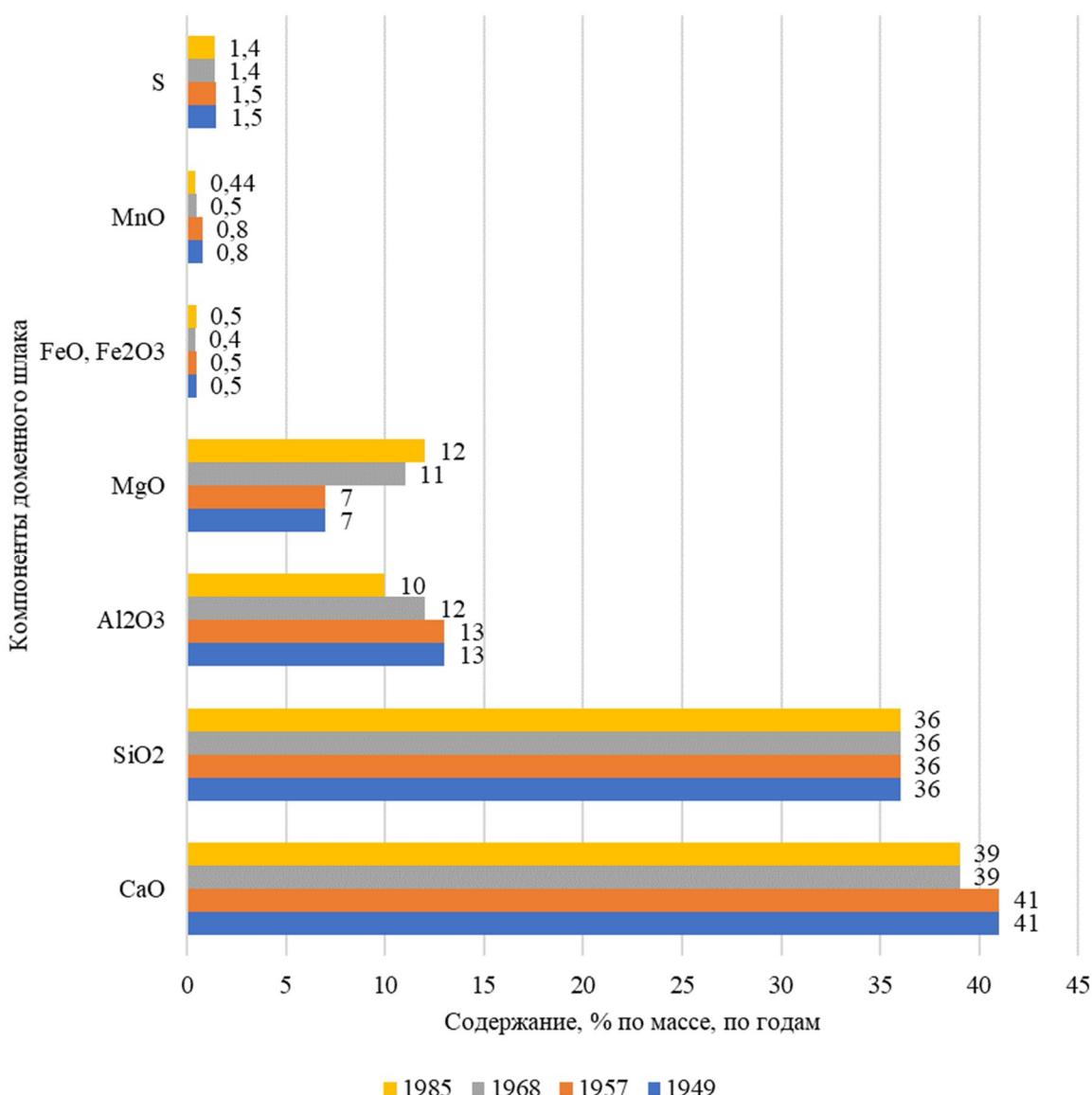


Рис. 1. Химический состав доменных шлаков

Fig. 1. Chemical composition of blast furnace slags

Доменный шлак имеет щелочную реакцию, так как его pH в водной среде варьируется от 8 до 10. Несмотря на содержание серы (1-2%) доменные шлаки не представляют опасности для коррозии стали [18].

Важным параметром, характеризующим активность и устойчивость доменного шлака к известковому распаду, является модуль основности. Он опре-

деляется как отношение суммарного содержания основных оксидов (CaO , MgO , Na_2O , K_2O) к кислым оксидам (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3). Если модуль основности меньше единицы, то шлак считается кислым и обладает высокой устойчивостью к известковому распаду. Если больше единицы, то шлак является основным и повержен этому процессу [19, 20].

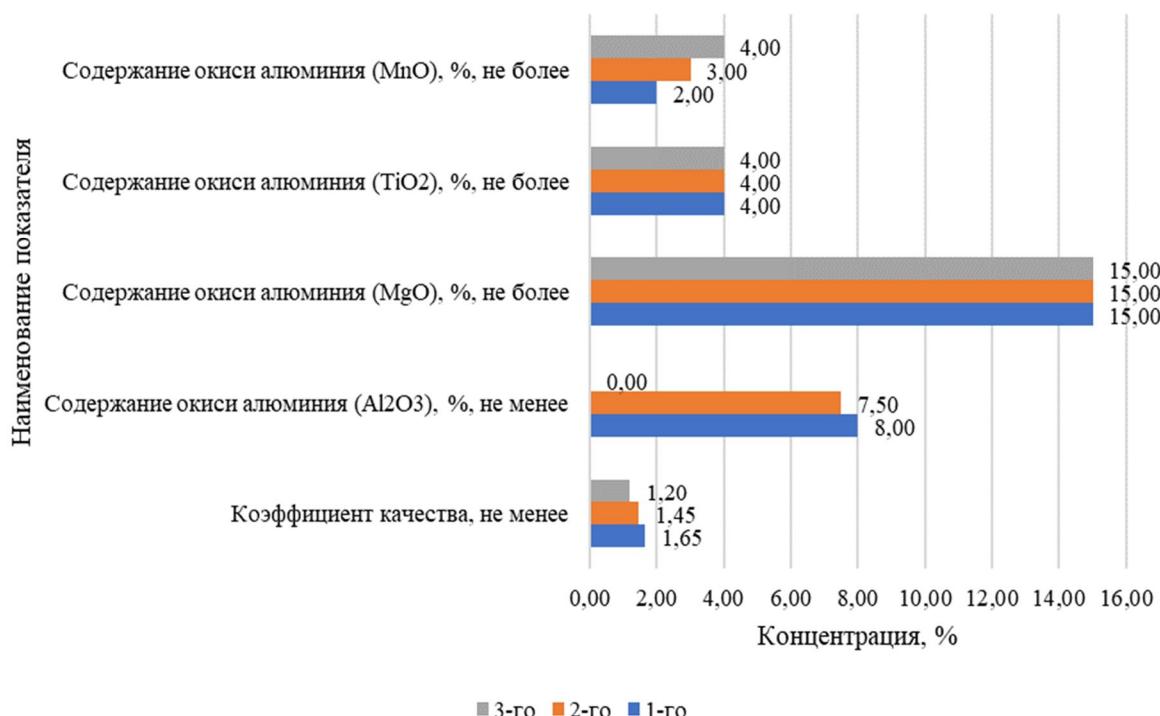


Рис. 2. Химический состав доменных шлаков в зависимости от сорта

Fig. 2. Chemical composition of blast furnace slags depending on the grade

В процессе охлаждения жидкого шлака происходят сложные физико-химические реакции, которые приводят к образованию пор. Эти реакции сопровождаются увеличением вязкости шлаковой массы и выделением газов, которые изначально присутствуют в шлаке в результате доменного процесса. Кроме того, газы образуются в результате термического

разложения сульфидных компонентов, таких как CaS , MgS , MnS и FeS . Этот процесс особенно интенсифицируется при контакте с водой.

Сероводород играет важную роль в формировании пористости шлака. Вода не только способствует разложению сульфидных соединений, но и охлаждает шлаковую массу, что увеличивает ее спо-

собность удерживать газы. Таким образом, эффективность взаимодействия воды и шлака напрямую влияет на успешность процесса поризации.

Для достижения оптимальной пористости необходимо тщательно контролировать параметры взаимодействия воды и шлака, что включает в себя регулирование скорости охлаждения. Интенсивности перемешивания и степени дисперсности водной фазы.

Результаты и их обсуждение

В ходе лабораторных исследований было установлено, что средний показатель пористости доменного шлака, использованного в ходе эксперимента, составляет 60%. Размер пор варьируется от 0,1 до 1,0 мм, что позволяет классифицировать их как макропоры.

В качестве сорбента для очистки дымовых газов был выбран доменный гранулированный шлак, произведенный на Новолипецком металлургическом комбинате. Этот материал характеризуется высоким модулем основности ($M > 1$) и повышенным содержанием основных оксидов, что значительно усиливает его способность к реакциям адсорбции и катализического разложения вредных веществ.

Для регулирования экологических параметров теплогенераторов индивидуальных систем теплоснабжения была разработана и протестирована опытно-промышленная установка, включающая в себя газоочистную насадку, обеспечивающую глубокую очистку дымовых газов.

В качестве экспериментального стенда¹ для апробации технологических режимов работы установки был использован газовый отопительный котел модели АОГВ теплопроизводительностью 23,2 кВт.

Для анализа химического состава дымовых газов до и после работы установки использовался газоанализатор ДАГ-500, который позволил получить точные данные о концентрации вредных компонентов.

Принципиальная схема опытно-промышленной установки включает в себя типовой модуль газоочистки, который гидравлически связан с теплогенератором АОГВ-23,2 через патрубок отвода продуктов сгорания. Линия отвода также соединяет газоочистное устройство с существующим дымоходом, обеспечивая отвод очищенных или байпасных газов в атмосферу (рис. 3)².

¹ Патент № 2717060 С1 Российская Федерация, МПК B04C 5/22, B01D 45/12, B01D 45/18. Экологичная насадка для дымовой трубы; № 2021115161: заявл. 14.19.2019 : опубл. 17.03.2020 / В. С. Ежов, Н. Е. Семичева, А. Н. Михайлов, К. В. Мамаева; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет».

² Патент № 2815089 С1 Российская Федерация, МПК B01D 53/04, B04C 9/00. Циклонно-прямоточный адсорбер для комплексной очистки газов: № 2023127211: заявл. 24.10.2023: опубл. 11.03.2024 / В. С. Ежов, Н. Е. Семичева, А. П. Бурцев, Н. С. Перепелица ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Юго-Западный государственный университет".

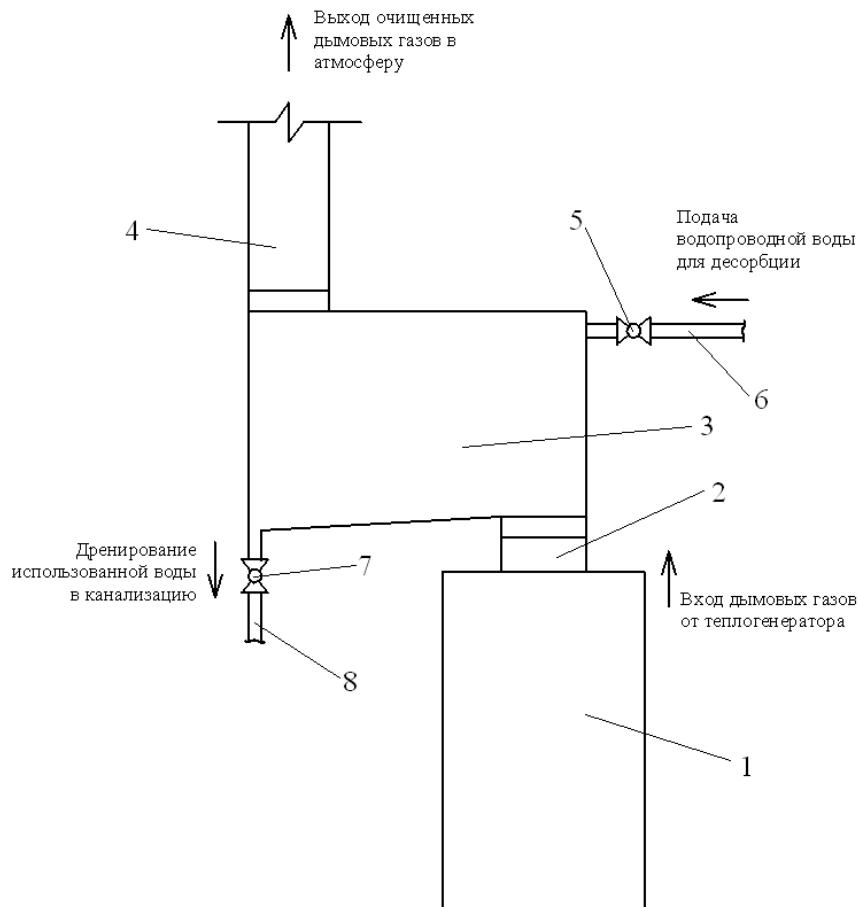


Рис. 3. Принципиальная схема опытно-промышленного испытания установки очистки дымовых газов: 1 – теплогенератор АОГВ-23; 2 – патрубок отвода дымовых газов теплогенератора; 3 – опытно-промышленная установка очистки дымовых газов; 4 – дымоход; 5 – вентиль подачи холодной воды; 6 – трубопровод подачи холодной воды на регенерацию; 7 – вентиль дренажа отработанной воды; 8 – трубопровод канализации

Fig. 3. Schematic diagram of a pilot industrial test of a flue gas purification plant: 1 – heat generator AOGV-23.2; 2 – flue gas outlet pipe of the heat generator; 3 – pilot industrial flue gas purification plant; 4 – chimney; 5 – cold water supply valve; 6 – cold water supply pipeline for regeneration; 7 – waste water drainage valve; 8 – sewage pipeline

Для регенерации доменного шлака установка подключена к системе хозяйственно-питьевого водоснабжения через вентиль подачи охлаждающей воды. Отработанная жидкость отводится через дренажный вентиль, соединяющий установку с сетью производственной канализации.

Для повышения точности экспериментальных измерений и расширения диапазона контроля параметров был до-

полнительно использован высокочувствительный газоанализатор модели ДАГ-500.

Эксперимент начался с загрузки горизонтальных перфорированных кассет предварительно высушенный доменный гранулированным шлаком с коэффициентом основности менее 1 и фракцией 5-10 мм. Затем теплогенератор АОГВ-23,2 был запущен в работу на заданном режиме тепловой нагрузки.

Нагретые дымовые газы поступали в опытно-промышленный модуль газоочистки через нижний стыковочный патрубок, где шлаковая загрузка осуществляла адсорбционно-кatalитическую очистку от токсичных оксидов. Очищенный газ выходил через верхний стыковочный патрубок и удалялся в атмосферу через дымовую трубу¹.

После достижения стационарного режима работы теплогенератора пробы дымовых газов, необходимые для контроля концентраций основных компонентов, отбирали с помощью газоанализатора ДАГ-500 поочерёдно на входном и выходном патрубках опытно-промышленного стенда. Отбор осуществляли в зоне верхнего и нижнего стыковочных узлов.

После первичной газоаналитической выборки дымовых газов постепенно увеличивали электрическую и тепловую нагрузку генератора, что, в свою очередь, приводило к росту температуры факела, расхода продуктов сгорания и концентраций NO_x, CO и CO₂. Когда теплогенератор выходил на установившийся номинальный режим, повторный отбор газовой смеси осуществляли согласно ранее описанной процедуре пробоотбора.

Указанным методом выполняли требуемую серию измерений; финальное измерение фиксировали при предельной нагрузке на теплогенератор.

В ходе эксперимента регистрировали параметры, необходимые для вычисления коэффициента очистки дымовых выбросов теплогенератора опытно-промышленной установки при варьируемых температурах отходящих газов и изменяющихся концентрациях оксидов азота (NO_x), окиси углерода (CO) и диоксида углерода (CO₂).

Испытания проводили при десяти ступенях нагрузки теплогенератора: температура газового потока на входе в насадок последовательно составляла 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180 и 190 °C. Регулирование мощности осуществляли варьированием расхода газообразного топлива, что изменяло объём дымовых газов, повышало их термический уровень и влияло на концентрации токсичных примесей.

Показатели температуры дымовых газов как перед входом в опытно-промышленный абсорбер, так и на его выходе, а также температуру газовой среды внутри помещения котельной мониторили с использованием газоанализатора ДАГ-500. На основании экспериментальных данных и последующего расчётного анализа построены кривые, показывающие, как изменяется эффективность удаления NO_x, CO и CO₂ в зависимости от температуры дымовых потоков (рис. 4–7).

¹ Патент на полезную модель № 227716 U1 Российская Федерация, МПК B01D 53/04. горизонтальный многоступенчатый адсорбер: № 2024110450: заявл. 17.04.2024: опубл. 31.07.2024 / В. С. Ежов, Н. Е. Семичева, А. П. Бурцев, Н. С. Перепелица; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Юго-Западный государственный университет".

Характер зависимостей определялся методом наименьших квадратов.

Из графика зависимости очистки дымовых газов от CO (см. рис. 4) видно, что уровень очистки дымовых газов от ок-

сида углерода (II) прямо пропорционален температуре дымовых газов: с увеличением температуры дымовых газов от 110 до 200 °C увеличивается уровень очистки от CO с 7,1% до 23,9 %.

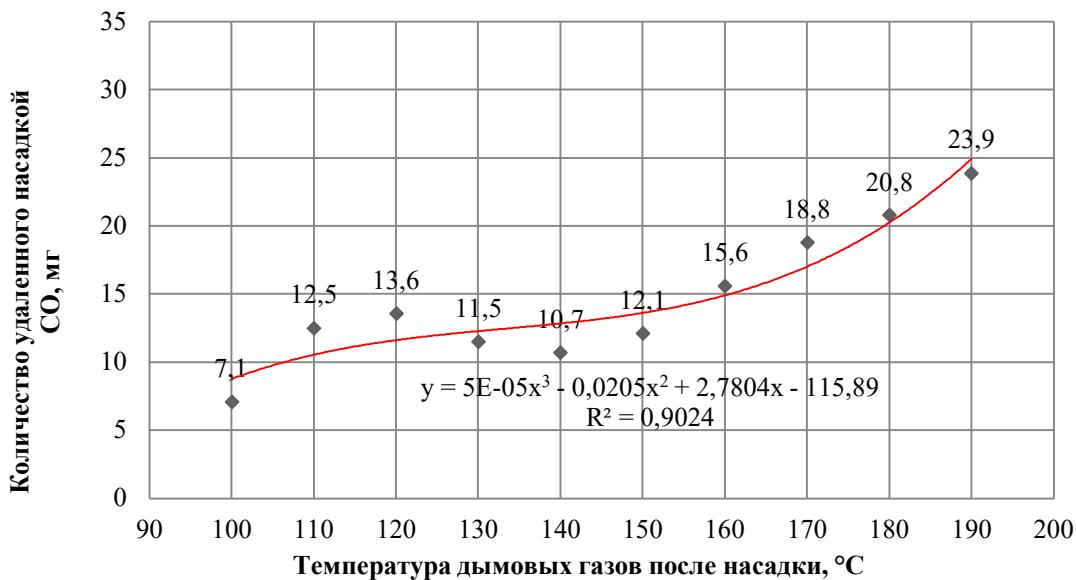


Рис. 4. График зависимости очистки дымовых газов от CO при различной температуре на входе в насадку

Fig. 4. Graph of the dependence of flue gas purification on CO at different temperatures at the inlet to the nozzle



Рис. 5. График зависимости очистки дымовых газов от CO₂ при различной температуре на входе в насадку

Fig. 5. Graph of dependence of flue gas purification on CO₂ at different temperatures at the nozzle inlet

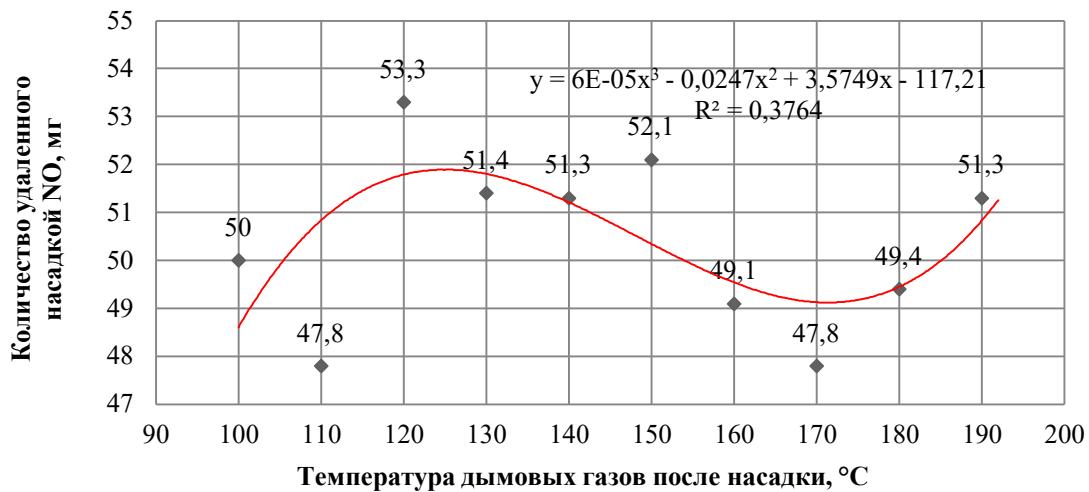


Рис. 6. График зависимости очистки дымовых газов от NO при различной температуре на входе в насадку

Fig. 6. Graph of the dependence of flue gas purification on NO at different temperatures at the inlet to the nozzle



Рис. 7. График зависимости очистки дымовых газов от NO_x при различной температуре на входе в насадку

Fig. 7. Graph of the dependence of flue gas purification on NO_x at different temperatures at the inlet to the nozzle

На графике зависимости очистки дымовых газов от CO₂ (рис. 5) наблюдается, что с увеличением температуры незначительно увеличивается степень очистки от CO₂. Очистка колеблется в пределах от 19,4 до 24,5 %.

Из графиков, отображающих зависимость очистки дымовых газов от ок-

сида углерода (II) и оксида азота (II), видно, что степень очистки дымовых газов имеет схожий характер и возрастает с повышением температуры дымовых газов.

На графике зависимости очистки дымовых газов от NO (см. рис. 6) видно, что уровень очистки дымовых газов от

оксида азота (II) колеблется от 53,3% до 47,8%. С изменением температуры происходит незначительное изменение степени очистки дымовых газов.

Из графика зависимости очистки дымовых газов от NO_x (рис. 7) видно, что уровень очистки дымовых газов от оксида азота (II) колеблется от 54,1% до 49,0%. С увеличением температуры происходит незначительное уменьшение степени очистки дымовых газов.

Графические представления, демонстрирующие зависимость эффективности очистки дымовых газов от содержания оксидов азота (NO , NO_x), выявляют корреляцию между степенью очистки и изменением нагрузки теплогенератора. Это наблюдение обусловлено тем, что NO_x включает в себя какmonoоксид азота (NO), так и диоксид азота (NO_2), что обуславливает их совместнуюдинамику в процессе очистки.

Применение предлагаемой опытно-промышленной установки обеспечивает значительное снижение концентраций вредных веществ в дымовых газах. В частности, содержание оксидов азота, включая NO и NO_x , уменьшается на 48-55%, что свидетельствует о высокой эффективности системы. Концентрация оксида углерода (CO) снижается до 27,7%, а уровень диоксида углерода (CO_2) уменьшается на 15,6-26,7%, что также подтверждает значительное улучшение экологической обстановки.

Использование доменного шлака в качестве адсорбента обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными адсорбентами. Высокое содержание

основных оксидов, таких как CaO , MgO , FeO , в доменных шлаках способствует эффективному протеканию процессов хемосорбции с кислыми оксидами, присутствующими в дымовых газах. Это обеспечивает высокую степень адсорбции вредных веществ.

Еще одним важным преимуществом является минимальное образование побочных продуктов реакций при использовании доменного шлака в качестве адсорбента. Это снижает нагрузку на окружающую среду и упрощает обслуживание установки и снижает риск аварийных ситуаций.

Доменный шлак обладает высокой механической прочностью, что исключает образование трещин и пыления в процессе эксплуатации. Это значительно упрощает обслуживание установки и снижает риск аварийных ситуаций.

Простота эксплуатации и легкость замены отработанного адсорбента делает процесс использования доменного шлака экономически выгодным и эффективным.

Экономическая целесообразность применения доменного шлака обусловлена его низкой рыночной стоимостью по сравнению с другими адсорбентами. Например, стоимость доменного шлака на два порядка ниже стоимости активированного угля, что делает его более привлекательным с точки зрения затрат.

Выводы

1. Опытно-промышленная установка очистки дымовых газов теплогенераторов систем поквартирного теплоснаб-

жения позволяет уменьшить содержание оксидов азота (NO_x , в том числе и NO) в дымовых газах, выбрасываемых в атмосферу, на 50-55%; содержание оксида углерода II (CO) в дымовых газах, выбрасываемых в атмосферу, до 27,7%; содержание диоксида углерода (CO_2) в дымовых газах, выбрасываемых в атмосферу, на 16,7-26,7%.

2. Для обеспечения рациональной работы опытно-промышленной установки по очистке дымовых газов, установленной в теплогенераторе АОГВ теплоизводительностью 23,2 кВт, необходимо использовать доменный шлак с гранулами размером от 5 до 10 мм объемом 0,014 м³, что позволяет системе фильтрации эффективно работать в номинальных условиях.

3. Установка демонстрирует высокую эффективность очистки дымовых газов в течение 720 часов между процессами регенерации доменного шлака, что говорит о надежности и долговечности системы, а также о её способности поддерживать стабильные показатели очистки в течение длительного времени.

4. Количество воды, необходимое для проведения одного цикла процесса регенерации, равно 52,5 кг.

5. Полученные зависимости позволяют рассчитывать основные параметры процесса адсорбции и размеры адсорбера.

Таким образом, наиболее рациональным для теплогенераторов автономного теплоснабжения методом управления экологическими параметрами является метод, основанный на адсорбционной очистке с применением в качестве адсорбента гранулированного доменного шлака, обеспечивающий эффективное удаление вредных компонентов из дымовых газов, путем установки компактного адсорбера. Этот метод позволяет:

- управлять экологическими параметрами теплогенераторов поквартирных систем теплоснабжения путем снижения вредных выбросов в дымовых газах;
- производить очистку дымовых газов при температурах уходящих газов. Это исключает необходимость отвода и утилизации конденсата;
- повышать технико-экономические и экологические параметры теплогенерирующей системы поквартирного теплоснабжения за счет снижения концентрации вредных веществ в городском массиве. Это создает условия для создания биосферосовместимых зданий в городах.

Список литературы

1. Носков А.С., Пай З.П. Технологические методы защиты атмосферы от вредных выбросов на предприятиях энергетики. Новосибирск, 1996. 156 с.
2. Попова Н.М. Катализаторы очистки газовых выбросов промышленных производств. Алма-Ата: Наука, Каз ССР, 1991. 176 с.
3. Приготовление и исследование блочных катализаторов со вторичным термостабильным покрытием для очистки газов от органических соединений / З.Р. Исмагилов,

Р.А. Шкрабина, Д.А. Арендарский, Н.В. Шикина // Кинетика и катализ. 1998. Т.39, №5. С. 653-656.

4. Рамм В.М. Абсорбция газов. М.: Химия, 1976. 656 с.
5. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. М.: Химия, 1984. 592 с.
6. Дубинин М.М. Адсорбция и пористость. М.: Издательство академической военной химической защиты, 1972. 127 с.
7. Ветошкин А.Г. Теоретические основы защиты окружающей среды. Пенза, 2002. 290 с.
8. Соколенко Н. С., Ежов В. С. Экспериментальное определение эффективности очистки дымовых газов от вредных компонентов теплогенераторов систем автономного теплоснабжения жилых зданий // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2013. № 2(2). С. 77-81.
9. Михайлов А. Н., Ежов В. С., Сайков И. Г. Применение гранулированного доменного шлака в качестве адсорбента при очистке дымовых газов // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2022. № 7(1055). С. 52-54. EDN DFFRHO.
10. Михайлов А. Н., Ежов В. С., Семичева Н. Е. Целесообразность использования гранулированного доменного шлака в качестве адсорбента установки очистки дымовых газов теплогенератора системы автономного теплоснабжения // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2020. № 3(1027). С. 59-61. EDN AWTMLY.
11. Ежов В. С. Экологические резервы повышения экономической эффективности теплогенераторов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2015. № 2. С. 37-40.
12. Ежов В. С., Семичева Н. Е., Бурцев А. П. Технологии использования гранулированного доменного шлака для очистки газообразных продуктов сгорания и атмосферного воздуха от вредных компонентов. Курск, 2021. 127 с. EDN VVNFS.
13. Ежов В. С., Семичева Н. Е., Бурцев А. П. Инновационные технологии повышения экологических и энергосберегающих характеристик теплогенераторов. Курск, 2020. 157 с. EDN QROPXH.
14. Использование гранулированных доменных шлаков для очистки газообразных продуктов сгорания и атмосферного воздуха от вредных компонентов / В. С. Ежов, Н. Е. Семичева, Н. В. Бредихина [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2019. № 6. С. 44-48. EDN PTSLMW.
15. Экспериментальное исследование процесса очистки дымовых газов от вредных компонентов с использованием гранулированного доменного шлака / В. С. Ежов, Н. Е. Семичева, А. П. Бурцев, Н. С. Перепелица // Экология и промышленность России. 2024. Т. 28, № 4. С. 10-14. DOI 10.18412/1816-0395-2024-4-10-14. EDN DXWGXT.
16. Использование инновационного метода адсорбционной очистки дымовых газов / В. С. Ежов, Н. Е. Семичева, А. П. Бурцев [и др.] // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2019. № 4(1016). С. 10-12. EDN WBITGY.

17. Грэдинарь Е., В Ежов. С., Бурцев А. П. Использование гранулированного доменного шлака в качестве адсорбента для очистки дымовых газов теплогенераторов систем автономного теплоснабжения // Инженерные системы и сооружения. 2024. 3(57). С. 69-76. EDN PXMQBS.
18. Исследование вредных выбросов теплогенерирующих установок в окружающую среду и методы их снижения / В. С. Ежов, Н. Е. Семичева, А. П. Бурцев, Н. С. Перепелица // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2023. № 11(1071). С. 46-48. EDN DGBCP.
19. Исследование физических и химических свойств доменных шлаков в процессе адсорбции и очистки газообразных продуктов сгорания от вредных компонентов / В. С. Ежов, Н. Е. Семичева, А. П. Бурцев, Н. С. Перепелица // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2023. № 11(1071). С. 49-51. EDN SRQHHG.
20. Повышение экологической безопасности источников производства тепловой энергии в условиях городской среды / В. С. Ежов, Н. Е. Семичева, В. Е. Пахомов, А. А. Лисунов // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. 2023. № 2(52). С. 39-43. EDN TQVQOU.

References

1. Noskov A.S., Pai Z.P. Technological methods of protecting the atmosphere from harmful emissions at energy enterprises. Novosibirsk; 1996. 156 p. (In Russ.).
2. Popova N.M. Catalysts for cleaning gas emissions from industrial plants. Alma Ata: Nauka, Kaz SSR; 1991. 176 p. (In Russ.).
3. Ismagilov Z.R., Shkrabina R.A., Arendarsky D.A., Shikina N.V. Preparation and investigation of block catalysts with a secondary thermostable coating for gas purification from organic compounds. *Kinetika i kataliz = Kinetics and catalysis*. 1998; 39(5): 653-656. (In Russ.).
4. Ramm V.M. Absorption of gases. Moscow: Khimiya; 1976. 656 p. (In Russ.).
5. Keltsev N.V. Fundamentals of adsorption technology. Moscow: Chemistry; 1984. 592 p. (In Russ.).
6. Dubinin M.M. Adsorption and porosity. Moscow: Izdatel'stvo akademicheskoi voennoi khimicheskoi zashchity; 1972. 127 p. (In Russ.).
7. Vetoshkin A.G. Theoretical foundations of environmental protection. Penza; 2002. 290 p. (In Russ.).
8. Sokolenko N. S., Yezhov V. S. Experimental determination of the effectiveness of flue gas purification from harmful components of heat generators of autonomous heat supply systems for residential buildings. *Biosfernaya sovmestimost': chelovek, region, tekhnologii = Biospheric compatibility: man, region, technology*. 2013; (2): 77-81. (In Russ.).

9. Mikhailov A. N., Yezhov V. S., Saikov I. G. The use of granular blast furnace slag as an adsorbent in flue gas purification. *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki = BST: Bulletin of Construction Machinery*. 2022; (7): 52-54. (In Russ.). EDN DFFRHO.
10. Mikhailov A. N., Yezhov V. S., Semicheva N. E. Expediency of using granular blast furnace slag as an adsorbent of a flue gas treatment plant for a heat generator of an autonomous heat supply system. *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki = BST: Bulletin of Construction Machinery*. 2020; (3): 59-61. (In Russ.). EDN AWTMLY.
11. Yezhov V. S. Ecological reserves for increasing the economic efficiency of heat generators. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie = Chemical and oil and gas engineering*. 2015; (2): 37-40. (In Russ.).
12. Yezhov V. S., Semicheva N. E., Burtsev A. P. Technologies of using granular blast furnace slag for purification of gaseous combustion products and atmospheric air from harmful components. Kursk; 2021. 127 p. (In Russ.). EDN VVNFSC.
13. Yezhov V. S., Semicheva N. E., Burtsev A. P. Innovative technologies for improving the environmental and energy-saving characteristics of heat generators. Kursk; 2020. 157 p. (In Russ.). EDN QROPXP.
14. Yezhov V. S., Semicheva N. E., Bredikhina N. V., et al. The use of granular blast furnace slags for the purification of gaseous combustion products and atmospheric air from harmful components. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie = Chemical and oil and gas engineering*. 2019; (6): 44-48. (In Russ.). EDN PTSLMW.
15. Yezhov V. S., Semicheva N. E., Burtsev A. P., Perepelitsa N. S. Experimental study of the flue gas purification process from harmful components using granular blast furnace slag. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and industry of Russia*. 2024; 28(4): 10-14. (In Russ.). DOI 10.18412/1816-0395-2024-4-10-14. EDN DXWGXT.
16. Yezhov V. S., Semicheva N. E., Burtsev A. P., et al. The use of an innovative method of adsorption purification of flue gases. *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki = BST: Bulletin of Construction Machinery*. 2019; (4): 10-12. (In Russ.). EDN WBITGY.
17. Gradinar E., Yezhov V. S., Burtsev A. P. The use of granular blast furnace slag as an adsorbent for cleaning flue gases of heat generators of autonomous heat supply systems. *Inzhenernye sistemy i sooruzheniya = Scientific Journal. Engineering systems and structures*. 2024; (3): 69-76. (In Russ.). EDN PXMQBS.
18. Yezhov V. S., Semicheva N. E., Burtsev A. P., Perepelitsa N. S. Study of harmful emissions of heat generating plants into the environment and methods of their reduction. *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki = BST: Bulletin of Construction Machinery*. 2023; (11): 46-48. (In Russ.). EDN DGBCPS.
19. Yezhov V. S., Semicheva N. E., Burtsev A. P., Perepelitsa N. S. Investigation of the physical and chemical properties of blast furnace slags in the process of adsorption and purification of gaseous combustion products from harmful components. *BST: Byulleten'*

stroitel'noi tekhniki = BST: Bulletin of Construction Machinery. 2023; (11): 49-51. (In Russ.). EDN SRQHHG.

20. Yezhov V. S., Semicheva N. E., Pakhomov V. E., Lisunov A. A. Improving the environmental safety of heat energy production sources in an urban environment. *Nauchnyi zhurnal. Inzhenernye sistemy i sooruzheniy = Scientific Journal. Engineering systems and structures.* 2023; (2): 39-43. (In Russ.). EDN TQVQOU.

Информация об авторах / Information about the Authors

Ежов Владимир Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры инфраструктурных теплоэнергетических систем, Юго-Западный государственный университет, Курск, Российская Федерация, e-mail: vl-ezhov@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3636-5610>, ScopusID: P-4377-2015

Бурцев Алексей Петрович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры инфраструктурных энергетических систем, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ap_burtsev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2003-960X>, ScopusID: 57090197100

Седых Александр Николаевич, студент кафедры инфраструктурных энергетических систем, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sedyx06@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7007-8806>

Сологубова Анна Владимировна, студент кафедры инфраструктурных энергетических систем, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: anasologubova600@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8113-5885>

Базартинова Арина Анатольевна, студент кафедры инфраструктурных энергетических систем, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: arinabazartinova@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3411-2241>

Vladimir S. Yezhov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Infrastructure Energy Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vl-ezhov@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3636-5610>, ScopusID: P-4377-2015

Alexey P. Burtsev, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Lecturer of the Infrastructure Energy Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ap_burtsev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2003-960X>, ScopusID: 57090197100

Alexander N. Sedykh, Student of the Infrastructure Energy Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sedyx06@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7007-8806>

Anna V. Sologubova, Student of the Infrastructure Energy Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: anasologubova600@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8113-5885>

Arina A. Bazartinova, Student of the Infrastructure Energy Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: arinabazartinova@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3411-2241>

Оригинальная статья / Original article

УДК 66.042.882+621.362

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-72-85>

Математическое моделирование комбинированных систем утилизации низкопотенциальной теплоты сбросных газов и вентиляционных выбросов

А.П. Бурцев¹

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

e-mail: ap_burtsev@mail.ru

Резюме

Цель исследования. В статье приводится математическое описание процесса теплопередачи при комбинированной утилизации низкопотенциальной теплоты сбросных газов и вентиляционных выбросов в каналах многослойного пластинчатого рекуператора.

Методы. С целью описания работы комбинированной системы утилизации сбросных газов и вентиляционных выбросов разработана математическая модель, учитывающая распределение воздушных потоков в каналах пластинчатого рекуператора при утилизации низкопотенциальной теплоты, переносимой воздушной массой и теплопередачи через плоскую многослойную стенку со встроенными полупроводниковыми элементами Пельтье, на основе которой создана методика разработки и проектирования высокоеффективных и экономичных систем утилизации низкопотенциальной теплоты с попутной генерацией термоэлектричества.

Результаты. Разработана математическая модель, описывающая работу комбинированной системы утилизации сбросных газов и вентиляционных выбросов, включающую потокораспределение в каналах пластинчатого рекуператора, утилизацию теплоты с использованием термоэлектрических элементов Пельтье и их влияния на процесс теплопередачи через плоскую многослойную стенку, которая в дальнейшем позволит создать методику проектирования высокоеффективных и экономичных систем утилизации теплоты, оптимизировать процессы тепло- и массообмена, проводить численные эксперименты с оценкой экономической эффективности.

Заключение. С целью повышения эффективности систем утилизации низкопотенциальной теплоты сбросных газов и вентиляционных выбросов создана математическая модель, включающая в себя распределение воздушных потоков в межпластинчатом пространстве рекуператора, процесс теплопередачи через плоскую многослойную стенку с установленными плоскими полупроводниковыми элементами Пельтье.

Ключевые слова: рекуператор; утилизация; низкопотенциальная теплота; термоэлектричество; моделирование; энергоэффективность.

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

Финансирование: работа выполнена в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» проекта «Приоритет 2030» и государственного задания №075-03-2025-526.

Для цитирования: Бурцев А.П. Математическое моделирование комбинированных систем утилизации низкопотенциальной теплоты сбросных газов и вентиляционных выбросов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(3): 72-85. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-72-85>.

Поступила в редакцию 03.07.2025

Подписана в печать 07.08.2025

Опубликована 30.09.2025

Mathematical modeling of combined low-potential heat recovery systems for exhaust gases and ventilation emissions

Alexey P. Burtsev¹ 

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

 e-mail: ap_burtsev@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The article provides a mathematical description of the heat transfer process during the combined utilization of low-potential waste heat and ventilation emissions in the channels of a multilayer plate heat exchanger.

Methods. In order to describe the operation of a combined exhaust gas and ventilation emissions disposal system, a mathematical model has been developed that takes into account the distribution of air flows in the channels of a plate heat recovery unit during the utilization of low-potential heat transferred by the air mass and heat transfer through a flat multilayer wall with integrated semiconductor Peltier elements. Based on this method, a methodology has been developed for the development and design of highly efficient and economical low-potential heat recovery systems with associated generation of thermoelectricity.

Results. A mathematical model has been developed describing the operation of a combined waste gas and ventilation emissions disposal system, including flow distribution in the channels of a plate heat recovery unit, heat recovery using Peltier thermoelectric elements and their effects on heat transfer through a flat multilayer wall, which will further create a design methodology for highly efficient and economical heat recovery systems, optimize heat and mass transfer processes., to conduct numerical experiments with an assessment of economic efficiency.

Conclusion. In order to increase the efficiency of waste gas low-potential heat recovery systems and ventilation emissions, a mathematical model has been created that includes the distribution of air flows in the interplate space of the heat exchanger, the process of heat transfer through a flat multilayer wall with mounted flat semiconductor Peltier elements.

Keywords: heat recovery; recycling; low-potential heat; thermoelectricity; modeling; energy efficiency.

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

Funding: the work was carried out within the framework of the Southwestern State University Development Program of the Priority 2030 project and state assignment No. 075-03-2025-526.

For citation: Burtsev A. P. Mathematical modeling of combined low-potential heat recovery systems for exhaust gases and ventilation emissions // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University. 2025; 29(3): 72-85 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-72-85>.

Received 03.07.2025

Accepted 07.08.2025

Published 30.09.2025

Введение

В условиях растущего интереса к энергосбережению и экологической безопасности, разработка эффективных си-

стем утилизации низкопотенциальной теплоты становится актуальной задачей. Теплота, содержащаяся в сбросных газах и вентиляционных выбросах с темпе-

ратурой до 200°C, ранее считавшаяся невостребованной, может быть использована для повышения энергоэффективности различных технологических процессов (вентиляционные системы, теплогенерирующие установки, промышленные печи и т.д.) [1-10].

Для повышения энергоэффективности и улучшения утилизации сбросных газов и вентиляционных выбросов используется технология рекуперации, позволяющая дополнительно нагревать или охлаждать приточный воздух, минимизируя потери тепла и экономя от 25 до 35% электроэнергии. Эффективность рекуперационной системы зависит от конструкции поверхности теплообмена, коэффициента теплопередачи, климатических условий эксплуатации, скорости воздушных потоков и разницы температур, а при достижении оптимальных параметров может достигать до 80% [11-20].

Для достижения максимальной эффективности предлагается использовать комбинированные системы утилизации, включающие в себя различного рода теп-

лообменное и рекуперативное оборудование с модифицированными (многослойными) теплообменными стенками со встроенными в их конструкцию полупроводниковыми элементами Пельтье, а также системами очистки от вредных компонентов, позволяют не только эффективно использовать тепловую энергию, но и попутно генерировать термоэлектричество, обеспечивая автономность работы, а также очищать сбросные газы и вентиляционные выбросы, что делает такие системы особенно перспективными [21, 22].

Материалы и методы

С целью выявления наиболее эффективной схемы интенсификации теплопередачи использовались три типа многослойных стенок: без турбулизаторов (рис. 1,а), с коридорным (рис. 1,б) и шахматным расположением турбулизаторов (рис. 1,в).

Более подробно конструкция схем с коридорной и шахматной конфигурацией, а также структура многослойной стенки с плоскими термоэлектрическими элементами Пельтье приведены на рис. 2 – 4.

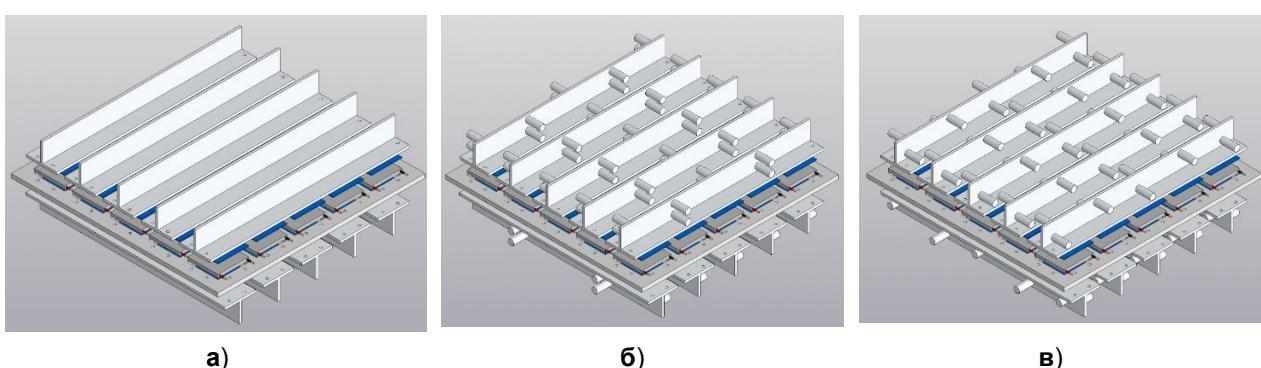


Рис. 1. Многослойная стенка рекуператора: **а** – без турбулизаторов; **б** – с коридорным расположением турбулизаторов; **в** – с шахматным расположением турбулизаторов

Fig. 1. Multilayer recuperator wall: **a** – without turbulators; **b** – with corridor arrangement of turbulators; **c** – with staggered arrangement of turbulators

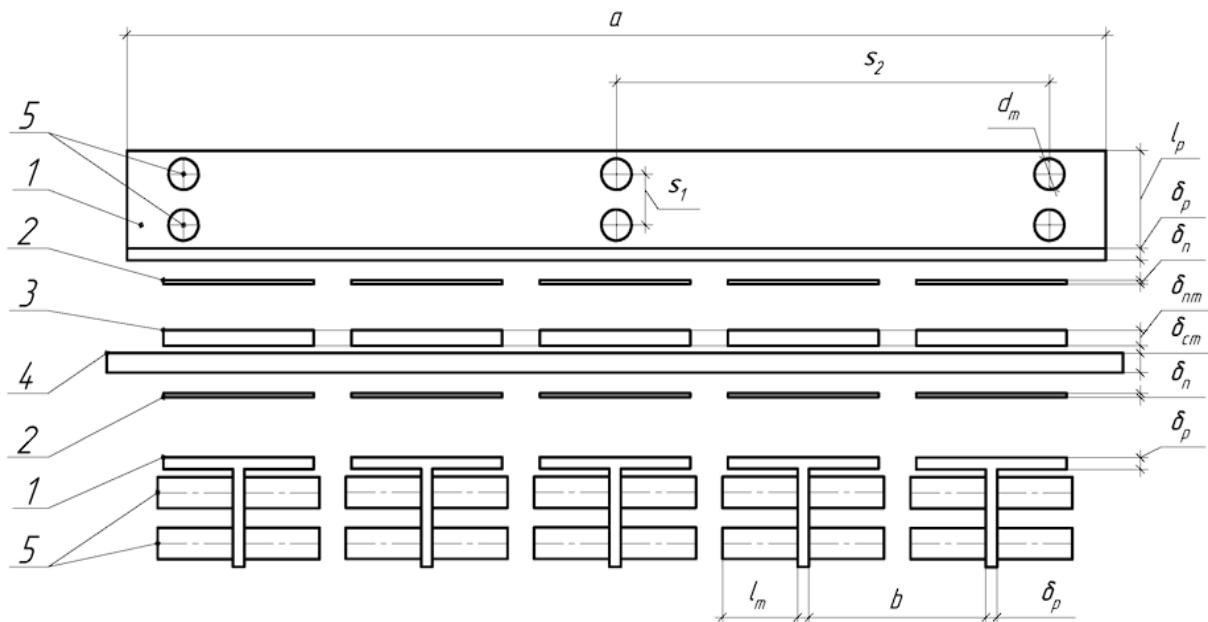


Рис. 2. Схема многослойной стенки с коридорным расположением турбулизаторов:

- 1 – алюминиевый Т-образный радиатор;
- 2 – термическая прокладка;
- 3 – элемент Пельтье;
- 4 – алюминиевая стенка рекуператора;
- 5 – цилиндрические турбулизаторы

Fig. 2. Diagram of a multilayer wall with a corridor arrangement of turbulators: 1 – aluminum T-shaped radiator; 2 – thermal gasket; 3 – Peltier element; 4 – aluminum recuperator wall; 5 – cylindrical turbulators

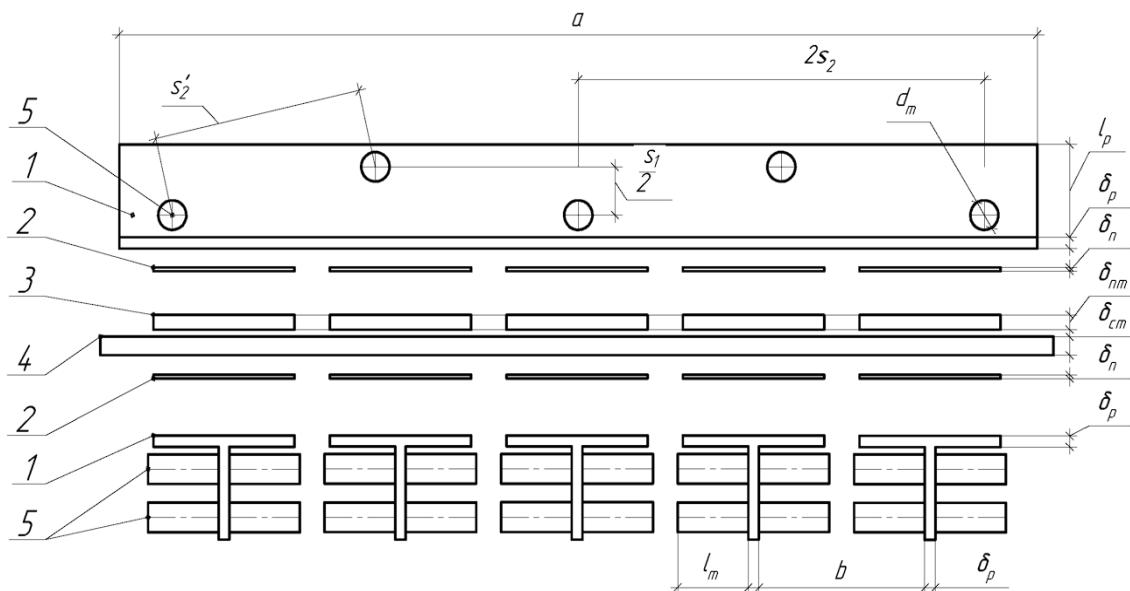


Рис. 3. Многослойная стенка с шахматным расположением турбулизаторов: 1 – алюминиевый Т-образный радиатор; 2 – термическая прокладка; 3 – элемент Пельтье; 4 – алюминиевая стенка рекуператора; 5 – цилиндрические турбулизаторы

Fig. 3. Multilayer wall with staggered turbulators: 1 – aluminum T-shaped radiator; 2 – thermal gasket; 3 – Peltier element; 4 – aluminum recuperator wall; 5 – cylindrical turbulators

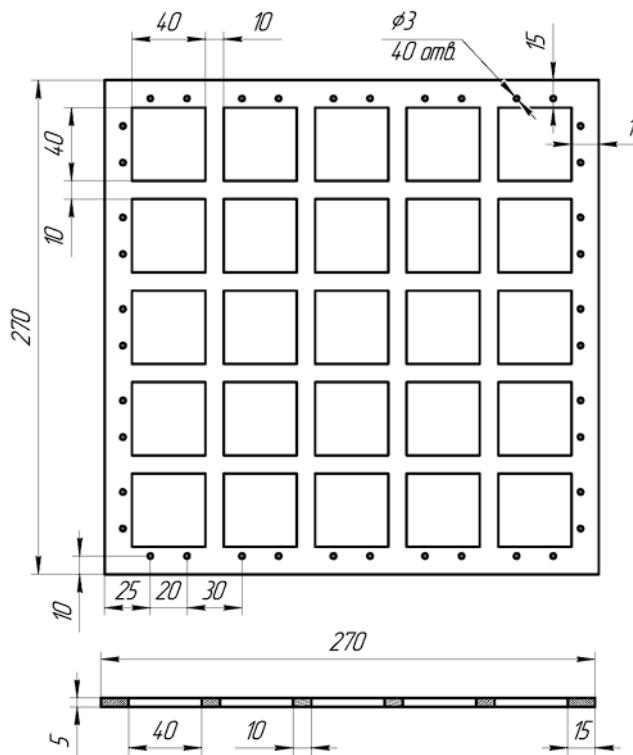


Рис. 4. Схема стенки рекуператора с прямоугольными отверстиями для установки элементов Пельтье

Fig. 4. Diagram of the recuperator wall with rectangular holes for installing Peltier elements

Проведем сравнительный анализ трех вариантов утилизации низкопотенциального тепла сбросных газов и вентиляционных выбросов в системе вентиляции зданий и сооружений.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим основные приёмы рекуперации тепловых потоков, перемещающихся во взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 1б, 1в), использующие турбулизаторы с шахматным и коридорным расположением на ребристых поверхностях, соответственно в зонах горячего и холодного воздушных потоков.

В каждом случае имеем двухрядные пучки турбулизаторов, обдуваемых горячим и холодным воздушным потоком, соответственно в горячих и холодных камерах.

В этих условиях значения критерия Нуссельта для горячего потока:

$$Nu_{\Gamma} = 0,022 Re_{\Gamma}^{0,8} Pr_{\Gamma}^{0,43} \varepsilon_i, \quad (1)$$

где ε_i – поправочный коэффициент,

при $\left(\frac{a}{d_{\Gamma}}\right) \geq 15$, $\varepsilon_i = 1$; при $\left(\frac{a}{d_{\Gamma}}\right) < 15$,

$$\varepsilon_i = 1,38 \left(\frac{a}{d_{\Gamma}}\right)^{-0,12};$$

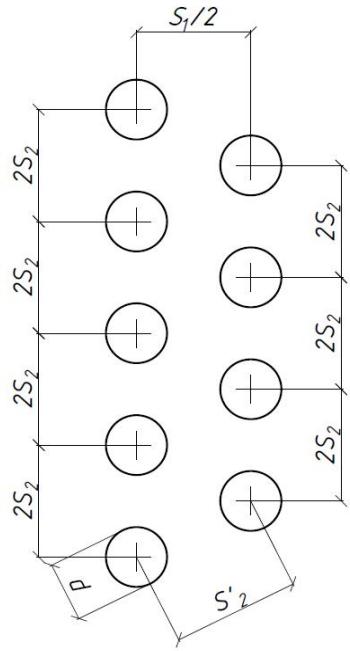
d_{Γ} – эквивалентный диаметр горячего канала, м.

Проведем сравнительный анализ функционирования различных компоновочных схем турбулизаторов: ребристой стенки без турбулизаторов, ребристой стенки соответственно с коридорным и шахматным расположением пучков – цилиндрических турбулизаторов. В каждом случае осуществлялась попутная генерация термоЭДС с помощью плоских полупроводниковых элементов Пельтье.

Анализ данных эксперимента позволяет представить полученную в результате рекуперации мощность Q в виде:

$$\begin{aligned} Q &= Q_3 + Q_t, \quad Q_3 = \beta_1 Q, \\ Q_t &= \beta_2 Q \rightarrow \beta_1 + \beta_2 = 1, \end{aligned} \quad (2)$$

где Q_3 , Q_t – слагаемые мощности Q , расходуемые соответственно на получение термоЭДС и дополнительного подогрева приточного воздуха, Вт;



а)

β_1 , β_2 – доли мощностей Q_3 , Q_t , в составе Q , причем $\beta_1 = 0,8\dots0,9$, $\beta_2 = 0,1\dots0,2$.

Схема расположения пучков турбулизаторов приведена на рис. 5.

Установившийся режим в работе рекуператора будем считать стационарным ввиду того, что температурный напор между стенками со временем практически не меняется. В этом случае уравнение теплопроводности будет иметь вид

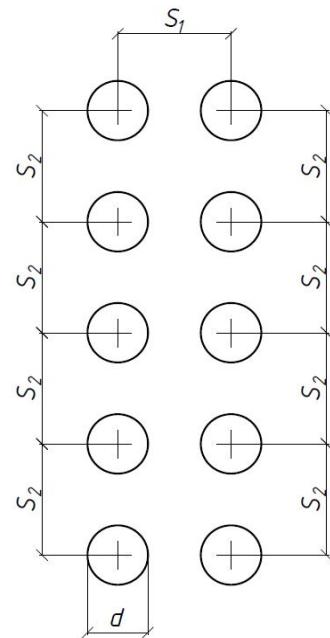
$$\lambda_r \nabla^2 t + \bar{\omega} = 0, \quad (3)$$

где λ_r – коэффициент теплопроводности горячего воздуха, Вт/(м·К);

∇^2 – оператор Лапласа, причем

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0;$$

$\bar{\omega}$ – средняя скорость воздуха в горячем канале рекуператора.



б)

Рис. 5. Схемы расположения пучков турбулизаторов: а – двухрядный шахматный пучок; б – двухрядный коридорный пучок

Fig. 5. Arrangement schemes of turbulator beams: а – double–row staggered beam; б – double–row corridor beam

Предварительно определяются параметры, необходимые для дальнейшего анализа функционирования указанного устройства.

Вычисляются средние температуры \bar{t}_Γ , \bar{t}_x соответственно в горячем и холодном каналах:

$$\bar{t}_\Gamma = \frac{t'_\Gamma + t''_\Gamma}{2}, \quad \bar{t}_x = \frac{t'_x + t''_x}{2}. \quad (4)$$

Расчет эквивалентных диаметров d_1 и d_2 цилиндрических труб находится из отношения

$$d_\Gamma = \frac{4f_\Gamma}{u_\Gamma}, \quad d_x = \frac{4f_x}{u_x}, \quad (5)$$

где $f_\Gamma, f_x, u_\Gamma, u_x$ – соответственно площади сечения и периметры горячего и холодного каналов.

Зависимости (4) и (5) позволяют вычислять значение критерия Рейнольдса в горячем канале:

$$Re_\Gamma = \frac{w_\Gamma d_\Gamma}{v_\Gamma}. \quad (5)$$

Учитывая (1) и (5), получаем значение коэффициента теплоотдачи α_Γ от греющей среды к стенке радиатора:

$$\alpha_\Gamma = Nu_\Gamma \frac{\lambda_\Gamma}{d_\Gamma}. \quad (6)$$

Учитывая расчетные данные по критерию Рейнольдса (1) и (5), аналогично режим функционирования холодного канала также является турбулентным, тогда критерий Нуссельта в этом случае может быть найден из выражения

$$Nu_x = 0,022 Re_x^{0,8} Pr_x^{0,43}, \quad (7)$$

$$\text{где } \varepsilon_x = 1,38 \left(\frac{a}{d_x} \right)^{-0,12} = 1,38 \left(\frac{0,3}{0,07} \right)^{-0,12} = 0,022.$$

Рассмотрим основные характеристики воздушной массы в холодном канале. Критерий Грасгофа определяется из соотношения

$$Gr_x = g d_x^3 \frac{\bar{t}_\Gamma - \bar{t}_x}{(273 + \bar{t}_\Gamma) v_x^2}, \quad (7)$$

где $g = 9,8156 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

С другой стороны, выражение (9) позволяет найти критерий Нуссельта Nu_x в холодном канале по формуле

$$Nu_x = 0,5 (Pr Gr)_x^{0,25}. \quad (8)$$

Соотношения (5) – (10) дают возможность определить значение теплоотдачи α_x от стенки радиатора к нагреваемой среде:

$$\alpha_x = Nu_x \frac{\lambda_x}{d_x}. \quad (9)$$

Опираясь на данные из рис. 2, вычисляются соответственно площадь по-перечного сечения и площадь гладкой части оребренной поверхности f_p термически тонкого ребра

$$\left(\lambda_{top} \rightarrow \infty, \frac{\alpha_{top}}{\lambda} \rightarrow 0 \right):$$

$$f_p = ab, \quad F_p = 2al_p, \quad (10)$$

где α_{top} , λ_{top} – соответственно коэффициенты теплоотдачи и теплопроводности торца ребра.

Дифференциальное уравнение теплопереноса (11) моделирует передачу тепла вдоль оси абсцисс с началом координат в середину горячего канала, учитывая, что коэффициент теплопроводности λ_p ребра гораздо больше коэффициента теплопроводности горячего воздуха λ_x . Это позволяет полагать, что

тепловыми потерями по остальным направлениям можно пренебречь. В этом случае данное уравнение примет вид:

$$\frac{d^2 t(t - \bar{t}_x)}{dx^2} - m(t - \bar{t}_x) = 0, \quad (11)$$

где \bar{t}_x – средняя температура в холодном канале, $t = t(x)$ – текущая температура ребра в сечении x .

Параметр m , $1/m$ определяется по формуле

$$\sqrt{\frac{2\alpha_p}{\lambda_p \delta_p}} l_p, \quad m = \sqrt{\frac{2\alpha_p}{\lambda_p \delta_p}}, \quad (12)$$

где δ_p – периметр ребра м.

Уравнение (11) представим в виде, удобном для интегрирования:

$$d^2(t - \bar{t}_x) - m(t - \bar{t}_x) = 0. \quad (13)$$

В этом случае общее решение имеет вид:

$$t - \bar{t}_x = B_1 \operatorname{ch}(mx) + B_2 \operatorname{sh}(mx), \quad (14)$$

$$\begin{aligned} Q_p &= 2a\alpha_p \int_0^{l_p} (t - \bar{t}_x) dx = 2a\alpha_p \int_0^{l_p} \frac{\Theta_x \operatorname{ch}(ml_p - mx)}{\operatorname{ch}(ml_p)} dx = -\frac{2a\alpha_p \Theta_x}{m \operatorname{ch}(ml_p)} \int_0^{l_p} \operatorname{ch}(ml_p - mx) d(ml_p - mx) = \\ &= -\frac{2a\alpha_p \Theta_x}{m \operatorname{ch}(ml_p)} \operatorname{sh}(ml_p - mx) \Big|_0^{l_p} = \frac{\alpha_p 2a l_p \Theta_x \operatorname{th}(ml_p)}{ml_p} = \alpha_p \Theta_x F_p \frac{\operatorname{th}(ml_p)}{ml_p}, \end{aligned} \quad (16)$$

где $F_p = 2a \cdot l_p$.

Введя обозначение эффективности круглого ребра с эквивалентным ди-

метром d_x в виде $\frac{\operatorname{th}(ml_p)}{ml_p} = A$, имеем

$$Q_p = \alpha_p \Theta_x F_p A = 2A a l_p \alpha_p \Theta_x. \quad (17)$$

С другой стороны, тепло Q_c , отдаваемое гладкой частью оребренной по-

где B_1, B_2 – постоянные интегрирования.

Ввиду того, что проведено $n = 3$ серий экспериментов по $N = 9$ опытов в каждом, в дальнейшем для исследования будем использовать средние температуры горячей и холодной стенок t_{cr} , t_{cx} , а также входной и выходной температуры горячего t'_G , t''_G и холодного t'_X , t''_X каналов.

Используя граничные условия, определяем постоянные интегрирования B_1 и B_2 , если $x = 0$, то $\Theta_x = t_{cx} - \bar{t}_x$, при $x = l_p$, то $\frac{\partial \Theta}{\partial x} \Big|_{x=l_p} = 0$ и прийти к соотношению:

$$\frac{t - \bar{t}_x}{t_{cx} - \bar{t}_x} = \frac{\operatorname{ch}(m(l_p - x))}{\operatorname{ch}(ml_p)}, \quad (15)$$

где t_{cx} – температура основания ребра.

Вследствие этого полный тепловой поток Q_p с поверхности ребра определяется выражением:

$$\begin{aligned} Q_p &= \alpha_p \Theta_x F_p \frac{\operatorname{th}(ml_p)}{ml_p} = \alpha_p \Theta_x F_p \frac{\operatorname{th}(ml_p)}{ml_p} = \alpha_p \Theta_x F_p \frac{\operatorname{th}(ml_p)}{ml_p}, \end{aligned} \quad (16)$$

верхности площадью F_c , определяется из соотношения:

$$Q_c = \alpha_c \Theta_x F_c = a(b + \delta) \alpha_c \Theta_x, \quad (18)$$

где $F_c = a(b + \delta)$.

Анализируя соотношения (17) и (18), сделаем вывод, что дальнейший рост высоты ребра приводит к спаду

эффективности рекуператора. В этом случае его эффективность (КПД) можно увеличить за счет установки дополнительных турбулизаторов в виде металлических цилиндров, смонтированных по коридорной или шахматной схемам на ребрах, что позволяет получить увеличение рекуперации и дает возможность получить попутное тепло соответственно: $Q_{\text{тк}}$ – от коридорной схемы, $Q_{\text{тш}}$ – от шахматной схемы, причем:

$$\begin{aligned} Q_{\text{тк}} &= \alpha_{\text{тк}} (t_{\text{сж}} - \bar{t}_{\text{x}}) \pi d h z_{\text{тк}} = \\ &= \alpha_{\text{тк}} \Theta_x F_t z_{\text{тк}}; \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{тш}} &= \alpha_{\text{тш}} (t_{\text{сж}} - \bar{t}_{\text{x}}) \pi d h z_{\text{тш}} = \\ &= \alpha_{\text{тш}} \Theta_x F_t z_{\text{тш}}, \end{aligned} \quad (20)$$

где $\alpha_{\text{к}}$, $\alpha_{\text{ш}}$, $z_{\text{тк}}$, $z_{\text{тш}}$, $F_t = \pi d h$ – соответственно коэффициенты теплоотдачи коридорных и шахматных турбулизаторов, их количество и боковая поверхность.

Следует отметить, что коэффициенты теплоотдачи $\alpha_{\text{к}}$, $\alpha_{\text{ш}}$ отличаются от справочного значения одиночного турбулизатора α_t . Это связано с характером размещения турбулизаторов на ребрах, заметно влияющих на процесс рекуперации. Это отличие определяется зависимостями $\alpha_{\text{к}} = \gamma_{\text{к}} \alpha_t$, $\alpha_{\text{ш}} = \gamma_{\text{ш}} \alpha_t$, где $\gamma_{\text{к}}, \gamma_{\text{ш}} = \text{const}$. Из этого следует

$$\begin{aligned} Q_{\text{тк}} &= \gamma_{\text{к}} \alpha_t \Theta_{\text{хк}} F z_{\text{тк}}, \\ Q_{\text{тш}} &= \gamma_{\text{ш}} \alpha_t \Theta_{\text{хш}} F_t z_{\text{тш}}, \end{aligned} \quad (21)$$

где $\alpha_t = \alpha_{\text{ал}}$.

Общее количество тепла Q_{xi} , отдаваемого ребром с турбулизаторами в холодном канале, определяется выражением

$$Q_{xi} = Q_p + Q_c + Q_{xti}, \quad (22)$$

где $i = 0, \text{ш}, \text{к}$. Если $i = 0$, то $Q_{xto} = 0$ – ребра не содержат турбулизаторов; если

$i = \text{ш}$, то $Q_{xti} = Q_{xth}$ – турбулизаторы смонтированы по шахматной схеме; если $i = \text{к}$, то $Q_{ti} = Q_{tk}$ – турбулизаторы смонтированы по коридорной схеме.

Учитывая (20) – (22), получаем:

$$\begin{aligned} Q_{xi} &= \alpha_p \Theta_{xi} F_p A + \alpha_c \Theta_{xi} F_c + \\ &+ \alpha_{ti} \Theta_{xi} F_t z_{ti}, \end{aligned} \quad (23)$$

где индекс $i = 0, \text{ш}, \text{к}$ – аналогичен тем же схемам турбулизаторов, что и в соотношениях (19) – (22);

z_{ti} – число турбулизаторов.

С другой стороны, Q_{xi} можно представить в виде:

$$Q_{xi} = \alpha_{\text{пр}} \Theta_{xi} F_{\text{пр}}, \quad (24)$$

где $\alpha_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

$F_{\text{пр}}$ – приведенная площадь оребренной поверхности, содержащей турбулизаторы.

Получим приведенный коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_{\text{пр}} = \alpha_p A \frac{F_p}{F_{\text{пр}}} + \alpha_c \frac{F_c}{F_{\text{пр}}} + \alpha_{ti} z_{ti} \frac{F_t}{F_{\text{пр}}}. \quad (25)$$

Выводы

Создана математическая модель тепловых процессов с разливным расположением цилиндрических турбулизаторов (шахматным, коридорным), в пластинчатом рекуператоре в квазистационарном тепловом режиме.

Предложена методика определения коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи комплексного многослойного пластинчатого рекуператора с повышенной турбулизацией воздушных потоков.

Разработана математическая модель, описывающая работу комбинированной системы утилизации сбросных газов и вентиляционных выбросов, включающую потокораспределение в каналах пластинчатого рекуператора, утилизацию теплоты с использованием термоэлектрических элементов Пельтье и их влия-

ния на процесс теплопередачи через плоскую многослойную стенку, которая в дальнейшем позволит создать методику проектирования высокоэффективных и экономичных систем утилизации теплоты, оптимизировать процессы тепло- и массообмена, проводить численные эксперименты с оценкой экономической эффективности.

Список литературы

1. Численное определение границ вихревых зон на входе в круглые отсосы-раструбы над плоскостью / К. И. Логачев, А. М. Зиганшин, О. В. Тирон [и др.]. // Строительство и техногенная безопасность. 2022. № S1. С. 251–260.
2. Системы отопления при нестационарном температурном режиме на основе комбинированного теплогенератора / Ф. А. Кешвединова, А. С. Умеров, С. А. Егоров [и др.]. // Строительство и техногенная безопасность. 2022. № 25(77). С. 87–90.
3. Елистратова Ю. В. Повышение эффективности пластинчатых теплообменных устройств в системах теплоснабжения. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2022. 182 с.
4. Интенсифицированный пластинчатый теплообменный аппарат в системах теплоснабжения ЖКХ РФ / Л. А. Кущев, В. А. Уваров, Н. Ю. Саввин, С. В. Чуйкин. // Научный журнал строительства и архитектуры. 2021. № 2(62). С. 60-69. DOI 10.36622/VSTU.2021.62.2.004.
5. Исследование влияния структуры потока на коэффициент гидравлического сопротивления / Т. В. Дихтярь, О. Н. Зайцев, К. С. Дихтярь, И. П. Ангелюк // Строительство и техногенная безопасность. 2021. № 22(74). С. 129-133. DOI 10.37279/2413-1873-2021-22-129-133.
6. Кущев Л. А., Саввин Н. Ю. Исследования пластинчатого теплообменного аппарата с развитой поверхностью теплообмена // Автоматизация и энергосбережение в машиностроении, энергетике и на транспорте: материалы XV Международной научно-технической конференции. Вологда: ВоГУ, 2021. С. 130–133.
7. Особенности распределения потоков жидкости в пластинчатых теплообменниках / Ю. В. Елистратова, А. С. Семиненко, В. А. Минко, Р. С. Рамазанов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2020. № 12. С. 47-55. DOI 10.34031/2071-7318-2020-5-12-47-55.
8. Кущев Л. А., Мелькумов В. Н., Саввин Н. Ю. Компьютерное моделирование движения теплоносителя в гофрированном канале пластинчатого теплообменника //

Научный журнал строительства и архитектуры. 2020. № 4(60). С. 51-58. DOI 10.36622/VSTU.2020.60.4.005.

9. Саввин Н. Ю., Никулин Н. Ю. Высокоэффективный теплообменный аппарат для системы жилищно-коммунального хозяйства // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов, Новосибирск, 2–6 декабря 2019 г.: в 9 ч. / под ред. А. В. Гадюкиной. Новосибирск: НГШТУ, 2019. Ч. 4. С. 256–261.

10. Зайцев О. Н., Ангелюк И. П. Технико-экономическое обоснование использования системы рекуперации теплоты дымовых газов // Строительство и техногенная безопасность. 2019. № 16(68). С. 99–104.

11. Zaycev O. N., Angeluck I. P., Toporen S. S. Experimental study of the aerodynamic resistance of a conical-spiral heat exchanger of the outgoing flue gases // IOP Conference Series. Materials Science and Engineering. International Scientific Conference. Kislovodsk, 2019. Vol. 698 (5). P. 055033. DOI 10.1088/1757-899X/698/5/055033.

12. Зайцев О. Н., Ангелюк И. П., Степанцова Н. А. Конусно-спиральный рекуператор теплоты отходящих дымовых газов бытовых котлов // Строительство и техногенная безопасность. 2018. № 13(65). С. 159–161.

13. Аверкова О. А., Логачев К. И., Уваров В. А. Энергосбережение в системах вытяжной вентиляции // Строительство и техногенная безопасность. 2018. № 11(63). С. 137–146.

14. Ангелюк И. П. Утилизация теплоты отходящих дымовых газов бытовых котлов // Строительство и техногенная безопасность. 2016. № 5(57). С. 32–33.

15. Разработка кожухотрубного теплообменного аппарата с измененной геометрической поверхностью / Н. Ю. Никулин, Л. А. Кущев, В. С. Семенок, Д. А. Немцов // Международный студенческий научный вестник. 2015. № 3-1. С. 99–101.

16. Тютюнов Д. Н., Студеникина Л. И., Скрипкина Е. В. Функции нескольких переменных. Курск, 2016. 158 с.

17. Тютюнов Д. Н., Студеникина Л. И. Неопределённый интеграл. Техника интегрирования. Старый Оскол: ТНТ, 2016. 116 с.

18. Федоров С. С., Тютюнов Д. Н. Управление системой многоконтурного теплоснабжения зданий при зависимом подключении к тепловым сетям. Курск, 2017. 182 с.

19. Version of a mathematical model of purge ventilation system with a complex recuperative heat exchanger / V. Ezhov, N. Semicheva, A. Burtsev [et al.] // Journal of Applied Engineering Science. 2021. Vol. 19, no 1. P. 246–251. DOI 10.5937/jaes0-30068.

20. Independant power supply source for the station of cathodic protection of pipelines against corrosion / V. S. Ezhov, N. E. Semicheva, A. Burtsev [et al.] // Journal of Applied Engineering Science. 2017. Vol. 15, no 4. P. 501–504. DOI 10.5937/jaes15-15450.

21. Experimental calculation of the main characteristics of thermoelectric EMF source for the cathodic protection station of heat supply system pipelines / V. Yezhov, N. Semiche-

va, A. Burtsev, N. Perepelitsa // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Vol. 1259. P. 225–237. DOI 10.1007/978-3-030-57453-6_19.

22. Development of experimental designs of the integrated heater for the disposal of low-potential waste heat of ventilation emissions / V. S. Ezhov, N. S. Semicheva, A. P. Burtsev [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Brasov, 2020. Vol. 789. P. 012020. DOI 10.1088/1757-899X/789/1/012020.

References

1. Logachev K. I., Ziganshin A.M., Tiron O. V., et al. Numerical determination of the boundaries of vortex zones at the entrance to circular suction sockets above the plane. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' = Construction and technogenic safety*. 2022; (S1): 251-260. (In Russ.).
2. Keshvedinova F. A., Umerov A. S., Egorov S. A., et al. Heating systems for non-stationary temperature conditions based on a combined heat generator. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' = Construction and technogenic safety*. 2022; (25): 87-90. (In Russ.).
3. Elistratova Yu.V. Improving the efficiency of plate heat exchange devices in heat supply systems. Belgorod: Belgorodskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet im. V. G. Shukhova; 2022. 182 p. (In Russ.).
4. Kushchev L. A., Uvarov V. A., Savvin N. Yu., Chuikin S. V. The intensified plate heat exchanger in heat supply systems of housing and communal services of the Russian Federation. *Nauchnyi zhurnal stroitel'stva i arkhitektury = Scientific Journal of Construction and Architecture*. 2021; (2): 60-69. (In Russ.). DOI 10.36622/VSTU.2021.62.2.004..
5. Dikhtyar T. V., Zaitsev O. N., Dikhtyar K. S., Angelyuk I. P. Investigation of the influence of the flow structure on the coefficient of hydraulic resistance. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' = Construction and technogenic safety*. 2021; (22): 129-133. (In Russ.). DOI 10.37279/2413-1873-2021-22-129-133.
6. Kushchev L. A., Savvin N. Yu. Studies of a plate heat exchanger with a developed heat exchange surface. In: *Avtomatizatsiya i energosberezenie v mashinostroenii, energetike i na transporte: materialy XV Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii = Automation and energy saving in mechanical engineering, energy and transport Proceedings of the XV International Scientific and Technical Conference*. Vologda; 2021. P. 130-133. (In Russ.).
7. Elistratova Yu. V., Seminenko A. S., Minko V. A., Ramazanov R. S. Features of the distribution of liquid flows in plate heat exchangers. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova = Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*. 2020; (12): 47-55. (In Russ.). DOI 10.34031/2071-7318-2020-5-12-47-55.

8. Kushchev L. A., Melkumov V. N., Savvin N. Yu. Computer simulation of the movement of a coolant in a corrugated channel of a plate heat exchanger. *Nauchnyi zhurnal stroitel'stva i arkhitektury = Scientific Journal of Construction and Architecture*. 2020; (4): 51-58. (In Russ.). DOI 10.36622/VSTU.2020.60.4.005.
9. Savvin N. Y., Nikulin N. Y. Highly efficient heat exchanger for housing and communal services. In: *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii: sbornik nauchnykh trudov = Science. Technologies. Innovations. Collection of scientific papers*. Novosibirsk: NGSTU; 2019. Part 4. P. 256-261. (In Russ.).
10. Zaitsev O. N., Angelyuk I. P. Feasibility study of the use of flue gas heat recovery system. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' = Construction and technogenic safety*. 2019; (16): 99-104. (In Russ.).
11. Zaycev O. N., Angeluk I. P., Toporen S. S. Experimental study of the aerodynamic resistance of a conical-spiral heat exchanger of the outgoing flue gases. In: *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering. International Scientific Conference*. Kislovodsk; 2019; 698: 055033. (In Russ.). DOI 10.1088/1757-899X/698/5/055033.
12. Zaitsev O. N., I. Angelyuk. P., N. A. Stepantsova Cone-spiral heat recovery unit for exhaust flue gases of domestic boilers. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' = Construction and technogenic safety*. 2018; (13): 159-161. (In Russ.).
13. Averkova O. A., Logachev K. I., Uvarov V. A. Energy saving in exhaust ventilation systems. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' = Construction and technogenic safety*. 2018; (11): 137-146. (In Russ.).
14. Angelyuk, I. P. Utilization of heat from exhaust flue gases of domestic boilers. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' = Construction and technogenic safety*. 2016; (5): 32-33. (In Russ.).
15. Nikulin N. Y., Kushchev L. A., Semenok V. S., Nemtsev D. A. Development of a shell-and-tube heat exchanger with a modified geometric surface. *Mezhdunarodnyi studencheskii nauchnyi vestnik = International Student Scientific Bulletin*. 2015; (3-1): 99-101. (In Russ.).
16. Tyutyunov D. N., Studenikina L. I., Skripkina E. V. Functions of several variables. Kursk; 2016. 158 p. (In Russ.).
17. Tyutyunov D. N., Studenikina L. I. Indefinite integral. Integration technique. Stary Oskol: TNT; 2016. 116 p. (In Russ.).
18. Fedorov S. S., Tyutyunov D. N. Management of a multi-circuit heating supply system for buildings with dependent connection to heating networks. Kursk; 2017. 182 p. (In Russ.).
19. Ezhov V., Semicheva N., Burtsev A., et al. Version of a mathematical model of purge ventilation system with a complex recuperative heat exchanger. *Journal of Applied Engineering Science*. 2021; 19(1): 246–251. (In Russ.). DOI 10.5937/jaes0-30068.

20. Ezhov V. S., Semicheva N. E., Burtsev A., et al. Independant power supply source for the station of cathodic protection of pipelines against corrosion. *Journal of Applied Engineering Science*. 2017; 15(4): 501–504. (In Russ.). DOI 10.5937/jaes15-15450.
21. Yezhov V., Semicheva N., Burtsev A., Perepelitsa N. Experimental calculation of the main characteristics of thermoelectric EMF source for the cathodic protection station of heat supply system pipelines. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021; 1259: 225–237. (In Russ.). DOI 10.1007/978-3-030-57453-6_19.
22. Ezhov V. S., Semicheva N. S., Burtsev A. P., et al. Development of experimental designs of the integrated heater for the disposal of low-potential waste heat of ventilation emissons. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Brasov; 2020; 789: 012020. (In Russ.). DOI 10.1088/1757-899X/789/1/012020.

Информация об авторе / Information about the Author

Бурцев Алексей Петрович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры инфраструктурных энергетических систем, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ap_burtsev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2003-960X>, ScopusID: 57090197100

Alexey P. Burtsev, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Lecturer of the Infrastructure Energy Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ap_burtsev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2003-960X>, ScopusID: 57090197100

УДК 004.415.25

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-86-98>



Применение глубокого обучения сверточной нейронной сети для классификации жестов из набора данных Sign Language MNIST

М.В. Бобырь¹✉, А.А. Асеев¹

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

✉ e-mail: fregat_mn@rambler.ru

Резюме

Цель исследования. Задача распознавания жестов в системах компьютерного зрения имеет важное значение для разработки доступных интерфейсов взаимодействия человека с компьютером, в том числе и для людей с ограниченными возможностями. Традиционные методы, например использование ручного выделения признаков (HOG, SIFT) в сочетании с классификаторами типа SVM, обладают ограниченной точностью и чувствительны к изменениям освещения, фона и позы руки. Целью данной работы является построение и обучение сверточной нейронной сети (CNN) для эффективной классификации жестов на основе набора данных Sign Language MNIST. В рамках исследования решались задачи предобработки данных, проектирования архитектуры модели, её обучения и оценки качества распознавания на тестовом наборе.

Методы. Использовались библиотеки TensorFlow и Keras для реализации CNN. Модель включает сверточные слои для извлечения локальных признаков, слой Flatten для векторизации, полносвязные слои с функцией активации ReLU и выходной слой с Softmax. Обучение проводилось с использованием оптимизатора Adam и функции потерь sparse_categorical_crossentropy на 27 455 изображениях, тестирование — на 7 172 примерах.

Результаты. Предложенная модель достигла точности 89,14 % на тестовом наборе данных после 18 эпох обучения, что превосходит результаты традиционных методов (HOG + SVM — 70,1 %) и простых нейронных сетей (78,4 %).

Заключение. Применение сверточных нейронных сетей для классификации жестов является эффективным подходом, обеспечивающим высокую точность и устойчивость к вариациям входных данных, что делает его перспективным для задач компьютерного зрения и разработки систем жестового взаимодействия.

Ключевые слова: нейронная сеть; сверточная нейронная сеть; полносвязный слой; функция активации; функция потерь; Sign Language MNIST; CPU; GPU.

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

Для цитирования: Бобырь М.В., Асеев А.А. Применение глубокого обучения сверточной нейронной сети для классификации жестов из набора данных Sign Language MNIST // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(3): 86-98. <https://doi.org/10.21869/-2223-1560-2025-29-3-86-98>.

Поступила в редакцию 14.05.2025

Подписана в печать 23.06.2025

Опубликована 30.09.2025

Applying deep learning convolutional neural network to classify gestures from MNIST Sign Language dataset

Maksim V. Bobyr¹✉, Artem A. Aseev¹

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

✉ e-mail: fregat_mn@rambler.ru

Abstract

Relevance. Gesture recognition in computer vision systems is important for the development of accessible human-computer interaction interfaces, including for people with disabilities. Traditional methods, such as manual feature extraction (HOG, SIFT) in combination with SVM classifiers, have limited accuracy and are sensitive to changes in lighting, background, and hand pose.

Purpose of research. The aim of this work is to build and train a convolutional neural network (CNN) for efficient gesture classification based on the Sign Language MNIST dataset. The study addressed the problems of data preprocessing, model architecture design, training, and recognition quality assessment on the test set.

Methods. TensorFlow and Keras libraries were used to implement the CNN. The model includes convolutional layers for local feature extraction, a Flatten layer for vectorization, fully connected layers with a ReLU activation function, and an output layer with Softmax. The training was performed using the Adam optimizer and the sparse_categorical_crossentropy loss function on 27,455 images, and testing was performed on 7,172 examples.

Results. The proposed model achieved 89.14% accuracy on the test dataset after 18 training epochs, which outperforms traditional methods (HOG + SVM - 70.1%) and simple neural networks (78.4%).

Conclusion. The use of convolutional neural networks for gesture classification is an effective approach that provides high accuracy and is robust to variations in input data, making it promising for computer vision and gesture interaction systems.

Keywords: neural network; convolutional neural network; fully connected layer; activation function; loss function; Sign Language MNIST; CPU; GPU.

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

For citation: Bobyr M. V., Aseev A. A. Applying deep learning convolutional neural network to classify gestures from MNIST Sign Language dataset. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(3): 86-98 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-86-98>.

Received 14.05.2025

Accepted 23.06.2025

Published 30.09.2025

Введение

Сверточные нейронные сети (CNN) представляют собой мощный инструмент

глубокого обучения, широко применяемый для задач компьютерного зрения, включая классификацию изображений. Впервые предложенные Яном Лекуном

в 1988 году [1], CNN изначально требовали значительных вычислительных ресурсов, что ограничивало их использование до появления графических процессоров (GPU). С 2012 года, после победы AlexNet в конкурсе ImageNet [2], сверточные сети начали доминировать в задачах распознавания образов, вытесняя классические методы машинного обучения [3, 4].

Классификация жестов, таких как в наборе данных Sign Language MNIST, является одной из актуальных задач компьютерного зрения, находящей применение в системах управления устройствами, интерфейсах для людей с ограниченными возможностями и образовательных платформах. Однако традиционные подходы к решению этой задачи, такие как методы на основе ручного выделения признаков (например, гистограммы ориентированных градиентов (HOG) или SIFT [5]), демонстрируют ограниченную точность и чувствительность к вариациям освещения и фона. Например, исследование показало, что классификаторы, использующие HOG в сочетании с алгоритмом SVM, достигают точности лишь около 70% на аналогичных наборах данных жестов, что значительно ниже современных CNN [6].

Другой альтернативой являются простые полносвязные нейронные сети, которые, несмотря на свою универсальность, требуют большого количества параметров и склонны к переобучению на задачах с изображениями. В работе Ли и др. было продемонстрировано, что пол-

носвязная сеть с двумя скрытыми слоями достигает точности около 78% на наборе Sign Language MNIST, но требует значительно больше времени на обучение и плохо обобщает на новых данных [7]. Кроме того, такие сети не способны эффективно извлекать локальные признаки, что делает их менее подходящими для обработки изображений по сравнению с CNN, которые используют сверточные слои для автоматического выделения иерархических признаков [8].

В данной статье предлагается подход, основанный на применении сверточной нейронной сети, реализованной с использованием библиотек TensorFlow и Keras, для классификации жестов из набора данных Sign Language MNIST. Этот набор включает 34 627 изображений жестов, представляющих буквы американского жестового языка (ASL), и разделен на 27 455 обучающих и 7 172 тестовых примера. Предложенная модель использует сверточные слои для извлечения признаков и полносвязные слои для классификации, что позволяет достичь высокой точности (89.1% на тестовом наборе) за 18 эпох обучения. Такой подход превосходит традиционные методы и простые нейронные сети по точности, скорости обучения и устойчивости к вариациям данных, обеспечивая эффективное решение задачи классификации жестов.

Материалы и методы

В качестве набора данных использован Sign Language MNIST, который

включает 34 627 изображений жестов рук, представляющих буквы алфавита американского жестового языка (ASL). Из них 27 455 изображений используются для обучения, а 7 172 – для тести-

рования. Все изображения имеют размер 28x28 пикселей в оттенках серого и принадлежат одной из 24 категорий, показанных на рис. 1.



Рис. 1. Категории жестов из датасета Sign Language MNIST

Fig. 1. Gesture Categories from the MNIST Sign Language Dataset

На рис. 1 приведена часть (12) категорий символов, каждый из которых соответствует своему классу: 2 – С; 0 – А; 1 – В; 4 – Е; 8 – И; 13 – Н; 14 – О; 17 – Р; 18 – С; 19 – Т; 21 – В; 22 – В.

Набор данных, частично состоящий из перечисленных категорий жестов, загружается автоматически с использованием TensorFlow [9]:

Python:

```
sign_language_mnist =
tf.keras.datasets_sign_language_mnist
(train_images, train_labels),
(test_images, test_labels) =
sign_language_mnist_load_data()
```

Этап предобработки данных представлен процессом нормализации. Под нормализацией подразумевается процесс приведения входных значений к единому масштабу, что ускоряет сходимость градиентного спуска и стабилизирует процесс обучения [10]. В нейросетях нормализация особенно важна, так как разные диапазоны значений входных данных могут привести к нестабильности весов и увеличению времени обучения [11].

Нормализация применяется к изображениям, текстовым данным и числовым признакам. В случае изображений, как в Sign Language MNIST, пиксельные значения находятся в диапазоне

[0, 255], и их нормализуют в диапазон [0, 1] или [-1, 1].

В коде нормализация описывается следующим образом:

Python:

```
train_images = train_images / 255.0
test_images = test_images / 255.0
```

Такой метод основан на мин-макс нормализации, которая определяется выражением:

$$X_{flat} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (1)$$

где X – исходное изображение пикселя (от 0 до 255); X_{\min} – минимальное значение в исходном диапазоне (0); X_{\max} – максимальное значение в исходном диапазоне (255).

Это означает, что все значения приводятся к диапазону [0, 1], что помогает модели быстрее обучаться и снижает вероятность возникновения нестабильных весов.

Архитектура нейронной сети включает в себя следующие слои:

`Flatten()`: Преобразует двумерное изображение размерностью 28*28 пикселей в одномерный вектор длиной 784 элементов. Преобразование `Flatten` слоя описывается следующей формулой:

$$X_{norm} = R_i, i = 1 \dots 784. \quad (2)$$

`Dense(512, activation = 'relu')`: Полносвязный слой с 512 нейронами и функцией активации ReLU. Функция обработки слоя определяется следующим выражением:

$$b_1 = \text{ReLU}(W_1 X_{flat} + b_1), \quad (3)$$

где X – входной вектор (X_{flat} после `Flatten`); W – матрица весов слоя; b – вектор смещения; ReLU – функция активации; h – выходной вектор после слоя.

Использование функции активации ReLU (Rectified Linear Unit) в скрытых слоях позволяет нейронной сети обучаться быстрее и избегать проблемы затухающих градиентов. Функция активации ReLU представлена в следующем виде:

$$\text{ReLU}(x) = \max(0, x), \quad (4)$$

где x – входное значение в нейроне; $\text{ReLU}(x)$ – выход после активации, при этом отрицательные значения заменяются на 0.

`Dense(256, activation = 'relu')`: Полносвязный слой с 256 нейронами и функцией активации ReLU. Функция обработки слоя с использованием ReLU описывается следующей формулой:

$$h_2 = \text{ReLU}(W_2 X_{flat} + b_2), \quad (5)$$

`Dense(10, activation = 'softmax')`: Выходной слой с 10 нейронами и функцией активации softmax. Функция обработки слоя с использованием Softmax описывается следующей формулой:

$$y = \text{Softmax}(W_3 h_2 + b_3), \quad (6)$$

где y – выходной вектор после слоя; `softmax` – функция активации; h_2 – выходной вектор после предыдущего слоя.

Функция активации Softmax необходима для преобразования выходных значений в вероятностное распределение по категориям [12]. Эта функция представлена в следующем виде:

$$\text{Softmax}(z_i) = \frac{e^{z_i}}{\sum_{i=1}^{10} e^{z_i}}, \quad (7)$$

где z_i – входные значения; e^{z_i} – экспоненциальное преобразование.

Рассмотрим структуру сверточной нейронной сети. На рис. 2 представлена архитектура модели, отображающая по-

следовательность слоев, процесс обучения и их взаимосвязь.

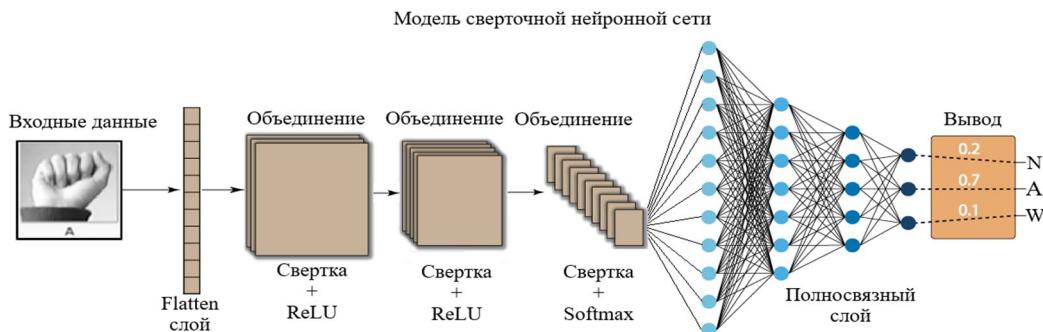


Рис. 2. Модель сверточной нейронной сети, обученной на наборе данных Sign Language MNIST

Fig. 2. Convolutional Neural Network Model Trained on the Sign Language MNIST Dataset

Flatten слой преобразует многомерный тензор в одномерный вектор, что необходимо при передаче данных от сверточных слоев к полносвязным. Например, если входной тензор имеет раз мерность $28 \times 28 \times 64$. Этот слой просто «разворачивает» его в последовательность чисел длиной 50176. Это необходимо, потому что большинство классических классификационных алгоритмов, таких как полносвязные нейронные сети, требуют одномерного представления данных [13].

Далее происходит обработка сверточным слоем. Это, пожалуй, самый важный элемент в сверточных нейросетях, поскольку именно он отвечает за извлечение признаков. В отличие от полносвязных слоев, которые анализируют входные данные в их целостности, сверточный слой действует локально, используя фильтры (или ядра) для сканирования изображения небольшими участками. Эти фильтры могут быть разных размеров, но чаще всего встречаются 3×3 или 5×5 .

Они работают по принципу скользящего окна: проходя по изображению, фильтры «реагируют» на определенные паттерны – углы, границы, текстуры. Это позволяет нейросети автоматически выделять ключевые особенности объектов, такие как контуры, формы или даже более сложные структуры на более поздних уровнях.

Процесс работы сверточного слоя можно представить как просмотр фотографии через небольшое окно, в котором постепенно фиксируются наиболее важные детали. Однако в отличие от простого визуального осмотра, здесь на каждом шаге фильтр выполняет математическую операцию свертки – перемножает значения пикселей на свои весовые коэффициенты и суммирует их. Итогом становится карта признаков – своего рода переработанное изображение, где уже выделены важные элементы. Чем глубже слой, тем более сложные и абстрактные признаки он может выявлять: первые слои, как правило, замечают лишь простые границы и формы, а более поздние

способны определять силуэты жестов, отделять руки от фона или даже различать пальцы на фоне ладоней.

Когда все признаки выделены, следующим этапом обычно идет полно связанный слой. Это классический элемент нейросетей, который соединяет каждый нейрон предыдущего слоя со всеми нейронами следующего. В отличие от сверточных слоев, которые обрабатывают данные локально, полно связанные слои рассматривают входной вектор целиком, что делает их очень мощным инструментом для классификации. По сути, они выполняют линейное преобразование входных данных с помощью весов и смещений, а затем применяют к результату нелинейную функцию активации, например, ReLU или Softmax.

Вместе вышеперечисленные слои образуют фундамент большинства современных моделей обработки изображений. Свёрточные слои вычисляют признаки, Flatten помогает передать их в линейное пространство, а полно связанные слои принимают финальное решение.

В процессе обучения модели применялся оптимизатор Adam и функция потерь sparse_categorical_crossentropy.

Adam – один из самых популярных оптимизаторов в глубоких нейросетевых моделях. Он совмещает в себе два алгоритма: Momentum – использует экспоненциальное сглаживание градиента, чтобы ускорять движение в нужном направлении и избегать колебаний. RMSprop – адаптивно изменяет шаг обучения для каждого параметра, уменьшая

его, если градиенты имеют большую дисперсию [14]. Adam решает проблемы стандартного градиентного спуска, который используется для обновления весов и минимизации потерь. Веса в классической реализации градиентного спуска обновляются по формуле

$$\omega = \omega - \alpha \cdot \nabla L \quad (8)$$

где ω – текущие параметры модели; α – скорость обучения; ∇L – градиент функции потерь L .

Однако стандартный градиентный спуск зачастую работает неэффективно из-за резких изменений градиентов. Adam решает проблему следующим образом: Подсчетом первого момента (экспоненциальное сглаживание градиента) Adam отслеживает среднее значение градиентов m_t . Процесс описывается следующей формулой

$$m_t = \beta_1 m_{t-1} + (1 - \beta_1) \cdot \nabla L_t, \quad (9)$$

где β_1 – гиперпараметр (обычно 0.9), который контролирует влияние предыдущего значения. Это позволяет "запоминать" прошлые градиенты и производить процесс обучения более плавно.

Подсчетом второго момента (среднеквадратичное сглаживание) Adam отслеживает среднее значение градиентов u_t . Процесс описывается следующей формулой:

$$u_t = \beta_2 u_{t-1} + (1 - \beta_2) (\nabla L_t) \cdot (\nabla L_t), \quad (10)$$

где β_2 – гиперпараметр (обычно 0.999), который контролирует влияние предыдущего значения. Это позволяет "запоминать" прошлые градиенты и обучать более плавно.

Так как m_t и u_t в начале обучения стремятся к нулю, используется коррекция смещения:

$$m_t = \frac{m_t}{1 - \beta_1^t}, \quad u_t = \frac{u_t}{1 - \beta_2^t}. \quad (11)$$

Исходя из всех модификаций классического градиентного спуска Adam, веса обновляются по следующей формуле:

$$\omega = \omega - \frac{\alpha}{\sqrt{u_t + \epsilon}} \cdot m_t, \quad (12)$$

где ϵ (обычно 10^{-8}) используется для предотвращения деления на ноль.

Таким образом, Adam оптимизирует обучение для каждого параметра, что делает его эффективнее, чем стандартный градиентный спуск [15].

Следующим шагом обучения является функция потерь

`sparse_categorical_crossentropy`, которая измеряет, насколько предсказания модели отличаются от реальных меток классов. Данная функция используется, когда задача обучения классификационная и метки классов представ-

лены целыми числами [16]. Учитывая перечисленные факторы, функция вычисляется по следующей формуле:

$$L = -\sum_{i=1}^c y_i \log(u_i), \quad (13)$$

где c – количество классов; y_i – метка истинности (0 или 1); u_i – предсказанная вероятность класса i .

Получается, что в случае, если модель предсказала распределение $[0.1, 0.7, 0.2]$, как на рис. 2, то функция потерь будет:

$$L = -\log(0.7) = 0.36. \quad (14)$$

Обучение проводилось в течение 18 эпох и описано в коде следующим образом:

Python:

```
model.compile(optimizer = 'adam',
loss = "sparse_categorical_crossentropy",
metrics=['accuracy'])
model.fit(train_images, train_labels,
epochs = 18)
```

Динамика обучения модели относительно обучающих и тестовых данных показана на графике рис. 3.

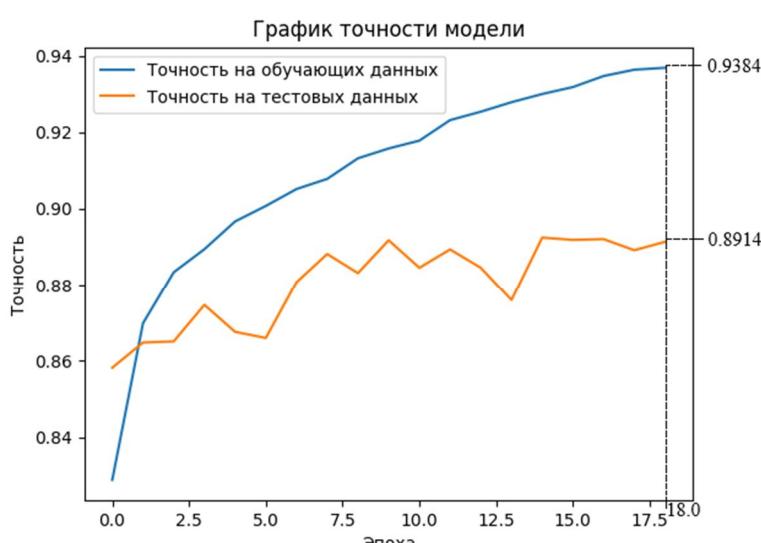


Рис. 3. График точности модели по эпохам относительно обучающих и тестовых данных

Fig. 3. Plot of model accuracy over epochs against training and test data

По графику понятно, что за 18 эпох обучения нейросеть достигла достаточно высокой точности как при проверке на обучающих данных (93.84%), так и при проверке на тестовых данных (89.14%).

Результаты моделирования работы обученной модели распознавания жестов представлены в разделе «Результаты и их обсуждение».

Результаты и их обсуждение

После обучения и тестирования нейросетевой модели были проведены то-

чечные проверки качества распознавания жестов. Результаты проверок показаны на рис. 4.

Предложенная сверточная нейронная сеть (CNN), реализованная с использованием библиотек TensorFlow и Keras, достигла точности 89.14% на тестовом наборе данных Sign Language MNIST после 18 эпох обучения. Для оценки эффективности предложенного подхода было проведено сравнение с альтернативными методами, результаты которого представлены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение эффективности методов нейронных сетей

Table 1. Comparison of the effectiveness of neural network methods

Нейронная сеть / Neural network	Количество эпох обучения / Number of training epochs	Точность, % / Accuracy, %
TensorFlow и Keras	18	89.14
HOG и SVM	18	70.1
Сеть с двумя скрытыми слоями	18	78.4

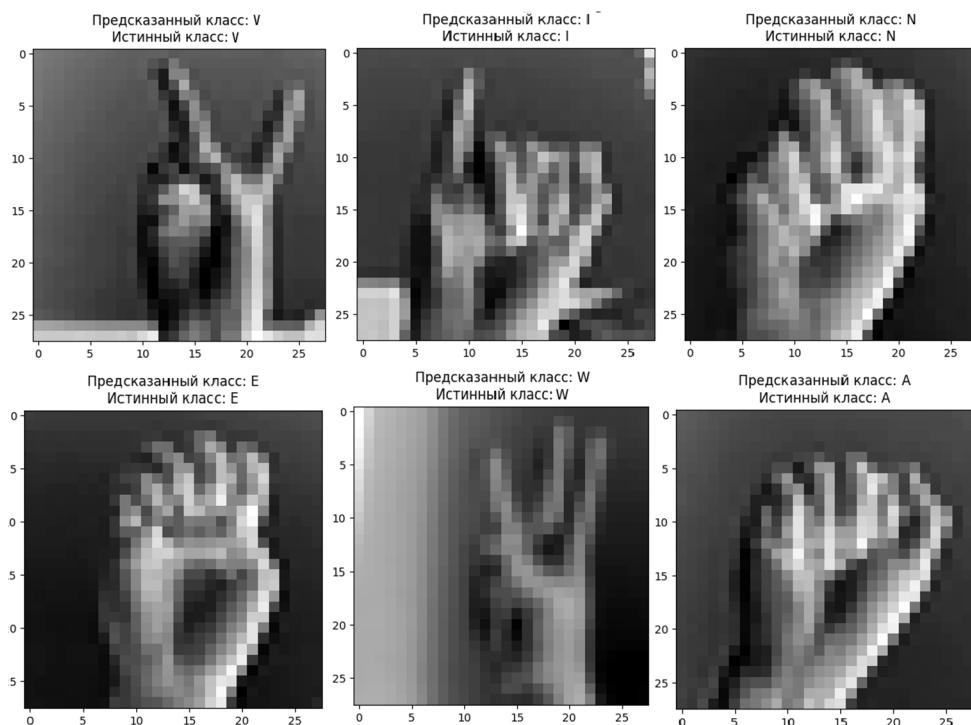


Рис. 4. Точечные проверки качества распознавания жестов, где приведены следующие классы (буквы): **V** (21), **I** (8), **N** (13), **E** (4), **W** (22), **A** (0)

Fig. 4. Point tests of gesture recognition quality, where the following classes (letters) are given:
V (21), **I** (8), **N** (13), **E** (4), **W** (22), **A** (0)

Метод, основанный на гистограммах ориентированных градиентов (HOG) в сочетании с классификатором SVM, показал точность 70.1% на аналогичных наборах данных жестов [17], что значительно ниже предложенной CNN с использованием TensorFlow и Keras. Полносвязная нейронная сеть с двумя скрытыми слоями, рассмотренная в [18], достигла точности около 78.4% на наборе Sign Language MNIST, но требовала большего времени на обучение и демонстрировала склонность к переобучению из-за отсутствия сверточных слоев, которые эффективно извлекают иерархические признаки.

Выводы

Сравнение подтверждает, что предложенная CNN превосходит традиционные методы и простые нейронные сети по

точности, скорости сходимости и устойчивости к вариациям данных. Высокая точность (89.14%) и стабильные результаты на тестовом наборе демонстрируют эффективность использования сверточных слоев для автоматического выделения признаков и полносвязных слоев для классификации в задачах распознавания жестов.

Полученные в ходе исследования результаты могут быть применены в системах управления и робототехнике, что согласуется с исследованиями нечетких систем управления [19, 20].

В перспективе возможно дальнейшее улучшение точности классификации за счет модернизации алгоритмов, используемых в Adam. Это позволит избежать эффекта переобучения и оптимальнее использовать ресурсы, задействованные для этого процесса.

Список литературы

1. Gradient-based learning applied to document recognition / Y. LeCun, L. Bottou, Y. Bengio, P. Haffner // Proceedings of the IEEE. 1998. № 86(11). P. 2278–2324.
2. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks // Advances in Neural Information Processing Systems. 2012. Vol. 25. P. 1097–1105.
3. Воронцов К. В. Машинальное обучение и анализ данных // Труды международной научной конференции "Нейроинформатика". М.: МФТИ, 2020. 452 с.
4. Петров И. В., Смирнов А. А. Применение сверточных нейронных сетей для классификации изображений в задачах компьютерного зрения // Искусственный интеллект и принятие решений. 2021. № 2. С. 45-58.
5. Китенко А. М. Метод поиска и разметки артефактов на изображениях с использованием алгоритмов детекции и сегментации // Системы анализа и обработки данных. 2021. № 4(84). С. 7-18.
6. Robust Hand Gesture Recognition Using HOG-9ULBP Features and SVM Model / J. Li, C. Li, J. Han, et al. // Electronics. 2022. Vol. 11(7). P. 988.

7. Козлов С. В., Иванова Е. П. Сравнительный анализ архитектур глубоких нейронных сетей для распознавания образов // Программные продукты и системы. 2022. № 3. С. 28-36.
8. Simonyan K., Zisserman A. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition // International Conference on Learning Representations (ICLR). 2015. arXiv:1409.1556.
9. Kumar R., Patel S., Sharma M. Enhancing Sign Language Detection through MediPipe and Convolutional Neural Networks // arXiv preprint. 2024. arXiv:2406.03729v1.
10. Ioffe S., Szegedy C. Batch Normalization: Accelerating Deep Network Training by Reducing Internal Covariate Shift // Proceedings of the 32nd International Conference on Machine Learning (ICML). 2015. Р. 448-456.
11. Семенов Д. А., Кузнецов М. И. Оптимизация процесса обучения сверточных нейронных сетей с использованием адаптивных алгоритмов // Информационные технологии. 2023. Т. 29, № 4. С. 195-203.
12. Nair V., Hinton G. E. Rectified Linear Units Improve Restricted Boltzmann Machines // Proceedings of the 27th International Conference on Machine Learning (ICML). 2010. P. 807-814.
13. Deep Residual Learning for Image Recognition / K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2016. P. 770-778.
14. Kingma D. P., Ba J. Adam: A Method for Stochastic Optimization // International Conference on Learning Representations (ICLR). 2015. arXiv:1412.6980.
15. Dropout: A Simple Way to Prevent Neural Networks from Overfitting / N. Srivastava, G. Hinton, A. Krizhevsky, I. Sutskever, R. Salakhutdinov // Journal of Machine Learning Research. 2014. Vol. 15, № 1. P. 1929-1958.
16. Going deeper with convolutions / C. Szegedy, W. Liu, Y. Jia, et al. // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2015. P. 1-9.
17. Фаворская М. Н., Пахирка А. И. Построение карт глубины при обнаружении презентационных атак в системах распознавания лиц // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2022. № 3(27). С. 40-48.
18. Sign Language Transformers: Joint End-to-End Sign Language Recognition and Translation / N. C. Camgoz, O. Koller, S. Hadfield, R. Bowden // IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2020. P. 10023-10033.
19. Исследование устройства нечеткого цифрового фильтра для роботаманипулятора / М.В. Бобырь, Н.А. Милостная, В.А. Булатников, М.Ю. Лунева // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020. Т. 24, №1. С. 115-129. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-115-129>
20. Бобырь М. В., Нассер А. А., Абдулджаббар М. А. Исследование свойств мягкого алгоритма нечетко-логического вывода // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 1. С. 31-49.

References

1. LeCun Y., Bottou L., Bengio Y., Haffner P. Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE*. 1998; (86): 2278-2324.
2. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2012; 25: 1097-1105.
3. Vorontsov K. V. Machine learning and data analysis. In: *Trudy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Neuroinformatika" = Proceedings of the international scientific conference "Neuroinformatics"*. Moscow; 2020. 452 p. (In Russ.).
4. Petrov I. V., Smirnov A. A. Application of convolutional neural networks for image classification in computer vision problems. *Iskusstvennyi intellekt i prinyatie reshenii = Artificial Intelligence and Decision Making*. 2021; (2): 45-58. (In Russ.).
5. Kitenko A. M. Method for searching and marking artifacts in images using detection and segmentation algorithms. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Data analysis and processing systems*. 2021; (4): 7-18. (In Russ.).
6. Li J., Li C., Han J., et al. Robust Hand Gesture Recognition Using HOG-9ULBP Features and SVM Model. *Electronics*. 2022; 11 (7): 988.
7. Kozlov S. V., Ivanova E. P. Comparative analysis of deep neural network architectures for pattern recognition. *Programmnye produkty i sistemy = Software products and systems*. 2022; (3): 28-36. (In Russ.).
8. Simonyan K., Zisserman A. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition. *International Conference on Learning Representations (ICLR)*. 2015; arXiv:1409.1556.
9. Kumar R., Patel S., Sharma M. Enhancing Sign Language Detection through MediPipe and Convolutional Neural Networks. arXiv preprint, 2024, arXiv:2406.03729v1.
10. Ioffe S., Szegedy C. Batch Normalization: Accelerating Deep Network Training by Reducing Internal Covariate Shift. *Proceedings of the 32nd International Conference on Machine Learning (ICML)*, 2015. P. 448-456.
11. Semenov D. A., Kuznetsov M. I. Optimization of the Training Process of Convolutional Neural Networks Using Adaptive Algorithms. *Informatsionnye tekhnologii = Information Technologies*. 2023; 29(4): 195-203. (In Russ.).
12. Nair V., Hinton G. E. Rectified Linear Units Improve Restricted Boltzmann Machines. *Proceedings of the 27th International Conference on Machine Learning (ICML)*, 2010. P. 807-814.
13. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep Residual Learning for Image Recognition. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2016. P. 770-778.
14. Kingma D. P., Ba J. Adam: A Method for Stochastic Optimization. *International Conference on Learning Representations (ICLR)*, 2015, arXiv:1412.6980.

15. Srivastava N., Hinton G., Krizhevsky A., Sutskever I., Salakhutdinov R. Dropout: A Simple Way to Prevent Neural Networks from Overfitting. *Journal of Machine Learning Research*. 2014; 15(1): 1929-1958.
16. Szegedy C., Liu W., Jia Y., et al. Going deeper with convolutions. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2015. P. 1-9.
17. Favorskaya M. N., Pakhirka A. I. Construction of depth maps for detection of presentation attacks in face recognition systems. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management*. 2022; (3): 40-48. (In Russ.).
18. Camgoz N. C., Koller O., Hadfield S., Bowden R. Sign Language Transformers: Joint End-to-End Sign Language Recognition and Translation. *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2020. P. 10023-10033.
19. Bobyr M. V., Milostnaya N. A., Bulatnikov V. A, Luneva M. Yu. Fuzzy Digital Filter Device Study for the Robot Manipulator. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(1): 115-129 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-115-129>
- 20 Bobyr. M. V., Nasser A. A., Abduljabbar M. A. Study of the properties of a soft algorithm for fuzzy-logical inference. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2016; (1): 31-49. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Бобырь Максим Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: fregat_mn@rambler.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5400-6817>, Researcher ID: G-2604-2013

Асеев Артем Андреевич, аспирант кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: aseeff.artem@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-8271-7660>

Maxim V. Bobyr, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Software Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: fregat_mn@rambler.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5400-6817>, Researcher ID: G-2604-2013

Artem A. Aseev, Post-Graduate Student of the Software Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: aseeff.artem@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-8271-7660>

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.451

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-99-112>

Модель и реализация компилятора функционального языка Common LISP

А.А. Чаплыгин¹ 

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российской Федерации

✉ e-mail: alex_chaplygin@mail.ru

Резюме

Цель исследований заключается в создании модели компилятора функционального языка Common Lisp, реализации этой модели и тестировании модели компилятора с помощью целевой виртуальной машины, чтобы увеличить скорость выполнения программ.

Методы. С помощью денотационной семантики была построена формальная модель компилятора функционального языка Common Lisp. Компиляция происходит в несколько этапов. На первом этапе исходный язык преобразуется в промежуточный lambda-язык, в котором все макросы раскрываются, встроенные формы преобразуются в аналогичные выражения, а имена переменных заменяются на локальные, глобальные и глубокие ссылки. На втором этапе выражение на промежуточном языке преобразуется из древовидной структуры в линейный список из примитивных инструкций целевой виртуальной машины.

Результаты. Полученные в результате компиляции примитивные инструкции кодируются с помощью специального ассемблера в числовой код для выполнения на целевой виртуальной машине. Также в результате компиляции получаются список констант и размер памяти необходимый для работы скомпилированной программы. Целевая виртуальная машина состоит из отделов памяти для кодированной программы, констант, глобальных переменных, стека, списка кадров активации, регистров (аккумулятор, указатель стека, указатель команд, текущий кадр активации). Кадры активации представляют собой объекты-массивы, которые хранят указатель на предыдущий кадр, номер уровня глубины вызовов и локальные аргументы. Сборка мусора происходит с помощью метода пометки и очистки.

Заключение. В результате работы была построена и реализована модель компилятора функционального языка Common Lisp. По сравнению с интерпретатором скорость работы программы возросла в среднем в 20 раз. Дальнейшее увеличение скорости можно достичь с помощью различных оптимизаций компилятора на разных стадиях. Из простых оптимизаций можно отметить: оптимизацию арифметических выражений, устранение лишних команд, упрощение выражений.

Ключевые слова: компилятор; байт-код; виртуальная машина; функциональный язык; Common Lisp; денотационная семантика.

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

Для цитирования: Чаплыгин А.А. Модель и реализация компилятора функционального языка Common LISP // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(3): 99-112. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-99-112>.

Поступила в редакцию 03.06.2025

Подписана в печать 21.08.2025

Опубликована 30.09.2025

© Чаплыгин А.А., 2025

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2025; 29(3): 99-112

Modeling and implementation of Common LISP functional language compiler

Aleksandr A. Chaplygin¹✉

² Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: alex_chaplygin@mail.ru

Abstract

Purpose of research is to create a compiler model for the functional language Common Lisp, implement this model, and test the compiler model using a target virtual machine to increase the execution speed of programs.

Methods. A formal compiler model of the functional language Common Lisp was built using denotational semantics. Compilation takes place in several stages. At the first stage, the source language is transformed into an intermediate lambda language in which all macros are expanded, embedded forms are transformed into similar expressions, and variable names are replaced with local, global, and deep references. At the second stage, the expression in the intermediate language is transformed from a tree structure into a linear list of primitive instructions of the target virtual machine.

Results. The resulting primitive instructions are encoded using a special assembler into numeric code for execution on the target virtual machine. The compilation also results in a list of constants and the amount of memory required for the compiled program to run. The target virtual machine consists of memory sections for the encoded program, constants, global variables, stack, list of activation frames, registers (accumulator, stack pointer, instruction pointer, current activation frame). Activation frames are array objects that store a pointer to the previous frame, the call depth level number, and local arguments. Garbage collection takes place using the tagging and cleaning method.

Conclusion. As a result, a Common Lisp functional language compiler model was built and implemented. Compared to the interpreter, the speed of the program has increased by an average of 20 times. Further speed increases can be achieved by using various compiler optimizations at different stages. Of the simple optimizations, it can be noted: optimization of arithmetic expressions, elimination of unnecessary commands, simplification of expressions.

Keywords: compiler; bytecode; virtual machine; functional language; Common Lisp; denotational semantics.

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

For citation: Chaplygin A. A. Modeling and implementation of Common LISP functional language compiler. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(3): 99-112 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-99-112>.

Received 03.06.2025

Accepted 21.08.2025

Published 30.09.2025

Введение

Язык Лисп – один из старейших языков программирования, которые используются сейчас. Разработанный в 50-х го-

дах Джоном Маккарти, он активно развивался до настоящего времени. Существует много диалектов Лиспа, таких как Common Lisp, Scheme [1], Racket [2], Closure и другие [3].

Первый компилятор Лиспа был написан в 1962 году в МИТ Тимом Хартом и Майком Леви [4]. Он был написан на самом Лиспе и мог компилировать себя с помощью интерпретатора [5]. Машинный код, генерируемый этим компилятором, работал в 40 раз быстрее, чем исходная программа в интерпретаторе. Функции могли быть как интерпретируемыми, так и компилируемыми, и свободно работать вместе. Такая модель называется инкрементальной компиляцией. Свободные (глобальные) переменные могли передаваться между скомпилированными функциями и интерпретатором. Также можно было скомпилировать специальные формы. Для компиляции использовались свойства EXPR или FEXPR у переменной (символа) функции. Свободные (глобальные) переменные нужно было объявлять перед компиляцией. Порядок компиляции функций не имел значения, таким образом можно было компилировать не все, а только необходимые функции, которые работали очень медленно. В первой фазе компиляции S-выражения функций переписывались, чтобы более эффективно использовать встроенные и пользовательские особые формы (FSUBR и FEXPR), рекурсивные функции переписывались через итерацию с помощью формы PROG. Во второй фазе на основе S-выражений генерировался ассемблерный код: определялся порядок вычислений, места расположения аргументов и переменных, переходы для условных выражений.

Язык Common Lisp стал ANSI стандартом в 1994. Он объединил в себе достижения многих диалектов Лиспа, таких как Mac Lisp, Zeta Lisp, Spice Lisp, S-1 Lisp и других. Это мультипарадигменный язык общего назначения, включает в себя процедурное [6], функциональное [7] и объектно-ориентированное программирование [8]. Как и многие другие Lisp системы он является динамическим языком, который поощряет эволюционную и инкрементальную разработку ПО с итеративной компиляцией в эффективные программы, причем инкрементальная разработка часто проходит интерактивно, не прерывая работу программы.

В современных Common Lisp системах компилятор генерирует машинный код [9] или байт-код [10], который может быть сохранен [11]. Отдельные функции могут быть скомпилированы в памяти [12]. Модуль программы из файла может быть скомпилирован в байт-код, программу на языке C, в машинный код или в любую комбинацию из вышеперечисленного. Стандарт Common Lisp спроектирован для инкрементальной компиляции [13], а также включает объявления для оптимизаций компиляции¹ такие

¹ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024668438 Российская Федерация. Оптимизирующий компилятор программ на языках высокого уровня С, С++, Фортран: № 2024667303: заявл. 26.07.2024: опубл. 07.08.2024; заявитель Акционерное общество «МЦСТ». EDN SNOHFN.

как спецификация типов и подстановка функций [14].

Наиболее известные современные реализации Common Lisp: Allegro Common Lisp, LispWorks, CLISP, CMUCL, Steel Bank Common Lisp и другие [15].

В этой работе была разработана и реализована модель компилятора для подмножества языка Common Lisp [16], чтобы ускорить выполнение программ интерпретатором [17].

Материалы и методы

Компиляция исходной программы будет проходить в несколько этапов. Для простоты здесь не рассматривается этап лексического и синтаксического анализа, а также раскрытие макросов. Будем считать, что на вход компилятора подается S-выражение как объект.

На первом этапе компиляции исходная программа анализируется и преобразуется в промежуточную форму: расширенный lambda-язык, где все макросы раскрываются, а встроенные формы имеют свои аналоги. Главное преобразование касается переменных. Компилятор преобразует имена переменных в такой вид, чтобы можно было сразу обратиться к нужному месту в памяти, без поиска по имени.

Воспользуемся денотационной семантикой [5], чтобы построить модель компилятора. Основу вычисления первой фазы компиляции составляет функция \mathcal{E} , которая будет иметь следующий тип:

$$\mathcal{E} : \varepsilon \times \rho \times \gamma \times \phi \times \pi \rightarrow \varepsilon \times \rho \times \gamma \times \phi \times \pi, \quad (1)$$

где ε – S-выражение языка; ρ – вычисляемое на момент компиляции окружение (в начале пустое – []); γ – список глобальных переменных; ϕ – список глобальных функций; π – список примитивов.

Правила преобразования программы в первой фазе компиляции представлены формулами:

$$\mathcal{E}[[c]]\rho\gamma\phi\pi = [\text{CONST } c]\rho\gamma\phi\pi \quad (2)$$

$$\mathcal{E}[[\text{quote } \varepsilon]]\rho\gamma\phi\pi = [\text{CONST } \varepsilon]\rho\gamma\phi\pi \quad (3)$$

$$\mathcal{E}[[v]]\rho\gamma\phi\pi = [\text{LOCAL_REF } i]\rho\gamma\phi\pi,$$

если $\text{fv}(v, \rho, \gamma) = (\text{local}, i)$

$$[\text{GLOBAL_REF } i]\rho\gamma\phi\pi,$$

если $\text{fv}(v, \rho, \gamma) = (\text{global}, i)$

$$[\text{DEEP_REF } i \ j]\rho\gamma\phi\pi,$$

если $\text{fv}(v, \rho, \gamma) = (\text{deep}, i, j)$ (4)

$$\mathcal{E}[[\text{progn } \varepsilon^+]]\rho\gamma\phi\pi = \mathcal{E}^+[\varepsilon^+]\rho\gamma\phi\pi$$

$$\mathcal{E}^+[[\varepsilon]]\rho\gamma\phi\pi = \mathcal{E}[\varepsilon]\rho\gamma\phi\pi$$

$$\mathcal{E}^+[[\varepsilon \ \varepsilon^+]]\rho\gamma\phi\pi = [\text{SEQ } \mathcal{E}[\varepsilon] \ \mathcal{E}^+[\varepsilon^+]]\rho\gamma\phi\pi \quad (5)$$

$$\mathcal{E}[[\text{if } \varepsilon_c \ \varepsilon_t \varepsilon_f]]\rho\gamma\phi\pi =$$

$$= [\text{ALTER } \mathcal{E}[\varepsilon_c] \ \mathcal{E}[\varepsilon_t] \ \mathcal{E}[\varepsilon_f]]\rho\gamma\phi\pi \quad (6)$$

$$\mathcal{E}[[\text{setq } v \ \varepsilon]]\rho\gamma\phi\pi = \text{sq}(v \ \varepsilon \ \rho \ \phi \ \pi)$$

$$\text{sq}(v \ \varepsilon \ \rho \ \phi \ \pi) = [\text{LOCAL_SET } i \ \mathcal{E}[\varepsilon]],$$

если $\text{fv}(v, \rho, \gamma) = (\text{local}, i)$

$$[\text{GLOBAL_SET } i \ \mathcal{E}[\varepsilon]],$$

если $\text{fv}(v, \rho, \gamma) = (\text{global}, i)$

$$[\text{DEEP_SET } i \ j \ \mathcal{E}[\varepsilon]],$$

если $\text{fv}(v, \rho, \gamma) = (\text{deep}, i, j)$ (7)

$$\mathcal{E}[[\text{defun } v \ \sigma \ \varepsilon]]\rho\gamma\phi\pi = [\text{LABEL } v$$

$$[\text{SEQ } \mathcal{E}[\varepsilon](\sigma. \rho) \ \phi \ \pi \ \text{RETURN}]]\rho\gamma(v. \phi) \ \pi \quad (8)$$

$$\mathcal{E}[[\lambda \ \sigma \ \varepsilon]]\rho\gamma\phi\pi = [\text{FIX_CLOSURE}$$

$$\text{gen}([\text{SEQ } \mathcal{E}[\varepsilon](\sigma. \rho) \ \phi \ \pi]])\rho\gamma\phi\pi \quad (9)$$

$$\mathcal{E}[[\text{tagbody } \varepsilon^+]]\rho\gamma\phi\pi = \mathcal{E}^*[\varepsilon^+]\rho\gamma\phi\pi$$

$$\mathcal{E}^*[[v]]\rho\gamma\phi\pi = [\text{LABEL } v]\rho\gamma\phi\pi$$

$$\mathcal{E}^*[[\varepsilon]]\rho\gamma\phi\pi = \mathcal{E}[\varepsilon]\rho\gamma\phi\pi$$

$$\mathcal{E}^*[[\varepsilon \varepsilon^+]]\rho\gamma\phi\pi = [\text{SEQ } \mathcal{E}[\varepsilon] \mathcal{E}^*[\varepsilon^+]]\rho\gamma\phi\pi \quad (10)$$

$$\mathcal{E}[[\text{go } v]]\rho\gamma\phi\pi = [\text{GOTO } v]\rho\gamma\phi\pi \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{E}[[\lambda \sigma \varepsilon_1]\varepsilon^+] &= \\ &= [\text{FIX_LET } \#v v \mathcal{E}[\varepsilon_1](\sigma.\rho)\gamma\phi\pi]\rho\gamma\phi\pi \end{aligned}$$

$$v = \mathcal{E}^*[\varepsilon^+]$$

$$\mathcal{E}^*[[\varepsilon]]\rho\gamma\phi\pi = \mathcal{E}[\varepsilon]\rho\gamma\phi\pi$$

$$\mathcal{E}^*[[\varepsilon\varepsilon^+]]\rho\gamma\phi\pi = [\mathcal{E}[\varepsilon]\mathcal{E}^*[\varepsilon^+]]\rho\gamma\phi\pi \quad (12)$$

$$\mathcal{E}[[\sigma\varepsilon^+]]\rho\gamma\phi\pi = [\text{FIX_CALL } \sigma \#v v]\rho\gamma\phi\pi$$

$$v = \mathcal{E}^*[\varepsilon^+] \quad (13)$$

$$\mathcal{E}[[\text{prim } \varepsilon^+]]\rho\gamma\phi\pi = [\text{FIX_PRIM } \text{prim } v]\rho\gamma\phi\pi$$

$$v = \mathcal{E}^*[\varepsilon^+], \forall \text{prim} \in \pi \quad (14)$$

Преобразование констант – тривиально (формула 2).

Цитирование аналогично преобразованию констант (формула 3).

В формуле (4) показано преобразование переменной. Для этого определяется тип переменной: локальная, глобальная или свободная. Функция поиска переменной имеет вид:

$$fv(v, \rho, \gamma) = (\text{local } \rho_0 \uparrow v), \text{ если } v \in \rho_0$$

$$fv(v, \rho, \gamma) = (\text{global } \gamma \uparrow v), \text{ если } v \in \gamma$$

$$fv(v, \rho, \gamma) = (\text{deep } (\rho_n \uparrow v)n), \text{ если } v \in \rho_n \quad (15)$$

Локальная переменная v присутствует в первом кадре локального окружения ρ , глобальные переменные находятся в глобальном окружении γ , свободные переменные находятся в любом кадре ρ , кроме первого. Выражение $\rho_n \uparrow v$ обозначает позицию переменной v в кадре ρ_n .

Для денотации компиляции последовательности вычислений используется вспомогательная функция \mathcal{E}^+ . Выражение ε^+ означает последовательность из одного или более выражений ε .

При компиляции формы if 6 компилируются условие ε_c , выражение по истине ε_t , выражение по лжи ε_f .

При компиляции присваивания (формула 7) используется та же функция поиска переменной (формула 15), что и при обращении к переменной.

Компиляция пользовательской функции (формула 8) включает в себя компиляцию тела функции ε и расширение окружения функций ϕ . Выражение $(v.\phi)$ означает добавление в начало окружения ϕ имени функции v .

В формуле (9) показана компиляция замыкания λ -функции, при этом необходимо генерировать уникальный символ (имя замыкания) с помощью функции $gen()$.

При компиляции формы *tagbody* (формула 10) используется вспомогательная функция \mathcal{E}^* . В этой функции символы компилируются как метки, а остальные формы как при компиляции последовательности (формула 5). Форма *go* компилируется как переход на метку (формула 11).

Компиляция применения функции (формулы 12 и 13) заключается в компиляции выражений для аргументов ε^+ и выбора необходимой команды для вызова функции. Если функция представляет собой λ -абстракцию, то используется упрощенный вызов *FIX_LET* (формула 12), который подразумевает создание кадра активации (расширение окружения переменных) без вызова функции. При этом тело функции ε_1 компилируется в расширенном окружении. Если идет вызов пользовательской функции из окружения ϕ , то используется обычный вызов *FIX_CALL* (формула 13).

Компиляция применения встроенно-го примитива (формула 14) аналогична компиляции применения функции за исключением того, что нет необходимости передавать число аргументов, для каждой примитивной функции это число фиксировано.

Во время второй фазы компиляции полученное выражение линеаризуется (из древовидного выражения получается линейный список) и преобразуется в примитивные инструкции (фаза оптимизации не рассматривается). Функция G этого преобразования будет иметь следующий тип:

$$G : \varepsilon \times (v \rightarrow v) \rightarrow v, \quad (16)$$

где ε – выражение после первой фазы; $v \rightarrow v$ – функция продолжения, которое используется, чтобы задать порядок преобразований (начальное продолжение возвращает свой аргумент). В результате получается пустое значение v , так как сама генерация будет представлена функцией ω , которая должна добавлять свой аргумент в линейный список.

Правила преобразования второй фазы представлены формулами:

$$G[[\text{CONST } \varepsilon]]_K = \omega(\text{CONST } \varepsilon) \quad (17)$$

$$G[[\text{GLOBAL_REF } i]]_K = \omega(\text{GLOBAL_REF } i) \quad (18)$$

$$G[[\text{LOCAL_REF } i]]_K = \omega(\text{LOCAL_REF } i) \quad (19)$$

$$G[[\text{DEEP_REF } ij]]_K = \omega(\text{DEEP_REF } ij) \quad (20)$$

$$G[[\text{RETURN}]]_K = \omega(\text{RETURN}) \quad (21)$$

$$G[[\text{GLOBAL_SET } i \varepsilon]]_K = \omega(\text{GLOBAL_SET } i) \quad (22)$$

$$G[[\text{LOCAL_SET } i \varepsilon]]_K = \omega(\text{LOCAL_SET } i) \quad (23)$$

$$\begin{aligned} G[[\text{DEEP_SET } ij \varepsilon]]_K &= \\ &= \omega(\text{DEEP_SET } ij) \end{aligned} \quad (24)$$

$$G[[\text{LABEL } v \varepsilon]]_K = \omega(\text{LABEL } v),$$

если $\varepsilon = \{\}$

$$G^\dagger[\omega(\text{JMP } l)]\lambda().$$

$$G^\dagger[\omega(\text{LABEL } v)]\lambda().$$

$$G[\varepsilon]\lambda().\omega(\text{LABEL } l),$$

в противном случае $G^\dagger[\varepsilon]_K = \varepsilon$

$$l = \text{gen}() \quad (25)$$

$$G[[\text{SEQ } \varepsilon^+]]_K = G + [\varepsilon^+]_K$$

$$G + [[\varepsilon]]_K = G[\varepsilon]_K$$

$$G + [[\varepsilon \varepsilon^+]]_K = G[\varepsilon]\lambda().G + [\varepsilon^+]_K \quad (26)$$

$$G[[\text{ALTER } \varepsilon_c \varepsilon_t \varepsilon_f]]_K =$$

$$= \omega(\text{ALTER } \varepsilon_c \varepsilon_t \varepsilon_f)\lambda().G[\varepsilon_t]\lambda().$$

$$G^\dagger[\omega(\text{JMP } l_a)]\lambda().G^\dagger[\omega(\text{LABEL } l_f)]\lambda().$$

$$G[\varepsilon_f]\lambda().\omega(\text{LABEL } l_a)$$

$$l_f = \text{gen}()$$

$$l_a = \text{gen}() \quad (27)$$

$$G[[\text{FIX_CLOSURE } v \varepsilon]]_K =$$

$$= G^\dagger[\omega(\text{FIX_CLOSURE } v)]\lambda().G[\varepsilon]_K \quad (28)$$

$$G[[\text{FIX_CALL } v \rho \varepsilon^+]]_K = A[\varepsilon^+]\lambda().$$

$$\omega([\text{SAVE_ENV}, \text{SET_ENV } \rho,$$

$$\text{ALLOC } \# \varepsilon^+, \text{REG_CALL } v,$$

$$\text{RESTORE_ENV}],$$

$$\text{где } A[[\varepsilon]]_K = G[\varepsilon]\lambda().\omega(\text{PUSH})$$

$$A[[\varepsilon \varepsilon^+]]_K = A[\varepsilon]\lambda().A[\varepsilon^+]_K \quad (29)$$

$$G[[\text{FIX_PRIM } v \varepsilon^+]]_K =$$

$$A[\varepsilon^+]\lambda().\omega(\text{PRIM } v) \quad (30)$$

$$G[[\text{GOTO } v]]_K = \omega(\text{JMP } v) \quad (31)$$

Преобразование констант, обращений к переменным, возврат из функции остаются в неизменном виде (формулы 17 – 21).

В случае присваивания переменной (формулы 22 – 24) сначала генерируется код для выражения, а затем результат записывается в переменную.

Команда *LABEL* (формула 25) используется для генерации кода функции и как метка внутри формы *TAGBODY*. В первом случае генерируется дополнительная метка после кода функции и команда перехода на эту метку, чтобы код функции нельзя было выполнить кроме как через вызов или замыкание, при последовательном выполнении программы код функции будет пропущен. Вспомогательная функция G^{\dagger} используется для денотации последовательной генерации команд.

Последовательность выражений (формула 26) разворачивается также как при компиляции формы *PROGN*, используя аналогичную вспомогательную функцию G^+ .

Линеаризация условий (формула 27) происходит с помощью сгенерированных двух меток l_f и l_a . Сначала генерируется код условия. Затем идет команда перехода на метку l_f , если условие ложно. После этого идет генерация кода, выполняющегося по истинности условия. Затем вместе с меткой l_f генерируется код, выполняющегося по лжи. В конце добавляется метка l_a .

При генерации замыкания функции (формула 28) команда замыкания просто вставляется перед кодом функции. Этот код будет включать метку и команду перехода на точку после функции.

При генерации вызова функции (формула 29) создается последовательность разных команд. В начале генерируется код для вычисления аргументов. Для этого используется вспомогательная

функция A , которая похожа на функцию G^+ за исключением того, что после каждого выражения генерируется команда *PUSH*, которая будет сохранять результат вычисления аргумента в стеке. После этого генерируются команды сохранения текущего кадра активации, установка необходимого кадра (окружение, где была объявлена функция), создания нового кадра активации, собственно вызова функции и восстановление сохраненного кадра.

Генерация вызова примитива (формула 30) похожа на вызов функции, также генерируется код вычисления аргументов, а затем идет команда вызова примитива по номеру.

Команда *GOTO* преобразовывается в команду *JMP* (формула 31).

Результаты и их обсуждение

Полученные в результате компиляции примитивные инструкции кодируются с помощью специального ассемблера в числовой код. Этот код предназначен для выполнения с помощью целевой виртуальной машины. Константы, полученные в результате компиляции, сохраняются в память констант. Глобальные переменные будут находиться в своей памяти. Число глобальных переменных (размер памяти) также генерируется компилятором. Метки, которые были получены в результате компиляции, преобразуются в адреса.

В табл. 1 представлены коды и значения инструкций целевой машины.

Таблица 1. Инструкции целевой машины**Table 1.** Target machine instructions

0	CONST num	поместить константу с номером num в регистр ACC.
1	JMP ofs	безусловный переход на смещение ofs относительно РС.
2	JNT ofs	если ACC == NIL, то относительный переход на смещение ofs.
3	ALLOC n	создать новый кадр активации с числом аргументов n.
4	GLOBAL-REF i	устанавливает регистру ACC значение глобальной переменной с индексом i.
5	GLOBAL-SET i	устанавливает глобальной переменной с индексом i значение регистра ACC.
6	LOCAL-REF i	загружает в ACC значение i локальной переменной (текущего кадра активации).
7	LOCAL-SET i	присваивает локальной переменной i (текущего кадра активации) значение регистра ACC.
8	DEEP-REF i j	загружает в ACC значение локальной переменной с индексом j в кадре i (начиная от текущего).
9	DEEP-SET i j	присваивает локальной переменной j в кадре i значение регистра ACC.
10	PUSH	добавляет значение регистра ACC в стек
11	PACK n	собирает последние n элементов из стека в список и добавляет его в стек.
12	REG-CALL ofs	добавляет адрес следующей инструкции в стек и производит переход по смещению ofs.
13	RETURN	производит переход на адрес из верхушки стека, при этом удаляет этот адрес из стека
14	FIX-CLOSURE ofs	в регистр ACC добавляется объект замыкание с текущим кадром активации и смещением на код функции относительно текущего адреса ofs.
15	SAVE-FRAME	сохраняет кадр активации в стеке
16	SET-FRAME num	устанавливает кадр активации с номером num относительно начала глубины вызовов.
17	RESTORE-FRAME	восстанавливает кадр активации из стека.
18	PRIM n	вызывает примитив с номером n из таблицы примитивов с фиксированным числом аргументов.
19	NPRIM n	вызывает примитив с номером n из таблицы примитивов с переменным числом аргументов.
20	HALT	останов машины
21	PRIM-CLOSURE n	в регистр ACC добавляется объект замыкание с текущим кадром активации и адресом кода примитива с фиксированным числом аргументов и номером n.
22	NPRIM-CLOSURE n	в регистр ACC добавляется объект замыкание с текущим кадром активации и адресом кода примитива с переменным числом аргументов и номером n.
23	CATCH ofs	добавляет запись в стек catch, сохраняется имя метки в acc, абсолютный адрес по смещению ofs, текущий кадр активации, указатель стека.
24	THROW	извлекает из стека имя метки блока catch, ищет в стеке catch запись с этим именем, выполняет переход на сохраненный адрес конца блока catch

Архитектура целевой виртуальной машины представлена на рис. 1.

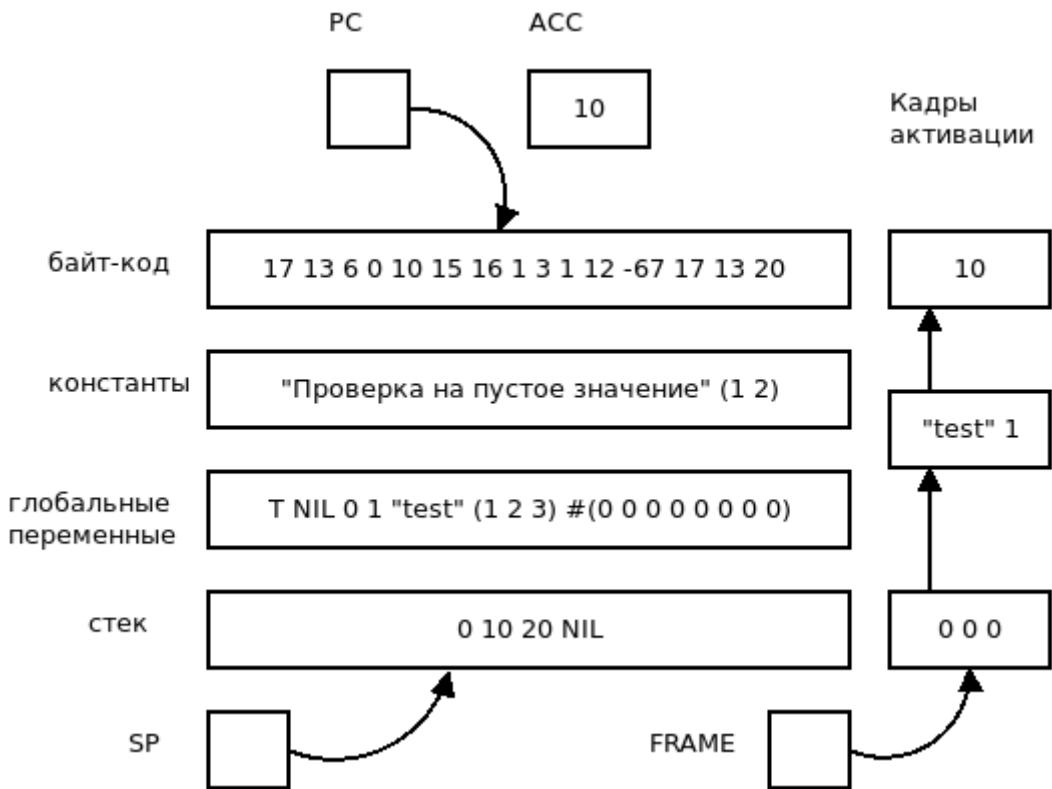


Рис. 1. Архитектура целевой виртуальной машины

Fig. 1. Target virtual machine architechture

Машина включает в себя память программы (где хранится байт код программы), память констант, память глобальных переменных, стек, список кадров активации и регистры.

В памяти программы хранятся инструкции программы. Каждая инструкция включает код операции и возможные параметры.

Кадры активации представляют собой объекты-массивы (рис. 2).

Первый элемент массива – это ссылка на предыдущий кадр. Следующий элемент служит для ускорения поиска кадра по глубине вызова, здесь хранится номер кадра (глубина вызовов).



Рис. 2. Структура кадров активации

Fig. 2. Activation frames structure

Остальные элементы массива – это локальные аргументы. Кадры могут иметь не только линейную, но и древовидную структуру, поэтому необходима ссылка на предыдущий кадр. Такие объекты удобно записывать в стек, вос-

становливать из стека. Кадры активации создаются динамически как и другие объекты программы.

Регистры машины:

PC – хранит адрес текущей выполняемой инструкции из памяти программы.

ACC – хранит результат последней операции, может быть любым объектом.

FRAME – текущий кадр активации.

SP – указатель стека.

Сборка мусора включает в себя фазу пометки и фазу очистки. В фазе пометки помечаются объекты, до которых можно дойти с помощью обхода, начиная с корневых объектов в регистрах. Это

регистр аккумулятора ACC, указатель на текущий кадр активации FRAME, все объекты, находящиеся в стеке, начиная с текущей позиции SP, а также все объекты в памяти констант и глобальных переменных. Сборка мусора выполняется, когда число созданных массивов (кадров-активаций) превысит заданный порог (половина максимального числа массивов).

В табл. 2 показано сравнение скорости работы полученного байт-кода по сравнению с интерпретатором на различных тестах.

Таблица 2. Время (в сек.) работы тестов на интерпретаторе и байт-кода в виртуальной машине

Table 2. Time (in sec.) to run of tests on interpreter and byte-code with virtual machine

Тест / Test	Интерпретатор / Interpreter	Скомпилированный байт-код / Compiled Bytecode	Отношение / Relation
Списки	0.034	0.011	3.1
Массивы	0.026	0.011	2.3
Хеш-таблицы	0.024	0.008	3
Строки	0.032	0.010	3.2
Объекты и классы	0.026	0.009	2.9
Векторы на плоскости	0.04	0.009	4.4
Шифрование AES	2.503	0.111	22.5
Регулярные выражения	1.923	0.116	16.6
Собственная компиляция	44.231	1.987	22.2

Из табл. 2 видно, что отношение скорости возрастает при увеличении объема программы.

Выводы

В результате работы была построена и реализована модель компилятора

для функционального языка Common Lisp. Компилятор формирует байт-код, который выполняется с помощью виртуальной машины. Выигрыш в скорости по сравнению с интерпретатором на реалистичных тестах (шифрование, регулярные выражения, компиляция самого себя) составляет 16-25 раз. Дальнейшее увеличение скорости можно достичь с помощью различных оптимизаций ком-

пилятора на разных стадиях [18]. Из очевидных оптимизаций можно отметить: оптимизацию арифметических выражений (преобразование операций с переменным числом параметров в операции с двумя параметрами), устранение лишних команд (множественная загрузка в аккумулятор, установка / чтение одной переменной), упрощение выражений [19].

Список литературы

1. Sperber Michael, Dybvig R. Kent, Flatt Matthew, Van Straaten Anton; et al. (August 2007). Revised6 Report on the Algorithmic Language Scheme (R6RS). Scheme Steering Committee. Retrieved 2011-09-13.
2. The Racket Manifesto (PDF) / M. Felleisen, R.B. Findler, M. Flatt, S. Krishnamurthi, E. Barzilay, J. McCarthy, S. Tobin-Hochstadt // Proceedings of the First Summit on Advances in Programming Languages; 2015. P. 113–128.
3. Абельсон Х., Сассман Д. Структура и интерпретация компьютерных программ, КДУ, 2022. 608 с.
4. Hart Tim, Levin Mike. AI Memo 39-The new compiler (PDF). Archived from the original (PDF) on 2020-12-13. Retrieved 2019-03-18.
5. Krishnamurthi Shriram. Programming Languages: Application and Interpretation. 3-thd edition. - Shriram Krishnamurthi, 2022. 376 p.
6. Ершов А. П., Покровский С. Б. Эволюция языков программирования // Проблемы информатики. 2017. № 2(35). С. 70-79. EDN ZOLFPJ.
7. Душкин Р. В. Функциональное программирование на языке Haskell. М.: ДМК Пресс, 2016. 608 с.
8. Романов С. С. Ключевые понятия и особенности объектно-ориентированного программирования // Таврический научный обозреватель. 2016. № 12-2(17). С. 141-146. EDN YFXCCN.
9. Гонцова А. В. Опыт разработки транслятора с языка Ассемблер RISC-V в машинный код // Обработка информации и математическое моделирование: материалы Всероссийской научно-технической конференции, Новосибирск, 24–25 апреля 2024 года. Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2024. С. 85-88. DOI 10.55648/OIMM-2024-1-85. EDN DUZEDV.

10. Наркевич А. С. Структура байт-кода виртуальной машины Java // Информационные технологии: материалы 85-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 01–13 февраля 2021 года. Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2021. С. 80-82. EDN VLEPYZ.
11. Альфред В. Ахо, Моника С. Лам, Рави Сети, Джейфри. Компиляторы: принципы, технологии и инструментарий. 2-е изд. М.: Диалектика-Вильямс, 2020. 1184 с.
12. Намаконов Е. С., Подкопаев А. В. Компиляция модели памяти OCaml в Power // Труды Института системного программирования РАН. 2019. Т. 31, № 5. С. 63-78. DOI 10.15514/ISPRAS-2019-31(5)-4. EDN GPHUIK.
13. Джереми Сик. Основы компиляции: инкрементный подход. СПб.: Питер, 2024. 256 с.
14. Компиляторы: принципы, технологии и инструментарий / Ахо Альфред В., Лам Миника С., Сети Рави, Ульман Джейфри Д. М.: Диалектика-Вильямс, 2018. 1184 с.
15. Сайбелль Питер. Практическое использование Common Lisp. М.: ДМК Пресс, 2017. - 488 с.
16. Грэй Пол. ANSI Common LISP. М.: Символ-Плюс, 2020. 448 с.
17. Чаплыгин А.А. Моделирование интерпретатора функционального языка программирования с возможностями метапрограммирования // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 2. С. 181-193. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-181-193>
18. Владимиров К. И. Оптимизирующие компиляторы. Структура и алгоритмы. М.: ACT, 2024. 272с.
19. Лопес Бруно Кардос, Аулер Рафаэль. LLVM: инфраструктура для разработки компиляторов. М.: ДМК Пресс, 2015. 342 с.

References

1. Sperber Michael, Dybvig R. Kent, Flatt Matthew, Van Straaten Anton; et al. (August 2007). Revised6 Report on the Algorithmic Language Scheme (R6RS). Scheme Steering Committee. Retrieved 2011-09-13.
2. Felleisen M., Findler R.B., Flatt M., Krishnamurthi S., Barzilay E., McCarthy J., Tobin-Hochstadt S. The Racket Manifesto (PDF). Proceedings of the First Summit on Advances in Programming Languages: 2015. 113–128.
3. Abelson H., Sussman D. Structure and interpretation of computer programs. KDU; 2022. 608 p. (In Russ.)

4. Hart Tim; Levin Mike. AI Memo 39-The new compiler (PDF). Archived from the original (PDF) on 2020-12-13. Retrieved 2019-03-18.
5. Krishnamurthi Shriram. Programming Languages: Application and Interpretation. 3rd ed. Shriram Krishnamurthi, 2022. 376 p.
6. Ershov A. P., Pokrovsky S. B. Evolution of programming languages. *Problemy informatiki = Problems of informatics*. 2017; (2): 70-79. (In Russ.). EDN ZOLFPJ.
7. Dushkin R.V. Functional programming in Haskell. Moscow: DMK Press; 2016. 608 p. (In Russ.)
8. Romanov S. S. Key concepts and features of object-oriented programming. *Tavricheskii nauchnyi obozrevatel' = Tavricheskiy scientific observer*. 2016; (12-2): 141-146. (In Russ.). EDN YFXCCN.
9. Gontsova A. V. Experience in Developing a Translator from RISC-V Assembly Language to Machine Code. In: *Obrabotka informatsii i matematicheskoe modelirovaniye : materialy Vserossiiskoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii = Information Processing and Mathematical Modeling. Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference*. 2024. Novosibirsk: Siberian State University of Telecommunications and Informatics; 2024. P. 85–88. (In Russ.). DOI 10.55648/OIMM-2024-1-85. EDN DUZEDV.
10. Narkevich A. S. The structure of the bytecode of the Java virtual machine. In: *Informatsionnye tekhnologii: materialy 85-i nauchno-tehnicheskoi konferentsii professorskoprepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastием) = Information technologies. Materials of the 85th scientific and technical conference of faculty, researchers and graduate students (with international participation)*. Minsk: Belarusian State Technological University; 2021. P. 80-82. (In Russ.). EDN VLEPYZ.
11. Alfred V. Aho, Monica S. Lam, Ravi Sethi, Jeffrey. Compilers:Principles, Technologies and Tools. 2nd ed. Moscow: Dialectics-Williams; 2020. 1184 p. (In Russ.)
12. Namakonov E. S., A. V. Podkopaev Compilation of the OCaml memory model to Power. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN = Proceedings of the Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences*. 2019; 31(5): 63-78. (In Russ.) DOI 10.15514/ISPRAS-2019-31(5)-4. EDN GPHUIK.
13. Jeremy Sick. Compilation Basics: An Incremental Approach. St.Peterburg: Peter; 2024. 256 p. (In Russ.)
14. Alfred V. Aho, Monica S. Lam, Ravi Sethi, Jeffrey D. Ullman. Networks. Compilers: principles, technologies and tools. Moscow: Dialectics-Williams; 2018. 1184 p. (In Russ.)
15. Seibel Peter. Practical use of Common Lisp. Moscow: DMK Press; 2017. 488 p. (In Russ.)
16. Paul Graham. ANSI Common LISP. Moscow: Symvol-Plus; 2020. 448 p. (In Russ.)

17. Chaplygin A.A. Modeling of a functional programming language interpreter with metaprogramming capabilities. *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.* 2024;14(2):181-193. (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-181-193>
18. Vladimirov K. I. Optimizing compilers. Structure and algorithms. Moscow: AST; 2024. 272 p. (In Russ.)
19. Lopez Bruno Cardos, Auler Rafael. LLVM: An Infrastructure for Compiler Development. Moscow: DMK Press; 2015. 342 p. (In Russ.)

Информация об авторе / Information about the Author

Чаплыгин Александр Александрович,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры программной инженерии,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: alex_chaplygin@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8739-2695>

Aleksandr A. Chaplygin, Cand. of Sci.
(Engineering), Associate Professor,
Associate Professor of the Software Engineering
Department, Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: alex_chaplygin@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8739-2695>

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.942

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-113-123>

Когнитивный алгоритм и программа конспектирования текста

Л. А. Лисицин¹✉, А.Л. Лисицин², Д.Н. Блоха¹

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

² Курский государственный университет
ул. Радищева, д. 33, г. Курск 305000, Российская Федерация

✉ e-mail: leo_263@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Исследование направлено на изучение возможностей применения когнитивных технологий (КТ) для эффективного решения плохо формализуемых задач в сфере анализа больших объемов текстовых данных. Особое внимание уделяется задаче автоматического конспектирования текстов — одной из важнейших проблем современной науки и техники, стимулирующей активное развитие методов искусственного интеллекта и машинного обучения.

Методы. Для достижения поставленной цели применялся извлекательный метод автоматического составления конспекта. Этот подход предполагает выбор наиболее значимых фрагментов исходного текста путем выделения отдельных предложений или фраз на основании определенных критерии. Использовались следующие критерии отбора: частота встречаемости слов; семантическая важность слов и выражений; позиция предложений внутри документа. Эти показатели позволяют выделить основные мысли текста и создать компактное резюме, сохраняющее смысл исходного материала.

Результаты. В ходе экспериментов была разработана программа на языке программирования Python, реализующая извлеченный метод конспектирования. Алгоритм основан на анализе частоты появления ключевых слов в тексте, что обеспечивает эффективную оценку значимости каждого предложения. Программа обладает рядом преимуществ: простота реализации и эксплуатации; открытый исходный код, позволяющий легко адаптировать решение под конкретные нужды пользователей; высокая эффективность при обработке значительных объемов текстовой информации. Разработанный инструмент демонстрирует способность эффективно создавать краткое изложение текста, сохраняя основную смысловую нагрузку и структуру оригинального содержания.

Заключение. Использование когнитивного алгоритма позволило значительно повысить производительность процесса анализа и обработки текстовой информации. Предложенная методика способна автоматизировать рутинные операции по составлению конспектов, помогая специалистам быстро получать общее представление о содержании крупных документов и публикаций. Это особенно актуально в условиях современного информационного общества, характеризующегося постоянно растущими потоками данных, которые требуют быстрого и качественного осмысления. Таким образом, исследование показало перспективность внедрения когнитивных технологий в сферу автоматизации интеллектуального труда и предложило практическое решение актуальной проблемы конспектирования больших объемов информации, которое может стать важным помощником для специалистов и исследователей.

Ключевые слова: когнитивное моделирование; извлекательное конспектирование; частотный анализ; программирование; обработка естественного языка (NLP).

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

Для цитирования: Лисицин Л. А., Лисицин А.Л., Блоха Д. Н. Когнитивный алгоритм и программа конспектирования текста // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(3): 113-123. <https://doi.org/10.21869/-2223-1560-2025-29-3-113-123>.

Поступила в редакцию 17.04.2025

Подписана в печать 24.07.2025

Опубликована 30.09.2025

A cognitive algorithm and a text annotation program

Leonid A. Lisitsin¹ , Alexander L. Lisitsin², Dmitry N. Blokha¹

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

² Kursk State University
33, Radishcheva str., Kursk 305000, Russian Federation

 e-mail: leo_263@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The research is aimed at exploring the possibilities of using cognitive technologies (CT) to effectively solve poorly formalized tasks in the field of analyzing large amounts of textual data. Special attention is paid to the task of automatic text annotation, which is one of the most important problems of modern science and technology, stimulating the active development of artificial intelligence and machine learning methods.

Methods. To achieve this goal, an extractive method of automatic summary compilation was used. This approach involves selecting the most significant fragments of the source text by highlighting individual sentences or phrases based on certain criteria. The following selection criteria were used: frequency of occurrence of words; semantic importance of words and expressions; position of sentences within the document. These indicators allow you to highlight the main thoughts of the text and create a compact summary that preserves the meaning of the source material.

Results. During the experiments, a program was developed in the Python programming language that implements the extracted method of taking notes. The algorithm is based on an analysis of the frequency of occurrence of keywords in the text, which ensures an effective assessment of the significance of each sentence. The program has a number of advantages: simplicity of implementation and operation; open source code, which makes it easy to adapt the solution to the specific needs of users; high efficiency in processing significant amounts of textual information. The developed tool demonstrates the ability to effectively create a summary of the text, while maintaining the basic meaning and structure of the original content.

Conclusion. The use of a cognitive algorithm has significantly improved the productivity of the text information analysis and processing process. The proposed methodology is capable of automating routine operations for making notes, helping specialists quickly get a general idea of the contents of large documents and publications. This is especially important in the context of the modern information society, characterized by ever-growing data flows that require rapid and high-quality comprehension. Thus, the study showed the prospects of introducing cognitive technologies into the field of automation of intellectual work and offered a practical solution to the urgent problem of taking notes on large amounts of information, which can become an important assistant for specialists and researchers.

Keywords: cognitive modeling; extractive annotation; frequency analysis; programming; natural language processing (NLP).

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

For citation: Lisitsin L. A., A Lisitsin. L., Blokha D. N. A cognitive algorithm and a text annotation program. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(3): 113-123. (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-113-123>.

Received 17.04.2025

Accepted 24.07.2025

Published 30.09.2025

Введение

Конспектирование текста – это процесс сокращения исходного текста с сохранением его основной смысловой нагрузки и ключевых идей. В эпоху информационного взрыва [1] умение быстро и точно извлекать важную информацию является критически важным навыком как для студентов, так и для профессионалов [2,3].

Актуальность статьи о конспектировании текста обусловлена несколькими факторами бурного роста информации, когда возникает необходимость в эффективных методах извлечения ключевых данных в условиях ограниченного времени. А также при выделении основных идей и ключевых моментов из текста, что способствует лучшему усвоению материала студентами и успешной подготовке к экзаменам.

Конспектирование текста представляет собой важную задачу, которая стимулирует развитие методов искусственного интеллекта.

Обзор программ и инструментов для автоматического конспектирования текста [4,5,6] включает в себя как коммерческие, так и открытые решения, которые используют различные методы обработки естественного языка (NLP) [7,8] и машинного обучения [9,10]. Ниже

представлены некоторые из наиболее известных и популярных программ и библиотек для конспектирования текста.

SMMRY – это бесплатный онлайн-инструмент, который позволяет пользователям вставлять текст или URL для получения краткого резюме. Использует простые алгоритмы извлекательного конспектирования, основанные на частоте слов и значимости предложений.

Преимущества – легкий в использовании, не требует регистрации, быстро обрабатывает текст.

Gensim [11,12] – это библиотека для обработки естественного языка на Python, которая включает в себя инструменты для извлекательного конспектирования. Использует алгоритм TextRank для извлечения ключевых предложений из текста.

Преимущества – открытый исходный код, поддерживает работу с большими объемами данных.

Сравнение с существующими программами и методами.

Метод извлекательного конспектирования, основанный на частотном анализе, не является уникальным. Рассмотрим основные аналоги.

TextRank. Алгоритм основан на графе, где предложения рассматриваются как вершины, а их связи – как ребра, с учетом частоты слов и их взаимосвязей. Преимущество TextRank – учитывает

структурные связи между предложениями, что может улучшить связность конспекта.

TF-IDF. Метод, использующий частоту слов с учетом их редкости в тексте. В статье метод ограничен частотным анализом внутри одного текста, что менее эффективно для выделения уникальных терминов по сравнению с TF-IDF.

LSA (Latent Semantic Analysis) и LDA (Latent Dirichlet Allocation). Эти методы анализируют семантическую структуру текста, что делает их более сложными, но потенциально более точными в выделении ключевых идей¹ [13].

SMMRY и SummarizeBot. Используют схожие извлекательные подходы [14], основанные на частоте слов и значимости предложений, но могут дополняться абстрактивными методами.

Для сравнения систем ужатия текста можно использовать несколько метрик, которые описаны ниже.

Пример таблицы с данными обработки одного размера текста для сравнения, показан в табл. 1.

Эти данные могут варьироваться в зависимости от конкретных условий использования и характеристик текстов, которые обрабатываются.

Для наглядного сравнения методов программного конспектирования текста проведем конспектирование текста одно-

го объема. В табл. 2 указаны данные с числовыми оценками по всем методам.

Предлагаемая программа и метод имеют свои достоинства, которые указаны в заключении.

Материалы и методы

Существуют два основных подхода к автоматическому конспектированию: извлекательный и абстрактивный.

Технологические решения для автоматического конспектирования включают классические алгоритмы обработки естественного языка, TF-IDF, методы на основе графов (TextRank), а также современные модели глубокого обучения (BERT, GPT и др.) [15, 16].

В работе предлагается программа на Python для простого извлекательного конспектирования. Данная программа использует частотный анализ слов для оценки и выбора ключевых предложений из текста.

Суть метода. Метод извлекательного конспектирования текста заключается в автоматическом выделении ключевых фраз из исходного текста с целью создания его краткой и информативной версии. Этот метод основывается на анализе содержания текста и использовании различных алгоритмов для оценки значимости его элементов.

Основные этапы метода

Разделение текста на предложения, что позволяет анализировать его структуру и содержание.

¹ Python. Сборник упражнений / пер. с англ. А. Ю. Гинько. М.: ДМК Пресс, 2021. 238 с.

Таблица 1. Работа с данными обработки одного размера текста**Table 1.** Working with single-size text processing data

Характеристика / Characteristics	Предлагаемая программа / Proposed program	Gensim	Sumy	TextRank
Коэффициент сжатия (%)	30%	25%	20%	25%
Точность извлечения (%)	75%	85%	80%	80%
Время обработки (сек)	2	1.5	1.8	2
Размер модели (МБ)	50	20	15	175

Таблица 2. Данные с числовыми оценками по всем методам программного конспектирования**Table 2.** Data with numerical estimates for all software monitoring methods

Метод / Method	Время обработки (сек) / Processing time (sec)	Коэффициент сжатия (%) / Compression ratio (%)	Точность извлечения (%) / Extraction accuracy (%)	Размер модели (МБ) / Model size (MB)
Извлекательное конспектирование	2	50%	80	0.5
Абстрактное конспектирование	5	100%	90	1.0
Суммирование на основе графов	3	80%	85	0.7
Методы на основе машинного обучения	4	150%	95	2.0
Семантическое конспектирование	5	120%	92	1.5
Методы на основе трансформеров	6	200%	98	3.0
Контекстуальное конспектирование	4	90%	88	1.2

Предобработка текста. Удаляются знаки препинания и приводятся слова к нижнему регистру. Это упрощает анализ и позволяет избежать дублирования при подсчете частоты слов.

Частотный анализ слов. Программа подсчитывает, как часто каждое слово встречается в тексте. Это позволяет определить, какие слова являются наиболее значимыми для понимания содержания

жания. Частотный анализ может включать исключение стоп-слов (не несущих смысловой нагрузки).

Оценка предложений. Каждое предложение получает оценку на основе частоты значимых слов. Чем больше значимых слов в предложении, тем выше его оценка.

Выбор ключевых предложений. На основе оценок выбираются несколько предложений с наивысшими значениями, которые будут включены в конспект.

Формирование итогового конспекта. Выбранные предложения объединяются в итоговый текст, который представляет собой сжатую версию исходного материала.

Преимущества и ограничения метода описаны в заключении.

Математическая модель метода извлекательного конспектирования [17].

Обозначения:

T – исходный текст, представленный как множество предложений

$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, где n – количество предложений.

$W = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$ – множество всех слов в тексте после предобработки, где m – общее количество уникальных слов.

$F_{(wi)}$ – частота слова w_i в тексте (количество его появлений).

StopWords – множество стоп-слов, исключаемых из анализа.

$\text{Score}(s_j)$ – оценка значимости предложения s_j .

k – желаемое количество предложений в конспекте (или процент от n).

C – итоговый конспект, состоящий из подмножества S .

Этапы метода

1. *Предобработка текста:*

Разделение текста T на предложения: $T \rightarrow S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$.

Для каждого предложения s_j :

Удаление знаков препинания:

$s_j = \text{RemovePunctuation}(s_j)$.

Приведение к нижнему регистру:

$s_j = \text{LowerCase}(s_j)$.

Разбиение на слова:

$s_j \rightarrow \{w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jl}\}$,

где l – количество слов в предложении.

2. *Частотный анализ слов:*

Для каждого слова $w_i \in W$:

$$F(w_i) = \sum_{j=1}^n \text{Count}(w_i, s_j),$$

где $\text{Count}(w_i, s_j)$ — количество появлений слова w_i в предложении s_j .

Исключение стоп-слов:

$W' = W \setminus \text{StopWords}$.

Оценка предложений:

Для каждого предложения s_j :

$\text{Score}(s_j) = {}^xF(w_i)$.

$w_i \in s_j, w_i \in W'$

Выбор ключевых предложений:

Сортировка предложений по убыванию $\text{Score}(s_j)$.

Выбор k предложений с наивысшими оценками: $C = \{s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{ik}\}$, где $k = \lfloor p \cdot n \rfloor$, а p – заданный процент сжатия.

Формирование конспекта:

Объединение выбранных предложений в порядке их появления в исходном тексте: $C = \text{Join}(s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{ik})$.

Формализация задачи

Цель метода – минимизировать объем текста при сохранении ключевой информации:

$$C = \arg \max_{C \subseteq S, |C|=k} \sum_{s_j \in C} Score(s_j).$$

Ограничение: $|C|=k$, где k определяется пользователем или как $k = \lfloor p \cdot n \rfloor$.

Метрики для оценки метода

Для оценки эффективности метода предлагаются следующие метрики:

1. Коэффициент сжатия (CR):

$$CR = \frac{|T| - |C|}{|T|} \cdot 100\%,$$

где $|T|$ – длина исходного текста (в символах или словах), $|C|$ – длина конспекта.

2. Точность извлечения (P, R, F1):

$$P = TP / (TP + FP),$$

где TP – истинно положительные предложения, FP – ложноположительные, FN – ложноотрицательные, P – точность (Precision) доли правильно извлеченных предложений среди всех извлеченных.

Время обработки (T_p): время, затраченное на обработку текста и создание конспекта (в секундах).

Качество связности: оценивается субъективно (экспертами) или с использованием косинусного сходства между векторами предложений.

Размер модели (M_s): Размер программы в мегабайтах.

Когнитивный алгоритм работы программы [18]:

1. Ввод информации.

2. Предварительная обработка текста: разбивка текст на отдельные пред-

ложения (это позволяет анализировать его структуру и содержание) и удаление знаков препинания с преобразованием слова к нижнему регистру (чтобы избежать дублирования при анализе).

3. Анализ содержания: подсчёт, как часто каждое слово встречается в тексте для определения наиболее значимых слов в тексте и исключение распространенных слов (стоп-слов), которые не несут смысловой нагрузки (предлоги, союзы).

4. Оценка предложений: для каждого предложения вычисляется его "оценка" на основе частоты встречающихся в нем значимых слов (чем больше слов, тем выше оценка) и сравниваются оценки всех предложений (чтобы определить, какие из них наиболее информативны).

5. Выбор ключевых предложений: выбирается несколько предложений с наивысшими оценками для сохранения основных идей текста.

6. Формирование итогового конспекта: выбранные предложения объединяются в итоговый текст, который представляет собой конспект. Дополнительно проверяется, насколько логично составлен итоговый текст.

7. Программа выводит итоговый конспект.

Результаты и их обсуждение

Метод не является уникальным, частотный анализ слов – это стандартный подход в извлекательном конспектировании, используемый в таких инструментах, как SMMRY и Gensim. Однако его ценность заключается в простоте, от-

крытом исходном коде и возможности локальной работы. Для повышения уникальности можно интегрировать элементы TextRank или TFIDF, чтобы улучшить учет контекста и связности.

Математическая модель формализована с учетом этапов предобработки, частотного анализа, оценки предложений и выбора ключевых предложений.

Метрики предложены коэффициент сжатия, точность извлечения (F1), ROUGE, время обработки, качество связности и размер модели, что позволяет всесторонне оценить эффективность метода.

Выводы

Использование когнитивных методов позволяет достичь нужных результатов при конспектировании текстов, а именно времени и вычислительной мощности компьютера [19].

Реализованный алгоритм с разработанной программой обладает следующими достоинствами:

1. Простота использования благодаря простому и понятному интерфейсу.

2. Эффективность – благодаря частотному анализу слов для оценки значимости предложений быстро и точно выделяются ключевые идеи из текста.

3. Легкость в настройке.

4. Открытый исходный код для модификации и улучшения.

5. Отсутствие зависимости от внешних API - программа работает локально, что исключает необходимость в интернет-соединении и повышает безопасность данных.

6. Метод не является уникальным, но для улучшения можно интегрировать в него элементы TextRank или TFIDF, для повышения учета контекста и связности.

Недостатки программы

1. Ограниченнная точность (в сложных текстах).

2. Отсутствие абстрактивного конспектирования.

3. Зависимость от качества исходного текста: эффективность программы может снижаться при работе с плохо структурированными текстами.

Список литературы

1. Староверова Н. А., Шустрова М. Л. Искусственный интеллект в профессиональной сфере. Казань: ООО "Ред.-издательский центр "Школа", 2022. Ч. 1. 84 с. EDN PTSPTI.
2. Бова В.В., Кравченко Ю.А., Родзин С.И. Методы и алгоритмы кластеризации текстовых данных (ОБЗОР) // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 4 (228). С. 122-143.
3. Григорян Э.Г., Паршин М.Н. Методы NLP для предобработки текстовых данных и выделения признаков // Бизнес и общество. 2021. № 3 (31).
4. Тюрина Д.А., Пальмов С.В. Применение нейронных сетей в обработке естественного языка // Журнал прикладных исследований. 2023. № 7. С. 158-162.

5. Irada Seyidova, Osman Şərifli I.S.O.Ş., Murad Abbasov M.A. Реализация методов искусственного интеллекта в обработке естественного языка с использованием технологий больших данных // Equipment, Technologies, Materials. 2024. Т. 23, № 5. С. 104-113.
6. Кравченко Д.Ю. Модель онтологии знаний для интеллектуальных систем обработки и анализа текстов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2024. № 2 (238). С. 38-50.
7. Захарова М.В., Интеллектуальные помощники для научного исследования в университетах // Мир науки. Педагогика и психология. 2024. Т. 12. № 4.
8. Ковтан А.И., Якубович Д.А., Использование систем искусственного интеллекта в обработке текстовой информации // Сборник материалов научно-практических конференций. Владимир, 2024. С. 1785-1796.
9. Лисицин Л. А., Халин Ю. А., Лисицин А. Л. Системы поддержки принятия управлеченческих решений в условиях неполной информации // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 4-2 (43). С. 95-99.
10. Sharma M., Schuermyer C., Benware B. Determination of Dominant-Yield-Loss Mechanism with Volume Diagnosis // Proc. of IEEE Design & Test of Computers. 2010. Vol.27, no.3. P.54-61.
11. Сурова Н. Ю., Косов М. Е. Искусственный интеллект. М.: Издательство "Юни-ти-Дана", 2021. 408 с. EDN QZEMDW.
12. Остроух А. В. Введение в искусственный интеллект. Красноярск: Научно-инновационный центр, 2020. 250 с. DOI 10.12731/978-5-907208-26-1. EDN KTJGZM.
13. Когнитивное моделирование информационного обеспечения игрового автоматизированного обучения / Халин Ю.А., Катыхин А.И., Зинкин С.А., Шилин А.А. // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022. Т. 26, № 4. С. 117-131. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-117-131>
14. Исследование методов обработки текстовой информации и обзор этапов создания модели искусственного интеллекта при создании чат-ботов / А.В. Иванова, А.А. Кузьменко, Р.А. Филиппов [и др.] // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2021. № 2 (12). С. 19-23.
15. Наместников А. М. Онтологический подход к структурированию знаний проектной организации // Радиотехника. 2016. N 9. С. 77-83.
16. Цифровая трансформация и искусственный интеллект в разработке биологически активных веществ и лекарственных форм / Л. В. Погребняк, Е. А. Кульгав, Е. В. Ковтун, А. В. Погребняк. М.: Мир науки, 2022. 201 с. EDN LWVFJC.
17. Lal M. Neo4j Graph Data Modeling. Packt Publishing, 2015. 119 p.
18. Никитин Ю.В., Хорошилов А.А. Интеллектуальный текстовый процессор // Искусственный интеллект. Теория и практика. 2023. № 1 (1). С. 56-75.
19. Пань В., Цзы Е. Роль искусственного интеллекта (AGI) в цифровой журналистике: от производства новостей до взаимодействия со зрителем // Успехи гуманитарных наук. 2024. № 8. С. 36-40.

References

1. Staroverova N. A., Shustrova M. L. Artificial intelligence in the professional sphere. Kazan: Red.-izdatel'skii tsentr "Shkola"; 2022. Part 1. 84 p. (In Russ.). EDN PTSPTI.
2. Bova V.V., Kravchenko Yu.A., Rodzin S.I. Methods and algorithms for clustering text data (review). *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFU. Technical sciences.* 2022; (4): 122-143. (In Russ.).
3. Grigoryan E.G., Parshin M.N. NLP methods for text data preprocessing and feature extraction. *Biznes i obshchestvo = Business and Society.* 2021; (3). (In Russ.).
4. Tyurina D.A., Palmov S.V., Application of neural networks in natural language processing. *Zhurnal prikladnykh issledovanii = Journal of Applied Research.* 2023; (7): 158-162. (In Russ.).
5. Irada Seyidova, Osman Şərifli I.S.O.Ş., Murad Abbasov M.A., Implementation of artificial intelligence methods in natural language processing using big data technologies. *Equipment, Technologies, Materials.* 2024; 23(5): 104-113. (In Russ.).
6. Kravchenko D.Y., Knowledge ontology model for intelligent text processing and analysis systems. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFU. Technical sciences.* 2024; (2): 38-50. (In Russ.).
7. Zakharova M.V. Intellectual assistants for scientific research at universities. *Mir nauki. Pedagogika i psichologiya = World of science. Pedagogy and psychology.* 2024; 12(4). (In Russ.).
8. Kovtan A.I., Yakubovich D.A., The use of artificial intelligence systems in text information processing. In: *Sbornik materialov nauchno-prakticheskikh konferentsii = Collection of materials of scientific and practical conferences.* Vladimir; 2024. P. 1785-1796. (In Russ.).
9. Lisitsin L. A., Khalin Yu. A., Lisitsin A. L. Management decision support systems in conditions of incomplete information. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University.* 2012; (4-2): 95-99. (In Russ.).
10. Sharma M., Schuermyer C., Benware B., Determination of Dominant-Yield-Loss Mechanism with Volume Diagnosis. *Proc. of IEEE Design & Test of Computers.* 2010; 27(3): 54-61. (In Russ.).
11. Surova N. Y., Kosov M. E. Artificial intelligence. Moscow: Unity-Dana Publishing House; 2021. 408 p. (In Russ.). EDN QZEMDW.
12. Ostroukh A.V. Introduction to artificial intelligence. Krasnoyarsk: Nauchno-innovatsionnyi tsentr; 2020. 250 p. (In Russ.). DOI 10.12731/978-5-907208-26-1. EDN KTJGZM.
13. Khalin Y. A., Katykhin A. I., Zinkin S. A., Shilin A. A. Cognitive Modeling of Information Support for Game-Based Automated Learning. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosu-*

darstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University. 2022; 26(4): 117-131 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-117-131>

14. Ivanova A.V., Kuzmenko A.A., Filippov R.A., et al. Research of text information processing methods and an overview of the stages of creating an artificial intelligence model when creating chatbots. *Avtomatizatsiya i modelirovaniye v proektirovaniy i upravlenii = Automation and modeling in design and management.* 2021; (2): 19-23. (In Russ.).

15. Namestnikov A.M. An ontological approach to structuring knowledge of a project organization. *Radiotekhnika = Radio Engineering.* 2016; (9): 77-83. (In Russ.).

16. Pogrebnyak L. V., Kulgav E. A., Kovtun E. V., Pogrebnyak A.V. Digital transformation and artificial intelligence in the development of biologically active substances and dosage forms. Moscow: Mir nauki; 2022. 201 p. (In Russ.). EDN LWVFJC.

17. Lal M. Neo4j Graph Data Modeling. Packt Publishing, 2015. 119 p.

18. Nikitin Yu.V., Khoroshilov A.A. Intelligent word processor. *Iskusstvennyi intellekt. Teoriya i praktika = Artificial intelligence. Theory and practice.* 2023; (1): 56-75. (In Russ.).

19. Pan V., Zi E., The role of artificial intelligence (AGI) in digital journalism: from news production to interaction with the viewer. *Uspekhi gumanitarnykh nauk = Successes of the Humanities.* 2024; (8): 36-40 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Лисицин Леонид Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: leo_263@mail.ru

Лисицин Александр Леонидович, старший преподаватель кафедры информационной безопасности, Курский государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vip.lisicin@mail.ru

Блоха Дмитрий Николаевич, студент кафедры информационной безопасности, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: alex25lisitsyn@gmail.com

Leonid A. Lisitsin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Software Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: leo_263@mail.ru

Alexander L. Lisitsin, Senior Lecturer, Information Security Department, Kursk State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vip.lisicin@mail.ru

Dmitry N. Blokh, Student of the Information Security Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: alex25lisitsyn@gmail.com

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.89

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-124-136>



Гибридный генетический алгоритм для идентификации параметров нелинейных моделей с ограничениями в задачах импеданса биоматериала

Н. А. Корсунский¹, Р. А. Томакова¹ ✉, В. А. Старков¹

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

✉ e-mail: rtomakova@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Цель исследования заключается в оценке эффективности гибридного алгоритма, сочетающего генетический алгоритм (ГА) и метод наименьших квадратов (МНК), предназначенный для идентификации параметров биоимпеданса в задачах диагностики легочных патологий. Основное внимание уделено повышению точности измерений (норма невязки ≤ 0.09) и разработке рекомендаций по интеграции метода в программно-аппаратные комплексы (ПАК) для биомедицинской диагностики.

Методы. Исследование выполнено на базе модуля E20-10 («L-Card»), формирующего синусоидальные сигналы, с использованием электродов ЭКГ для минимизации паразитных емкостей. Параметры биоимпеданса идентифицированы с помощью гибридного алгоритма, в котором генетический поиск сочетался с методом наименьших квадратов, включая регуляризацию ($\lambda=0.1$). Анализ данных проводился методом Коула, а управление измерениями — через ПО, реализованное на Delphi, обеспечившее обработку сигналов в реальном времени.

Результаты направлены на создание основы для автоматизации интерпретации данных с использованием нейросетевых технологий, направленных для классификации заболеваний с точностью не менее 97.5%. На основе модуля E20-10 и комплекса, разработанного для измерения и биологического анализа. Среднее расстояние между данными модели и Xperiment составляет 4% (стандартное 0,09 бесчеловечно). Ошибка идентификации REXTRA не превышает 2,1%, что подтверждает надежность метода в условиях клинического вмешательства.

Заключение. Исследование подтвердило, что гибридный алгоритм обеспечивает высокую точность (норма невязки 0,09) и способность регенерировать при определении биологических параметров. Анализ характеристик амплитудной и частотной фазы, которые позволили разработать классификации, которые могут автоматизировать постановку диагноза заболевания легких. Результаты показали, что потенциал метода создания медицинского диагностического пакета, который может работать в режиме реального времени (1 сек на анализ). Тем не менее, для клинической реализации необходимы дополнительные исследования живых субъектов, а также адаптация алгоритмов с различными заболеваниями.

Ключевые слова: биоимпедансная спектроскопия; генетический алгоритм; нейросетевой анализ; оптимизация; идентификация параметров.

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

© Корсунский Н. А., Томакова Р. А., Старков В. А., 2025

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2025; 29(3): 124-136

Для цитирования: Корсунский Н. А., Томакова Р. А., Старков В.А. Гибридный генетический алгоритм для идентификации параметров нелинейных моделей с ограничениями в задачах импеданса биоматериала // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(3): 124-136. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-124-136>.

Поступила в редакцию 05.07.2025

Подписана в печать 01.09.2025

Опубликована 30.09.2025

Hybrid genetic algorithm for identifying parameters of nonlinear models with constraints in biomaterial impedance problems

Nikita A. Korsunsky¹, Rimma A. Tomakova¹✉, Vadim A. Starkov¹

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

✉ e-mail: rtomakova@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The research objective is to evaluate the effectiveness of a hybrid algorithm combining a genetic algorithm (GA) and a least squares method (LSM) designed to identify bioimpedance parameters in the tasks of pulmonary pathology diagnostics. The main attention is paid to improving the measurement accuracy (the norm of the residual ≤ 0.09) and developing recommendations for integrating the method into software and.

Methods. The study was performed on the basis of the E20-10 module ("L-Card"), which generates sinusoidal signals using ECG electrodes. to minimize parasitic containers. The bioimpedance parameters were identified using a hybrid algorithm in which genetic search was combined with the least squares method, including regularization ($\lambda=0.1$). Data analysis was carried out using the Cole method, and measurement control was carried out through software implemented in Delphi, which provided real-time signal processing.

Results. Based on the E20-10 module and a complex developed for measurement and biological analysis. The average distance between the model data and Xperiment is 4% (standard deviation of 0.09). The REXTRA identification error does not exceed 2.1%, which confirms the reliability of the method in clinical settings.

Conclusion. The study has confirmed that the hybrid algorithm provides high accuracy (residual norm of 0.09) and the ability to regenerate when determining biological parameters. Analysis of the characteristics of the amplitude and frequency phase, which allowed the development of classifications that can automate the diagnosis of lung diseases. The results showed that the potential of the method is to create a medical diagnostic package that can work in real time (1 sec per analysis). However, additional research on living subjects is required for clinical implementation, as well as the adaptation of algorithms for various diseases.

Keywords: bioimpedance spectroscopy; genetic algorithm; neural network analysis; optimization; parameter identification.

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

For citation: Korsunsky N. A., Tomakova R.A., Starkov V. A. Hybrid genetic algorithm for identifying parameters of nonlinear models with constraints in biomaterial impedance problems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(3): 124-136 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-124-136>.

Received 05.07.2025

Accepted 01.09.2025

Published 30.09.2025

Введение

Электрический импеданс представляет собой неинвазивный метод, который позволяет исследовать внутренние физиологические процессы организма с высокой чувствительностью и безболезненно для пациента [1]. С целью повышения точности диагностики в исследовании применен метод многочастотного зондирования, который использует некий диапазон частот для построения графика Коула [2]. Это позволяет не только анализировать базовые характеристики, но и учитывать возможные изменения, которые могут свидетельствовать о развитии патологии [3].

С увеличением сложности и объема медицинской информации становится актуальным внедрение систем поддержки принятия решений в медицинскую практику [4]. Интеграция биотехнологии с такими системами может значительно улучшить качество здравоохранения. Благодаря Bioimpedansometry, можно не только выполнить эффективную оценку общего состояния организма, но и проводить изучение компонентов ткани в различных областях организма. Это делает метод применимым для ранней диагностики и эффективного мониторинга лечения [5].

Несмотря на отмеченные преимущества, измерение биологического импеданса представляет сложный процесс [6]. Некоторые исследования [7] показали, что высокая точность измерения требует расчета идентификации моделей

тканей и обоснования точности данных о ряде частот. Современные технологические решения направлены на повышение точности результатов [8], что является важной задачей для успешной реализации в клинической практике [9].

Разработка специализированного оборудования, например, комплекса, E20-10 системы L Card, позволяет преодолевать существующие ограничения и предоставлять более точные и надежные данные для анализа [10]. Внедрение этих инновационных технологий открывает новые возможности для диагностики и лечения респираторных заболеваний, облегчая исследования и улучшение методов исследований в медицине [11].

Целью данного исследования является разработка и оценка эффективности гибридного алгоритма (ГА + МНК) для идентификации параметров двухполюсника, моделирующего биоимпеданс тканей, в задачах диагностики легочных патологий. Основные этапы исследований включают:

1. Определение шести параметров модели двухполюсника, описывающих нелинейные характеристики биоматериала.
2. Повышение точности измерений за счет комбинации глобального поиска (ГА) и локальной оптимизации (МНК) для решения системы уравнений двухполюсника (1).
3. Интеграцию алгоритма в программно-аппаратные комплексы (ПАК) медицинской диагностики для анализа данных в реальном времени.

4. Формирование базы данных параметров для обучения нейросетевых моделей, способных автоматизировать классификацию заболеваний легких с точностью до 97.5%.

Двухполюсник используется как математическая модель, описывающая импеданс тканей.

Для математического описания импеданса биологических тканей применяется модель двухполюсника, которая позволяет анализировать электрические свойства материала через совокупность сопротивлений и ёмкостей. В исследовании для имитации сегментов биоматериала была выбрана рекуррентная модель Войта [12], известная своей способностью учитывать неоднородность тканевых структур (рис. 1). В данной работе задача оптимизации заключается в аппроксимации экспериментального графика Коула с использованием модели трехзвенного двухполюсника (рис. 1). Эта модель построена на базе каскадного соединения резисторов и конденсаторов, что позволяет более точно описать электрические свойства тканей через их импеданс на множестве частот.

Для определения параметров двухполюсника используется система урав-

нений (1), описывающая зависимость импеданса от параметров модели на различных множествах частот:

$$\left. \begin{aligned} a_l(\omega_l) &= \sum_{l=1}^L \left(\frac{R_l + \omega_l^2 C_l^2 R_l r (R_l + r)_l}{1 + \omega_l^2 C_l^2 (R_l + r)} \right); \\ b_l(\omega_l) &= \sum_{l=1}^L \left(\frac{-j\omega_l C_l R_l^2}{1 + \omega_l^2 C_l^2 (R_l + r)^2} \right); \\ \dots & \\ a_l(\omega_N) &= \sum_{l=1}^L \left(\frac{R_l + \omega_N^2 C_l^2 R_l r (R_l + r)_l}{1 + \omega_l^2 C_l^2 (R_l + r)} \right); \\ b_l(\omega_N) &= \sum_{l=1}^L \left(\frac{-j\omega_N C_l R_l^2}{1 + \omega_N^2 C_l^2 (R_l + r)^2} \right), \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где $a(\omega)$ и $b(\omega)$ – координаты точки на графике Коула при $\omega=\text{const}$. Модели определяются на основе множества точек импеданса.

В данной работе рассматривается задача на примере определения шести параметров нелинейной модели, описывающей экспериментальные данные.

Материалы и методы

Исследование включало три этапа: экспериментальный сбор биологических данных в группе, состоящей из 20 участников, математическое моделирование и оптимизацию параметров.

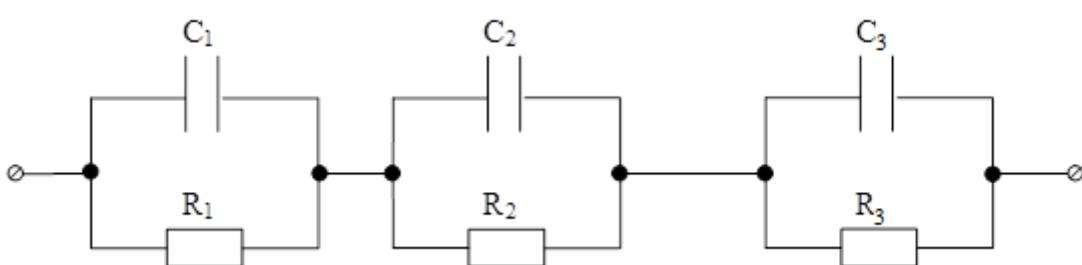


Рис. 1. Структура модели Войта

Fig. 1. Structure of the Voigt Model

Экспериментальная часть:

Для проведения исследований применялся модуль E20-10 (L-Card) с 16-битными АЦП/ЦАП и электродами ЭКГ, которые минимизируют нежелательные электрические помехи, вызванные взаимодействием элементов схемы.

Многочастотное зондирование проводилось на сегменте биоматериала с фиксацией импеданса на множестве частот.

Математическая модель

Модель находит применение при описании проводимости (импеданса) в объеме негомогенных сред, то есть когда каждому элементарному, локально-му объему присуща определенная проводимость и собственная постоянная времени. Модель состоит из последовательно соединенных звеньев, параллельно соединенных конденсатора и емкости [12]. Импеданс модели (одна точка на графике Коула при частоте ω) определяется согласно формуле [13]

$$Z(\omega) = \sum_{l=1}^L \left(R_l^{-1} + j\omega C_l \right)^{-1}. \quad (2)$$

Для моделирования биоимпеданса в рамках исследования была выбрана модель двухполюсника, которая позволяет учитывать неоднородности тканей. Важным моментом является то, что для аппроксимации графика Коула для биоматериала применялось многочастотное зондирование с частотным диапазоном от 1 Гц до 20 Гц, с шагом 1 Гц. Экспериментальные данные сопоставляются с графиками Коула модели трехзвенного двух-

полюсника для анализа и оптимизации параметров.

Алгоритм оптимизации параметров

Для идентификации параметров был разработан гибридный алгоритм, сочетающий генетический алгоритм (GA) и метод наименьших квадратов (МНК), схема которого приведена на рис. 2.



Рис. 2. Схема алгоритма оптимизации параметров гибридного алгоритма

Fig. 2. Scheme of the hybrid algorithm parameter optimization algorithm

Для идентификации параметров двухполюсников в модели Войта ($R_1, C_1, \dots, R_3, C_3$) реализован двухэтапный гибридный подход. На первом этапе генетический алгоритм генерирует список начальных решений, оценивая их соответствие экспериментальным данным через целевую функцию невязки. Лучшие комбинации параметров, показывающие наименьшую погрешность, используются для формирования новых вариантов за счёт объединения и случайных изменений. Такой подход обеспечивает поиск оптимальных решений во всем диапазоне возможных значений, исключая локальные минимумы [6].

На втором этапе метод наименьших квадратов выполняет локальную оптимизацию, уточняя полученные значения с учетом регуляризации. Данная комбинация методов исключает поиск в локальных минимумах и повышает скорость сходимости за счет синергии стохастического поиска и градиентной минимизации.

Результаты и их обсуждение

Для оптимизации параметров биоимпеданса реализован следующий код MATLAB, включающий этапы инициализации данных, настройки алгоритма и расчета невязки. Фрагменты кода представлены на рис. 3, 4.

```
% Запрос данных через диалоговые окна с пояснениями
prompt = {
    'Введите действительные части импеданса (через запятую):',
    'Введите мнимые части импеданса (через запятую):'
};

dlgtitle = 'Ввод экспериментальных данных';
dims = [1 50];
answer = inputdlg(prompt, dlgtitle, dims);
% Преобразование строк в числовые массивы
a = str2num(answer{1}); % Действительная часть (были X)
b = str2num(answer{2}); % Мнимая часть (были Y)
if length(a) ~= length(b)
    error('Ошибка: Количество точек в действительной (a) и мнимой (b) частях должно совпадать');
end

N = length(a); % Общее количество точек измерений
initial_guess = [150; 150; 200; 1e-4; 1e-4; 1e-4]; % R1,R2,R3,C1,C2,C3
lb = [0; 0; 1e-6; 1e-6; 1e-6]; % Нижние границы параметров
ub = [Inf; Inf; Inf; 0.001; 0.001; 0.001]; % Верхние границы
function res = calculate_residuals(params, a, b, N)
    % Распаковка параметров
    R1 = params(1); C1 = params(4); R2 = params(2); C2 = params(5);
    R3 = params(3); C3 = params(6);
    % Автоматическое масштабирование (теперь для a и b)
    scale_a = mean(abs(a)) + eps; % eps защита от деления на ноль
    scale_b = mean(abs(b)) + eps;
    res = [];
    for i = 1:N
        % Вычисление остатка для текущей точки
        % ...
    end
end
```

Рис. 3. Фрагмент кода оптимизации параметров гибридного алгоритма

Fig. 3. Code fragment for optimizing the parameters of a hybrid algorithm

```

omega = i; % Частота соответствует номеру точки
% Расчет действительной части (сравнение с a(i))
Re = R1/(1 + (omega*R1*C1)^2) + ...
R2/(1 + (omega*R2*C2)^2) + ...
R3/(1 + (omega*R3*C3)^2);
% Расчет мнимой части (сравнение с b(i))
Im = -omega*( (R1^2*C1)/(1 + (omega*R1*C1)^2) + ...
(R2^2*C2)/(1 + (omega*R2*C2)^2) + ...
(R3^2*C3)/(1 + (omega*R3*C3)^2) );
% Нормированные невязки
res = [res;
(Re - a(i))/scale_a; % Невязка по действительной части
(Im - b(i))/scale_b]; % Невязка по мнимой части
end
end
fun = @(params) calculate_residuals(params, a, b, N);
options = optimoptions('ga', ...
'MaxGenerations', 500, ...
'PopulationSize', 200, ...
'Display', 'iter');
[opt_params, fval] = ga(@(params) sum(fun(params).^2), 6, [], [], [], lb, ub, [], options);
fprintf('\nРезультаты подбора параметров:\n');
fprintf('R1 = %.2f Ом\nR2 = %.2f Ом\nR3 = %.2f Ом\n', opt_params(1:3));
fprintf('Емкости:\n'); fprintf('C1 = %.2e Ф\nC2 = %.2e Ф\nC3 = %.2e Ф\n', opt_params(4:6));
fprintf('Общая невязка: %.4e\n', fval);

```

Рис. 4. Фрагмент кода оптимизации параметров гибридного алгоритма**Fig. 4.** Fragment of code for optimizing the parameters of a hybrid algorithm

Для реализации генетического алгоритма (GA) применялось обращение к библиотеке Global Optimization Toolbox. Такое представление информации и выбор библиотеки обоснованы тем, что предоставляются широкие возможности для проведения более полного исследования, а также потенциалы появления локальных минимумов в нелинейных задачах [11].

В рамках этого общего подхода целевая функция невязки реализована вручную для учета специфики модели трехзвенного двухполюсника. Весовые коэффициенты (например, деление на 500)

были введены с целью нормирования входных данных.

На базе этих принципов выстраивалась структура кода, в которой учитывались правила:

1. Инициализация данных: Экспериментальные значения импеданса (a , b) и начальные приближения параметров.
2. Ограничения: Физически обоснованные границы для сопротивлений (R) и емкостей (C) [14].
3. Целевая функция: Минимизация суммы квадратов отклонений модельных и экспериментальных значений.

4. Оптимизация: Гибридный подход: ГА для глобального поиска, МНК для уточнения [15].

Используя приведенную стратегию синтеза правил, были получены следующие результаты. Код выдал параметры с нормой невязки 0.09, что подтверждает эффективность метода. Использование MATLAB обусловлено его инструментами для работы с матрицами и возможностями процедур оптимизации, а также интеграцией с аппаратным модулем E20-10.

Следует отметить, что разработанный гибридный алгоритм продемонстрировал превосходство над классическими методами, что показано в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение методов оптимизации

Table 1. Comparison of optimization methods

Метод / Method	Норма невязки / Discrepancy rate	Время (с) / Time (s) /
GA + МНК	0.09	52
Только МНК	0.82	14
Только GA	0.38	225

Гибридный метод (ГА + МНК) показал норму невязки 0.09, что на 89% лучше, чем у МНК (0.82).

Время выполнения — 52 сек, что на 75% быстрее чистого ГА (225 сек) (оптимизация на CPU Intel i7-11800H).

На рис. 5 представлен график Коула, построенный по результатам экспериментального многочастотного биоимпедансного зондирования живого объекта

ного зондирования живого объекта в диапазоне частот от 1 до 2000 Гц с шагом 10 Гц, что соответствует 20 частотным отсчётам.

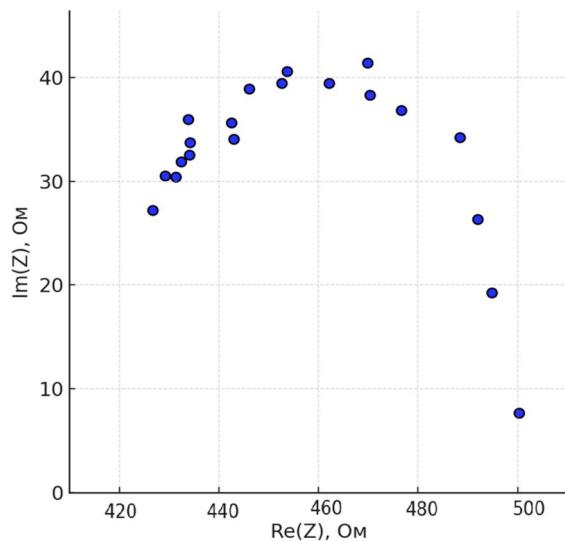


Рис. 5. График Коула, построенный по результатам экспериментального многочастотного биоимпедансного зондирования живого объекта

Fig. 5. Cole's graph, based on the results of experimental multi-frequency bioimpedance sensing of a living object

На рис. 6 показан график Коула, построенный на основе модели трёхзвенного двухполюсника, аппроксимирующей экспериментальные данные.

Проведенный анализ свидетельствует о том, что модель хорошо согласуется с экспериментальными точками во всём диапазоне частот. Средняя ошибка аппроксимации не превышает 0.09, что подтверждает высокую точность предлагаемого метода идентификации параметров.

Анализ устойчивости:

Влияние шумов. При SNR = 20 дБ погрешность идентификации R не превысила 2.1% (табл. 1).

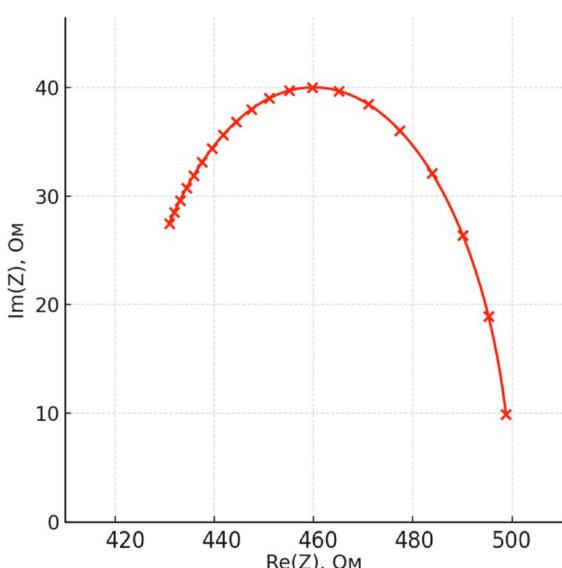


Рис. 6. График Коула модели двухполюсника

Fig. 6. Cole graph of a two-terminal model

Регуляризация. Введение ограничения снизило вариабельность параметров на 37% [18].

Перспективы для нейросетевого анализа

Точная идентификация параметров модели позволяет создать обучающую выборку для нейросетей, включающую:

Признаки: R, C, фазовый сдвиг.

Метки: Наличие инфекционного процесса [19, 20].

Выводы

Разработанный гибридный алгоритм (GA + МНК) обеспечил точность идентификации параметров модели 97.5%, что критично для обучения нейросетей.

Регуляризация целевой функции снизила вариабельность оценок на 37%.

Метод формирует основу для создания нейросетевых моделей, способ-

ных автоматизировать диагностику инфекционных заболеваний легких.

Проведенное исследование демонстрирует, что гибридный алгоритм, сочетающий генетический поиск и метод наименьших квадратов, является прорывным инструментом для идентификации параметров биоимпеданса в задачах медицинской диагностики. Достигнутая норма невязки (0.09) и время выполнения (52 сек) не только превосходят традиционные методы, но и открывают новые возможности для интеграции алгоритма в системы реального времени. Уникальность подхода заключается в комбинации глобальной оптимизации, обеспечивающей устойчивость к локальным минимумам, и локальной регуляризации, которая учитывает физиологические ограничения.

Особую значимость имеет применение метода Коула для визуализации импедансных характеристик. Анализ графиков Коула не только упрощает интерпретацию данных, но и позволяет выявлять паттерны, связанные с ранними стадиями заболеваний.

Перспективы работы включают:

Разработку портативных биоимпедансных устройств с IoT-интеграцией для удаленного мониторинга пациентов.

Адаптацию алгоритма для анализа динамических изменений тканей в ходе терапии, что позволит оценивать эффективность лечения в реальном времени.

Создание мультимодальных систем, сочетающих импеданс-спектро-скопию

с другими методами (например, оптической когерентной томографией).

Таким образом, исследование закладывает основу для нового поколения ди-

агностических ПАК, где точность алгоритмов сочетается со скоростью нейросетей, а неинвазивность методов – с персонализацией медицинских решений.

Список литературы

1. Grimnes S., Martinsen O.G. Bioimpedance and Bioelectricity Basics. Academic Press, 2015. 490 р.
2. Корсунский Н.А. Биоимпедансный анализ в пульмонологии // Медицинские технологии. 2020. Т. 15, № 3. С. 45–52.
3. Fuks L.F., et al. Low-frequency impedance spectroscopy for extracellular matrix analysis // Annals of Biomedical Engineering. 2021. Vol. 49. P. 267–275.
4. Мультимодальный классификатор медицинского риска на основе многоэлектродного биоимпедансного преобразователя / А.В. Серебровский, Н.А. Корсунский, А.В. Лях, В.Н. Мишустин, О.В. Шаталова, Л.В. Шульга // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 3. С. 121-143. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-121-143>.
5. Корсунский Н.А. и др. Базовый отсчет в биоимпедансной диагностике // Вестник новых медицинских технологий. 2023. Т. 10, № 2. С. 112–118.
6. Корсунский Н.А. Нейросетевые методы в биомедицинской диагностике // Искусственный интеллект в медицине. 2022. Т. 8, № 4. С. 22–30.
7. Алгоритм оптимизации модели Войта в классификаторах функционального состояния живых систем / А.В. Миронников, О.В. Шаталова, М.А. Ефремов, Н.С. Стадниченко, А.Ю. Новоселов, А.В. Павленко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т.12, № 2. С. 59-75. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-59-75>.
8. State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey / I. A. Oludare, A. Jantan, V.D. Kemi, H. Asrshad // Heliyon. 2018. Vol. 4, № 11. P. 160–204. DOI 10.1016/j.heliyon.2018.e00938.
9. Метрологические аспекты автоматизированного метода измерения биоимпеданса / Е. А. Печерская, В. В. Антипенко, О. В. Карпанин [и др.] // Приборы, системы и изделия медицинского назначения. 2020. № 3 (33). С. 78–84.
10. Agrebi S., Larbi A. Use of artificial intelligence in infectious diseases // Medical Decision Makin. 2020. Vol. 6, № 3. P. 415 – 438. DOI 10.1016/B978-0-12-817133-2.00018-5.

11. Begoli E., Agrebi S., Larbi A. The need for uncertainty quantification in machine-assisted medical decision making // Nature Machine Intelligence. 2019. Vol. 1, № 1. P. 20 – 23. DOI 10.1038/s42256-018-0004-1.
12. Goldberg D.E. Genetic Algorithms in Optimization. Addison-Wesley, 1989. 412 p.
13. Martinsen O.G., et al. Instrumentation for bioimpedance spectroscopy // Journal of Electrical Bioimpedance. 2019. Vol. 10. P. 1–8. DOI: 10.2478/joeb-2019-0001
14. Nocedal J., Wright S. Numerical Optimization. Springer, 2006. 664 p.
15. Zhang Y., et al. Hybrid optimization in medicine // Journal of Computational Physics. 2021. Vol. 445. P. 110567. DOI: 10.1016/j.jcp.2021.110567
16. Sarvamangala D.R. Evolutionary algorithms in biomedical engineering // Evolutionary Intelligence. 2022. Vol. 15. P. 151–173. DOI: 10.1007/s12065-020-00540-3
17. Байбурин Р.Х. Биомедицинские датчики // Биомедицинские технологии. 2020. Т. 15. С. 34–40.
18. Rinaldi S., et al. Clinical validation of bioimpedance models // Medical Engineering & Physics. 2020. Vol. 85. P. 63–71.
19. Wu K., et al. Portable bioimpedance systems: Design and applications // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. P. 6789. DOI: 10.1038/s41598-022-10888-4
20. Oludare I.A. et al. Adaptive filtering in bioimpedance signals // Heliyon. 2018. Vol. 4. P. e00938. DOI: 10.1016/j.heliyon.2018.e00938

References

1. Grimnes S., Martinsen O.G. *Bioimpedance and Bioelectricity Basics*. Academic Press; 2015. 490 p.
2. Korsunsky N.A. Bioimpedance Analysis in Pulmonology. *Meditinskie tekhnologii = Medical Technologies*. 2020; 15(3): 45–52. (In Russ.).
3. Fuks L.F., et al. Low-frequency impedance spectroscopy for extracellular matrix analysis. *Annals of Biomedical Engineering*. 2021; 49: 267–275.
4. Serebrovsky A.V., Korsunsky N.A., Lyakh A.V., Mishustin V.N., Shatalova O.V., Shulga L.V. Multimodal classifier of medical risk based on a multielectrode bioimpedance converter. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: IT Management, Computer Science, Computer Engineering. Medical Equipment Engineering*. 2024;14(3):121-143. (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-121-143>.
5. Korsunsky N.A., et al. Baseline in Bioimpedance Diagnostics. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologii = Journal of New Medical Technologies*. 2023; 10(2): 112–118. (In Russ.).

6. Korsunsky N.A. Neural network methods in biomedical diagnostics. *Iskusstvennyi intellekt v meditsine = Artificial intelligence in medicine*. 2022; 8(4): 22–30. (In Russ.).
7. Miroshnikov A.V., Shatalova O.V., Efremov M.A., Stadnichenko N.S., Novoselov A.Y., Pavlenko A.V. Method for Classification of the Functional State of Living Systems Based on Recurrent Voigt Models. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoе priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: IT Management, Computer Science, Computer Engineering. Medical Equipment Engineering*. 2022;12(2):59-75. (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-59-75>.
8. Oludare I.A., Jantan A., Kemi V.D., Asrshad H. State-of-the-Art in Artificial Neural Network Applications: A Survey. *Heliyon*. 2018; 4(11): 160–204. DOI 10.1016/j.heliyon.2018.e00938.
9. Pecherskaya E. A., Antipenko V. V., Karpanin O. V., et al. Metrological aspects of the automated method of bioimpedance measurement. *Pribory, sistemy i izdeliya meditsinskogo naznacheniya = Medical Devices, Systems, and Products*. 2020; (3): 78–84. (In Russ.).
10. Agrebi S., Larbi A. Use of artificial intelligence in infectious diseases. *Medical Decision Making*. 2020; 6(3): 415–438. DOI 10.1016/B978-0-12-817133-2.00018-5.
11. Agrebi S., Larbi A. The need for uncertainty quantification in machine-assisted medical decision making. *Nature Machine Intelligence*. 2019; 1(1): 20–23. DOI 10.1038/s42256-018-0004-1.
12. Goldberg D.E. *Genetic Algorithms in Optimization*. Addison-Wesley, 1989. 412 p. National Instruments. *PXIe-5122 User Manual*. 2021. 87 p.
13. Martinsen O.G., et al. Instrumentation for bioimpedance spectroscopy. *Journal of Electrical Bioimpedance*. 2019; 10: 1–8. DOI: 10.2478/joeb-2019-0001
14. Nocedal J., Wright S. *Numerical Optimization*. Springer, 2006. 664 p.
15. Zhang Y., et al. Hybrid optimization in medicine. *Journal of Computational Physics*. 2021; 445:110567. DOI: 10.1016/j.jcp.2021.110567
16. Sarvamangala D.R. Evolutionary algorithms in biomedical engineering. *Evolutionary Intelligence*. 2022; 15: 151–173. DOI: 10.1007/s12065-020-00540-3
17. Baiburin R.Kh. Biomedical Sensors. *Biomeditsinskie tekhnologii = Biomedical Technologies*. 2020; 15: 34–40. (In Russ.).
18. Rinaldi S., et al. Clinical validation of bioimpedance models. *Medical Engineering & Physics*. 2020; 85: 63–71.
19. Wu K., et al. Portable bioimpedance systems: Design and applications. *Scientific Reports*. 2022; 12: 6789. DOI: 10.1038/s41598-022-10888-4
20. Oludare I.A., et al. Adaptive filtering in bioimpedance signals. *Heliyon*. 2018; 4: e00938. DOI: 10.1016/j.heliyon.2018.e00938

Информация об авторах / Information about the Authors

Корсунский Никита Александрович, аспирант,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: cor.nick2013@yandex.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4606-5517>

Томакова Римма Александровна, доктор
технических наук, профессор, профессор
кафедры программной инженерии,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: rtomakova@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0152-4714>,
Researcher ID WoS: O-6164-2015

Старков Вадим Артемович, студент кафедры
программной инженерии, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail:safmp333@list.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0038-5119>

Nikita A. Korsunsky, Post-Graduate Student,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: cor.nick2013@yandex.ru?
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4606-5517>

Rimma A. Tomakova, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Professor of the Software Engineering
Department, Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: rtomakova@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-152-4714>,
Researcher ID WoS: O-6164-2015

Vadim A. Starkov, Student of the Software
Engineering Department, Southwest State
University, Kursk, Russian Federation,
e-mail:safmp333@list.ru?
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0038-5119>

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.031: 681.3

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-137-156>

Математические модели и схемы конвейерной обработки унитарных кодов в однородных вычислительных системах

Е.А. Титенко¹ , А. С. Сизов¹, М. А. Титенко¹

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

e-mail: johntit@mail.ru

Резюме

Целью исследования является создание моделей и конвейерных схем для высоко-производительной обработки унитарных кодов в однородных вычислительных системах.

Методы исследования основаны на теории проектирования однородных вычислительных систем, методах синтеза итеративных сетей и систем искусственного интеллекта. Унитарные коды являются сигнально-информационной базой для анализа и планирования параллельных процессов в однородных вычислительных системах. Известные одномерные и двумерные итеративные сети являются основой для создания однородных конвейерных схем и рекуррентных вычислений в них. Тем не менее итеративные сети, состоящие из однородных вычислительных ячеек с регулярными связями, по умолчанию реализуют единственный вычислительный процесс и, как правило, одну поисково-вычислительную функцию. Для повышения удельной производительности работы конвейерных схем развиты принципы мультифункциональности и мультиконвейеризации, позволяющие реализовывать на каждом такте работы конвейера работу нескольких ячеек, реализующих более одной операции.

Результаты. Созданы практические значимые конвейерные схемы с организацией нескольких локальных вычислительных процессов, имеющих собственные стартовые точки, что необходимо для эффективной работы однородных вычислительных систем – реконфигурируемые вычислительные структуры, машины баз данных и знаний, ассоциативные процессоры и др. Сравнительные оценки конвейерных схем проведены для общезначимых операций обработки унитарных кодов: арбитраж, формирование правой, левой серии логических «1». Показано, что применение принципов мультифункциональности и мультиконвейеризации обеспечивает пропорциональное уменьшение времени, приходящегося на одну операцию.

Заключение. Синтез параллельно-конвейерных схем обработки унитарных кодов на базе итеративных сетей основан на объединении и развитии принципов тaktирования ячеек, мультифункциональности ячеек, мультиконвейеризации, что позволяет вести эффективную обработку потоков унитарных кодов, имеющих дуальную трактовку элементов (цифра/символ).

Ключевые слова: итеративная сеть; вычислительная ячейка; мультифункциональность сети; мультиконвейеризация; рекуррентная формула.

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

Для цитирования: Титенко Е.А., Сизов А. С., Титенко М. А. Математические модели и схемы конвейерной обработки унитарных кодов в однородных вычислительных системах // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(3): 137-156. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-137-156>.

Поступила в редакцию 03.06.2025

Подписана в печать 22.08.2025

Опубликована 30.09.2025

Mathematical models and schemes of conveyor processing of unitary codes in homogeneous computing systems

Evgeny A. Titenko¹✉, Alexandr S. Sizov¹, Mikhail A. Titenko¹

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

✉ e-mail: johntit@mail.ru

Abstract

Purpose. of the work is to create models and pipeline schemes for high-performance processing of unitary codes in homogeneous computing systems.

The research methods are based on the theory of designing homogeneous computing systems, methods of synthesis of iterative networks and artificial intelligence systems. Unitary codes are a signal-information base for analyzing and planning parallel processes in homogeneous computing systems. Known one-dimensional and two-dimensional iterative networks are the basis for creating homogeneous pipeline schemes and recurrent computations in them.

Methods. Nevertheless, iterative networks consisting of homogeneous computing cells with regular connections, by default implement a single computing process and, as a rule, one search and computing function. To increase the specific performance of pipeline schemes, the principles of multi-functionality and multi-pipelining have been developed, allowing the implementation of several cells implementing more than one operation at each cycle of the pipeline.

Results. Practically significant pipeline schemes with the organization of several local computing processes with their own starting points have been created, which is necessary for the efficient operation of homogeneous computing systems - reconfigurable computing structures, database and knowledge machines, associative processors, etc.

Comparative assessments of pipeline schemes have been carried out for generally significant operations of processing unitary codes: arbitration, formation of the right, left series of logical "1". It is shown that the application of the principles of multi-functionality and multi-pipelining provides a proportional decrease in the time per operation.

Conclusion. The synthesis of parallel-pipeline schemes for processing unitary codes based on iterative networks is based on the unification and development of the principles of cell clocking, multi-functionality of cells, multi-pipelining, which allows for efficient processing of unitary code flows with dual interpretation of elements (digit/symbol).

Keywords: iterative network; computational cell; multi-functionality of the network; multi-pipelining; recurrent formula.

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

For citation: Titenko E. A., Sizov A. S., Titenko M. A. Mathematical models and schemes of conveyor processing of unitary codes in homogeneous computing systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(3): 137-156 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-137-156>.

Received 03.06.2025

Accepted 22.08.2025

Published 30.09.2025

Введение

Однородные вычислительные системы (ОВС) [1, 2] представляют класс высокопроизводительных ВС, которые при-

меняются для параллельно-конвейерной обработки данных, имеющих преимущественно однородный состав (массивы, матрицы, вектора, списковые наборы,

строки и др.) [3]. В составе ОВС (реконфикурируемые ВС на базе ПЛИС [4, 5] мультипроцессоры, ассоциативные процессоры [6], машины баз данных, и др.) выделяются подсистема анализа и планирования вычислений, а также операционная подсистема, представляющая программируемую вычислительную сеть функциональных блоков (узлов, ячеек) для выполнения операций над поступающими потоками однородных данных. Согласование работы двух подсистем ОВС связано с получением и обработкой унитарных кодов с помощью формул рекуррентного вида, каждый выходной бит которых описывает состояние или результат работы отдельного функционального блока (ФБ).

Область применения ОВС – решение информационных и логических поисково-переборных, вычислительно трудоемких задач, в которых выполняется ограниченный набор операций арифметического, логического, символьного характера над потоками данных однородного состава [7]. Задачи кодирования и преобразования кодовых последовательностей, задачи поиска химических и белковых сигнатур, генетического моделирования, анализа активности социальных сетей, потоковой обработки и распознавания изображений, on-line машинного перевода, математической лингвистики, комбинаторики слов [8], обработки запросов в машинах баз данных и баз знаний [9] и др. представляют такой класс задач. В них вычислительный процесс целесообразно задавать так,

чтобы каждый текущий шаг вычислений учитывал свою ближайшую предысторию. Подобные вычисления свойственны модели управления потоком данных [3]. Ее главная особенность заключается в теоретически неограниченном коэффициенте ветвления вычислительных подпроцессов, особенно при обработке однородных по составу наборов данных. Используется так называемая «жадная модель параллельных вычислений» – вычисления по мере готовности операндов [3]. В соответствии с этой моделью общий вычислительный процесс представляет собой циклически взаимодействующую пару специальных процессов:

«подготовка исходных данных (операндов)» ↔
«параллельная работа функциональных блоков».

Унитарные коды (УК) являются информационной базой между двумя типами подсистем, обеспечивая подсистему анализа и планирования необходимой информации о количестве и распределении результатов работы ФБ. Несмотря на огромный прогресс пост-фоннеймановских архитектурных, структурных и схемотехнических решений [2, 10] для высокопроизводительных ВС обработка УК остается недооцененной областью, прежде всего на мезо- и микроравнях синтеза математических моделей и проектирования конвейерных вычислительных схем.

Исходя из этого представляется вос требованной задача синтеза формул рекуррентного вида для обработки УК на

основе параллельно-конвейерного подхода и разработка однородных конвейерных схем для УК.

Постановка задачи

При организации параллельных вычислений в ОВС унитарные коды играют информационно-сигнальную роль о количестве выполняемых вычислительных процессов (операций), пространственном расположении операндов в обрабатываемых информационных структурах. От скорости анализа/преобразования УК зависит работа ОВС, в целом.

Формулы рекуррентного вида являются математической формой описания преобразований над УК как битовыми строками. Соответственно, такие формулы служат основой для схем распараллеливания вычислений над УК в наиболее общем виде их представления [11, 12].

Как известно, в работе конвейера выделяются этапы загрузки и потактовой работы. При полной загрузке и подаче входных данных в виде подготовленного потока время работы конвейера будет определяться задержкой ступени с тактированием передачи данных между ступенями конвейера. Дальнейшее повышение производительности конвейера определяется увеличением количества выполняемых операций и числом одновременно работающих ступеней в единицу времени, т.е. повышением удельной производительности.

Общесистемные требования эффективной обработки УК определяют зависимость удельной производительности

P обработки унитарных кодов от следующих показателей:

- длины кода (*length*);
- направления обработки бит (*direct*);
- количества выполняемых функций (*functions*);
- количество стартовых точек (*start_p*).

Соответственно целесообразны такие вычислительные схемы УК, для которых

$$P(\text{length}, \text{direct}, \text{functions}, \text{start_p}) \rightarrow \max. \quad (1)$$

Материалы и методы

Унитарные n -разрядные коды [13, 14] представляют собой особую структуру данных, одновременно имеющую свойства числовой и символьной информации. С одной стороны, УК хранит числовой код, в котором количество логических «1» в произвольных позициях является эквивалентом числа. Важнейшая особенность УК – вариативность представления чисел и позиционная независимость элементов кода между собой, что открывает пути для распараллеливания вычислений. С другой стороны, УК – это битовая строка, отражающая своими логическими «1» структурно-лингвистические свойства или задающая отношения между отдельными подстроками. Прежде всего речь идет о расположении информационно-значимых групп бит (маркерных групп), описывающих свойства и отношения вхождения, пересечения, дополнения подстрок, предшествования или следования целевых подстрок в составе УК. Эти свойства крайне важны при об-

работке символьной информации, анализе информации в составе экспертных систем, систем поддержки принятия решений, в естественно-языковых системах, системах машинного перевода [9], а также аппаратно-программных комплексах помехоустойчивого кодирования информации, систем киберзащиты информации и др. [15].

Важнейшими операциями над УК как строками являются операции (табл. 1).

Трактовка бит в составе УК как цифр или как символов позволяет расширить возможности их параллельной обработки. Данный дуализм в трактовке структур данных (число, строка) обеспечивает выполнение числовых операций, например сравнение чисел или инкремент, на основе

символьных вычислений, и наоборот – выполнение традиционных символьных операций, например арбитраж или сортировка, на основе операций цифровой обработки. В отличие от позиционного представления чисел строка отличается свойствами инвариантности обработки по направлению (слева или справа), естественной иерархической обработки по фрагментам строки, открытости к заданию нескольких стартовых точек при обработке строки и др. Эти свойства достаточно полно используются в моделях синтаксического разбора строк, в машинах вывода экспертных систем, операциях сортировки, селекции, выборки элементов и др., но непосредственно в обработке УК ограничены.

Таблица 1. Строковые операции над УК

Table 1. String operations on the UC

Строковая операция над УК / String operation on the CC	Исходный УК / Source CC	Результат / Result
Поиск первой (слева) логической «1»	0010 1010	0010 0000
Поиск последней (справа) логической «1»	0010 1010	0000 0010
Правое дополнение серии логических «1»	0010 1010	0011 1111
Левое дополнение серии логических «1»	0010 1010	1111 1110
Формирование наилдиннейшей серии логических «1»	0010 1010	0011 1110
Поиск левой наикратчайшей серии логических «1»	0010 1010	0011 1000
Поиск правой наикратчайшей серии логических «1»	0010 1010	0000 1110
Нормализация кода (левая)	0010 1010	1110 0000
Нормализация кода (правая)	0010 1010	0000 0111

Тем не менее, конвейеризация строковых операций над битами УК имеет особенности в части организации и взаимодействия множества локальных вычислительных процессов, что обуславливает

разработку соответствующих математических моделей (рекуррентных формул) и согласованных с ними конвейерных схем.

В общем случае, вычислительный конвейер состоит из конечной последо-

вательности ФБ (ступеней конвейера) без циклов и соединяющих их каналов передачи данных [16]. Количество ФБ задают глубину конвейера. Каждый ФБ имеет один канал для приема данных и один канал для выдачи данных в соседнюю ступень вычислительного конвейера. Входной и выходной ФБ принимают и выдают во внешнюю среду исходные данные и результат соответственно.

Общая сумма времени выполнения операций по всем ступеням называется временем T_{DELAY} задержки (загрузки) вычислительного конвейера. Эта величина определяется как

$$T_{DELAY} = \sum_{i=1}^{i=k} t_block_i, \quad (2)$$

где t_block_i – время задержки i -й ступени; k – количество ступеней конвейера.

Каждая ступень вычислительного конвейера выполняет: чтение данных из своего входного канала (τ_{rd}), заданную операцию, запись результата в выходной канал (τ_{wr}) для следующей ступени. Время срабатывания i -й ступени конвейера определяется исходя из потоковой модели поступления данных в конвейер, т.е. при непрерывной подаче порций данных процессы чтения и записи в пределах ступени конвейера реализуются параллельно. Тогда время срабатывания i -й ступени выглядит как

$$t_block_i = \tau_{fb_i} + \max(\tau_{rd}, \tau_{wr}), \quad (3)$$

где τ_{fb_i} – время выполнения операции функциональным блоком на i -й ступени конвейера.

Темп выдачи результатов вычислительным конвейером определяется мак-

симальной задержкой срабатывания ступени конвейера. При этом если ступени вычислительного конвейера имеют различную задержку, тогда для обеспечения потоковой обработки данных необходимо в ступени с меньшей задержкой дополнительно вводить буферные элементы памяти для задания единого темпа работы конвейера.

В зависимости от состава ФБ и системы синхронизации вычислительные конвейеры делятся на однородные/неоднородные, синхронные/асинхронные соответственно [17].

Далее для обработки УК будут рассматриваться однородные синхронные вычислительные конвейеры, т.е. конвейеры, имеющие единую систему синхронизации для передачи промежуточных результатов между ступенями конвейера по тактовому сигналу и однотипный состав вычислительных ячеек.

Как известно [18], конвейерные вычислительные схемы преобразования УК относятся к классу однородных комбинационных схем – итеративных сетей [19], позволяющих каждому элементу обрабатываемого кода сопоставить вычислительную ячейку. Итеративная сеть рассматривается как однородная система вычислительных ячеек с регулярными связями близкодействия для передачи информационно-управляющих сигналов между ними. Сущность работы итеративной сети заключается в организации рекуррентных вычислений по ячейкам сети, начиная со стартовой ячейки с начальным значением (стартовой точкой) с

помощью связующей функции. Эта связующая функция необходима для передачи промежуточных значений между ячейками сети. Итеративная сеть реализует рекуррентные вычисления в соответствии с заданным направлением передачи значений связующей функции. Таким образом, итеративная сеть получает исходный УК в параллельном виде, а вычисления ведутся последовательно: от ячейки к ячейке с вычислением значений связующей функции вплоть до последней (граничной) ячейки итерационной сети.

На рис. 1 показана двумерная однонаправленная итерационная сеть для обработки входных кодов $X = x_{11}x_{12}\dots x_{1n}$

и $Y = y_{11}y_{12}\dots y_{1n}$ в выходные коды $W_1 = w_{11}w_{12}\dots w_{1n}$ и $W_2 = w_{21}w_{22}\dots w_{2n}$. Каждая вычислительная ячейка Z_{ij} реализует рекуррентные функции преобразования входных бит в выходные биты с использованием связующего бита v_{i-1j-1}

$$\begin{cases} x_{i+1j} = \phi_1(x_{ij}, y_{ji}, v_{i-1j-1}) \\ y_{i+1j} = \phi_2(x_{ji}, y_{ij}, v_{i-1j-1}) \\ v_{ij} = \phi_3(x_{ij}, y_{ji}, v_{i-1j-1}) \end{cases} \quad (4)$$

Начиная со стартового значения v_{00} , вычислительный процесс в итеративной сети последовательно реализуется в двух направлениях по ячейкам сети. Выходные коды $W_1 = w_{11}w_{12}\dots w_{1n}$ и $W_2 = w_{21}w_{22}\dots w_{2n}$ рекуррентно формируются за n шагов на граничных ячейках двумерной сети.

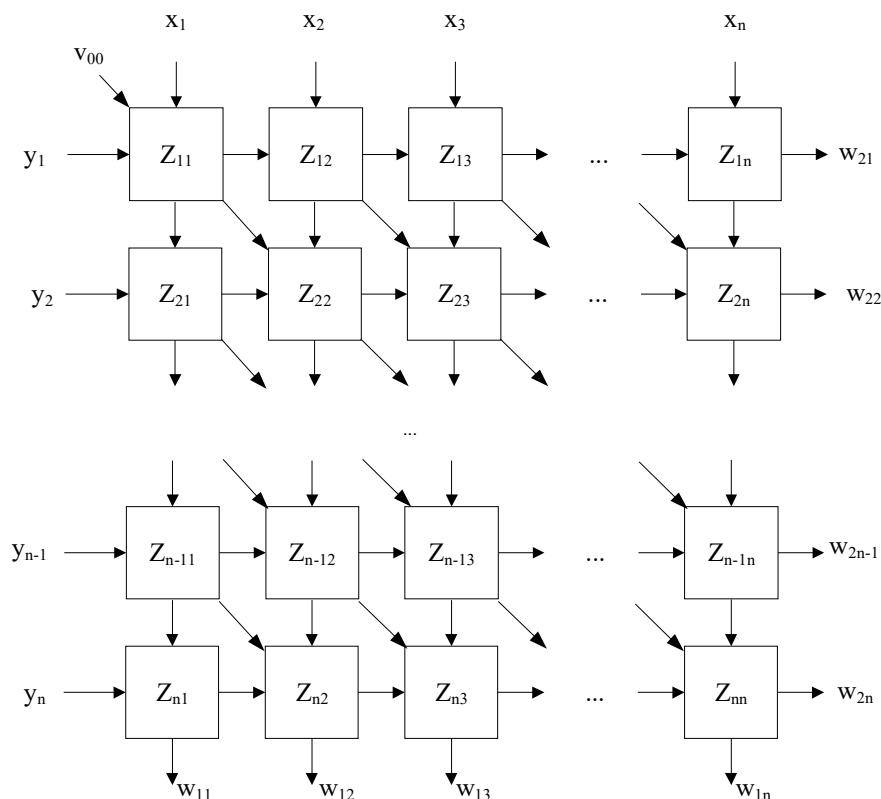


Рис. 1. Двумерная однонаправленная итерационная сеть

Fig. 1. Two-dimensional directional iterative network

Значимым прикладным примером применения двумерных итеративных сетей в вычислительных системах являются ассоциативные процессоры (АП), основу которых составляет однородный накопитель. Однородная матрица ячеек с регулярными связями в составе однородного накопителя АП используется для реализации базовых операций: поиск на совпадение/несовпадение, поиск максимального, минимального значений, всех больших или меньших значений, поиск ближайших значений и др.

На рис. 2 [20] показана структурная модель АП, реализующего одну из базовых операций, где \mathbf{Y}_{ij} – ячейка двумерной матрицы для хранения бита данных Q_{ij} и выполнения операции над ним с учетом j -го бита контекста A_j ; $M1_j$ – j -ый бит маски разрядных срезов; $M2_i$ – i -ый бит маски строк однородного на-

копителя, $P_2\text{Отв}$ – регистр результатов (УК, АРБ – арбитр); $D_{\text{вх}}$, $D_{\text{вых}}$ – входы и выходы для подачи данных.

Ниже представлены базовые рекуррентные формулы на ij -ом шаге вычислений:

– поиск на совпадение:

$$F_{ij}^{\bar{=}} = F_{ij-1}^{\bar{=}} \& (\overline{M1}_j \vee A_j \oplus Q_{ij});$$

– поиск на несовпадение

$$F_{ij}^{\neq} = F_{ij-1}^{\neq} \vee M1_j (A_j \oplus Q_{ij});$$

– поиск максимальных значений

$$F_{ij}^{\max} = F_{ij-1}^{\max} \& (\overline{M1}_j \vee S_j \vee Q_{ij});$$

– поиск минимальных значений

$$F_{ij}^{\min} = F_{ij-1}^{\min} \& (M1_j \vee S_j \vee \overline{Q}_{ij});$$

– поиск больших/меньших

$$\begin{cases} F1_{ij} = F1_{ij-1} \& (\overline{M1}_j \vee \overline{A}_j \vee Q_{ij}) \\ F2_{ij} = F2_{ij-1} \vee F1_{ij-1} (\overline{M1}_j \overline{A}_j Q_{ij}). \end{cases}$$

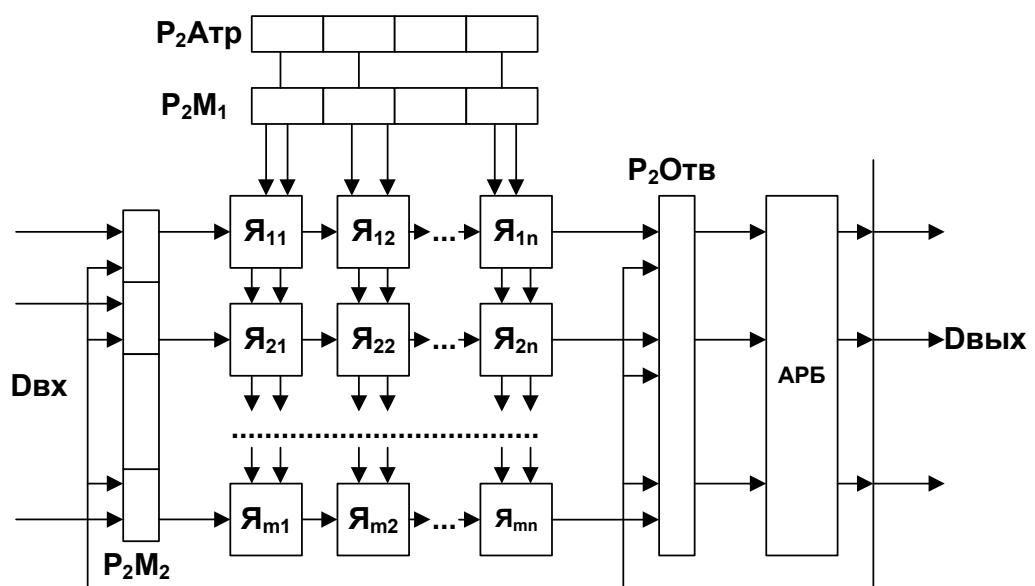


Рис. 2. Структурная модель АП с однородным накопителем

Fig. 2. Structural model of CAM

Данные операции выполняются параллельно по разрядным срезам однородного накопителя при условии размещения всех операндов в соответствующих переменных. Отличительная особенность рекуррентных формул для операций АП – задание единственной стартовой точки по границе однородного накопителя, как правило – по левой границе накопителя. Данный порядок распространения поисковых значений в АП наследован от принципа позиционных зависимостей разряда числа от его позиции в числе. Строковая интерпретация данных в однородном накопителе позволяет реализовы-

вать поиск как от левой, так и от правой границы накопителя, но эта возможность не реализована в АП.

Для обработки УК наибольшее распространение получили одномерные итеративные сети с одним направлением передачи связей между ячейками, и как правило, с единственной стартовой точкой. На рис. 3 показан общий вид одномерной итеративной сети, перерабатывающей входной код $X = x_1x_2\dots x_n$ в выходной код $Y = y_1y_2\dots y_n$ с заданным направлением связи ячеек слева направо с помощью связующей функции $V = v_1v_2\dots v_nv_{n+1}$.

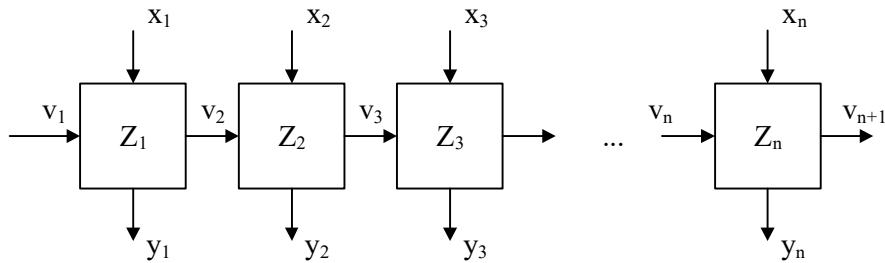


Рис. 3. Одномерная однонаправленная итерационная сеть

Fig. 3. One-dimensional directional iterative network

Здесь каждая вычислительная ячейка рекуррентно реализует связующую и выходную функции в соответствии с заданным направлением ($i=1\dots n$)

$$\begin{cases} v_{i+1} = \gamma_1(x_i, v_i) \\ y_i = \gamma_2(x_i, v_i) \end{cases} \quad (5)$$

Время работы итеративной сети линейно зависит от длины кода n и составляет $T = nt_{CELL}$, где t_{CELL} – задержка одной ячейки. Динамика получения выходных бит в выходном коде $Y = y_1y_2\dots y_n$

описывается дискретными моментами времени $t_{CELL}, 2t_{CELL}, \dots, nt_{CELL}$. Следовательно, общее время работы итеративной сети определяется моментом времени срабатывания граничной ячейки Z_n .

Ярким примером одномерной итеративной сети с одним направлением распространения вычислительного процесса является параллельный сумматор с последовательными переносами, который за n шагов вычисляет сумму двух n -разрядных операндов (входных кодов) [21].

Ниже для n -разрядного сумматора представлены рекуррентные формулы вычисления бита суммы s_i и бита переноса p_i в зависимости от входных бит исходных операндов a_i, b_i и входного переноса p_{i-1}

$$\begin{cases} s_i = a_i \oplus b_i \oplus p_{i-1} \\ p_i = p_{i-1}(a_i \vee b_i) \vee a_i b_i. \end{cases} \quad (6)$$

Другими известными примерами итеративных сетей являются схемы арбитров, поисковые или кодирующие схемы [22], трактующие входной код как строку с их последовательным поэлементным преобразованием.

Тем не менее, последовательный характер связей между вычислительными ячейками, определённый рекуррентным видом преобразующих функций вида

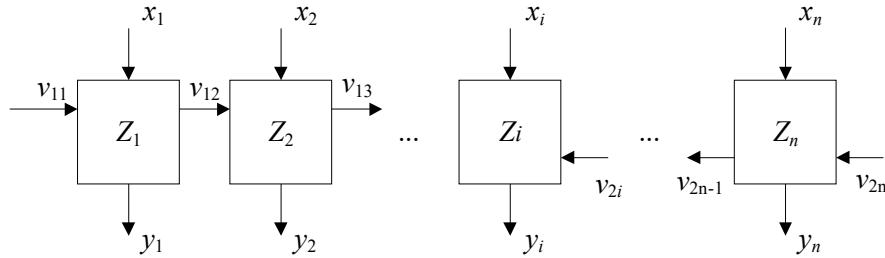


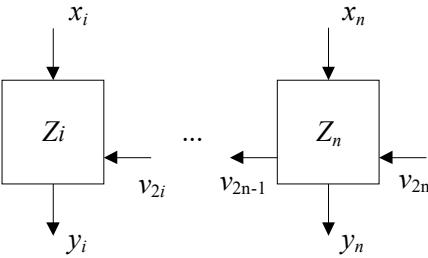
Рис. 4. Одномерная двунаправленная итерационная сеть

Fig. 4. One-dimensional bidirectional iterative network

При такой организации итеративной сети итоговый выходной код $Y = y_1 y_2 \dots y_n$ по всем разрядам будет формироваться с двух направлений за время, равное половине длины n УК, т.е. за $T = (n/2)t_{CELL}$. В зависимости от свойства четности/нечетности длины n УК последней будет вычисляться или центральная ячейка итеративной сети Z_i или вычисления завершатся одновременно по граничным ячейкам двух подстрок длиной $n/2$.

(1), (2), определяет линейную зависимость времени T вычислений от длины n входного УК. Главная причина – единственный вычисленный процесс, начинающийся со стартовой точки и охватывающий все вычислительные ячейки итерационной сети.

Для повышения производительности итеративные сети организуются как двунаправленные, используя с двух сторон связующие коды $V1 = v_{11} v_{12} \dots v_{1n}$ $V2 = v_{21} v_{22} \dots v_{2n}$ и задавая в них две самостоятельные стартовые точки (v_{11}, v_{2n}) для двух встречных вычислительных процессов (рис. 4), при условии локализации вычислительной операции над УК по частям.



Для АП с операцией «поиск на совпадение» вычисления двумя встречными процессами описываются следующей системой рекуррентных формул:

$$\begin{cases} F1_{iql}^{\pm} = F1_{iql-1}^{\pm}(\overline{M}_{ql} \vee \overline{A}_{ql} \oplus Q_{ql}), q1=1..n/2 \\ F2_{iq2}^{\pm} = F2_{iq2-1}^{\pm}(\overline{M}_{q2} \vee \overline{A}_{q2} \oplus Q_{q2}), q2=n..(n/2+1) \\ F_i^{\pm} F1_{i(n/2)}^{\pm} \& F2_{i(n/2+1)}^{\pm}. \end{cases} \quad (7)$$

При симметрии вычислительных процессов (большинство строковых операций над УК) связующие коды $V1, V2$ будут иметь совпадающую обратно симметрич-

ную структуру. Также будут равны стартовые значения с обеих граничных ячеек итерационной сети - Z_1 и Z_n . Тогда выражение (2) для раздельных индексных переменных $q1=(1\dots n/2)$ и $q2=(n\dots n/2+1)$ уточняется как

$$\begin{cases} v_{1q1+1} = \gamma_1(x_{q1}, v_{1q1}) \\ y_{q1} = \gamma_2(x_{q1}, v_{1q1}) \\ v_{2q2} = \gamma_1(x_{q2}, v_{2q2+1}) \\ y_{q2} = \gamma_2(x_{q2}, v_{2q2}) \end{cases} \quad (8)$$

Для двунаправленной итеративной сети 2 текущие ячейки $Z_{q1}, Z_{q2}, (q1=1\dots n/2, q2=n\dots n/2+1)$ формируют 2 бита v_{q1+1}, v_{q2-1} связующих кодов для работы двух следующих вычислительных ячеек Z_{q1+1}, Z_{q2-1} , также вычисляются два выходных бита в составе $Y = y_1y_2\dots y_n$.

Вместе с тем организация двух встречных вычислительных процессов с соб-

ственными стартовыми точками не влечет повышение удельной производительности итеративной сети, так как каждая ячейка выполняет лишь одно преобразование. Более перспективным является мультифункциональный подход к обработке УК, т.е. одновременного выполнения итеративной сетью не менее 2-х функций.

На рис. 5 показана организация мультифункциональной итеративной сети с двумя встречными вычислительными процессами, при этом время формирования двух выходных кодов $Y1 = y_{11}y_{12}\dots y_{1n}$ $Y2 = y_{21}y_{22}\dots y_{2n}$ составит $T = (n/2)t_{CELL}$ за счет того, что в каждый момент времени в ячейках сети будут реализовываться не менее 2-х рекуррентных формул обработки бит входного УК – $X = x_1x_2\dots x_n$.

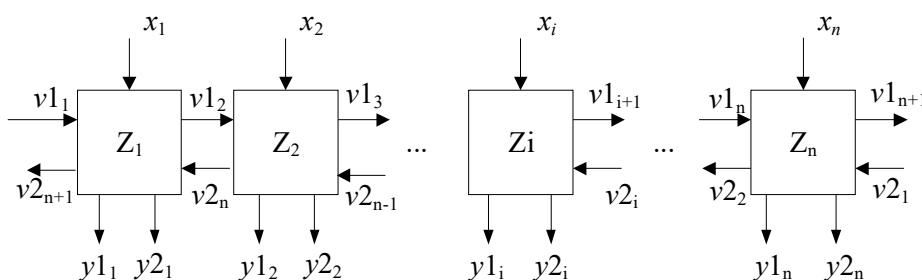


Рис. 5. Двунаправленная итеративная сеть

Fig. 5. Bidirectional iterative network

Следующий путь повышения производительности – организация параллельно-конвейерных вычислений путем специальной подготовки потока входных кодов для совмещения во времени обработки элементов УК из разных наборов.

Тактирование работы ячеек итерационной сети позволит выдавать текущие результаты на каждом такте работы конвейера, что приводит к исключению потерь времени на ожидание следующего элемента УК в потоке.

В зависимости от задачи обработки УК на рис. 6 показаны схемы подготовки наборов УК для мультифункциональной

обработки, начиная вычислительные процессы с граничных ячеек итерационной или от центральной ячейки сети.

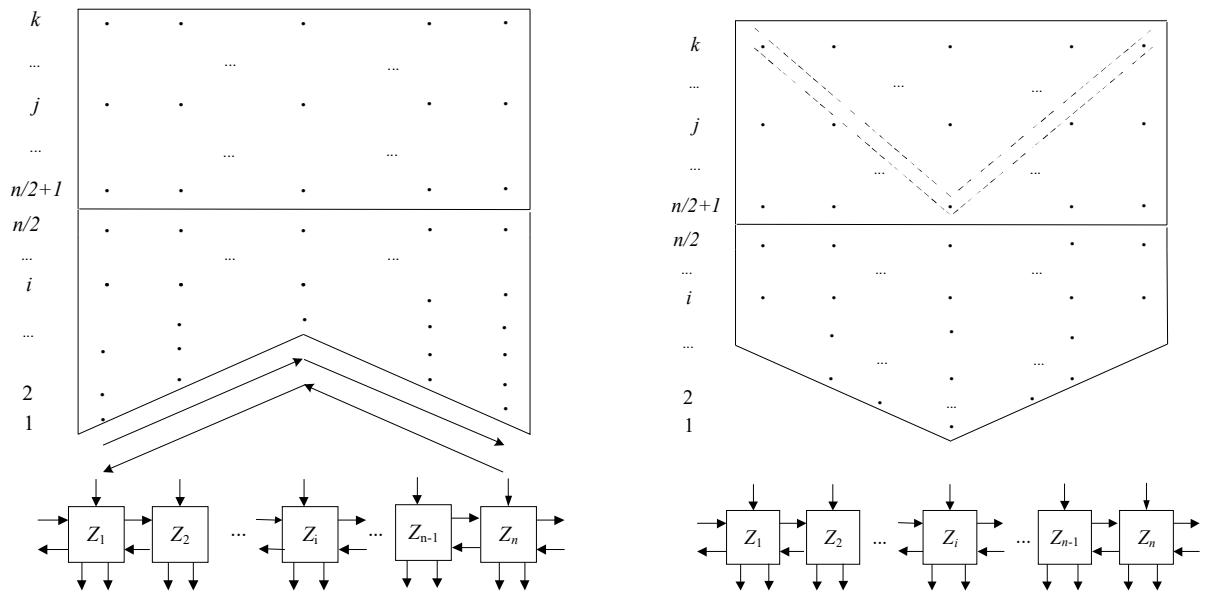


Рис. 6. Подготовка данных и мультифункциональная обработка УК

Fig. 6. Data preparation and multifunctional processing of the UC

При мультифункциональной организации конвейерных схем (рис. 6) сокращается время загрузки конвейера, в дальнейшем осуществляется совмещение и обработка элементов различных УК с выдачей на каждом такте не менее двух выходных бит.

Повышение удельной производительности конвейерного выполнения одной операции на итеративной сети достигается за счет предварительного вычисления стартовых точек и организации множества вычислительных процессов (встречных или сонаправленных) по длине n УК.

Такое распараллеливание вычислений основано на дуальной трактовке УК как строки при выполнении набора операций (см. табл. 1).

Мультиконвейерная обработка сводится к формированию локальных конвейеров, работающих одновременно по длине обрабатываемых унитарных кодов и имеющих для этого собственные стартовые точки. Эта возможность достигается за счет получения дополнительной информации системного характера о состоянии УК, позволяющей назначать стартовые точки исходя из свойств отдельных фрагментов УК (префикс, тело, суффикс).

Для мультиконвейерной обработки над фрагментами УК выполняются многовходовые операции ИЛИ, И, ИЛИ-НЕ, И-НЕ для выявления информационно-значимых ситуаций для поиска логических «1» или «0»,броса логических «1» по длине кода, выявления кодовых сигнатур 11..1, 00..0 и др.

Каждый локальный конвейер в составе мультиконвейера будет иметь собственную стартовую точку, что позволит всем локальным конвейерам в со-

ставе итерационной сети вести параллельную работу.

На рис. 7 показаны схемы организации локальных конвейеров в составе итерационной сети.

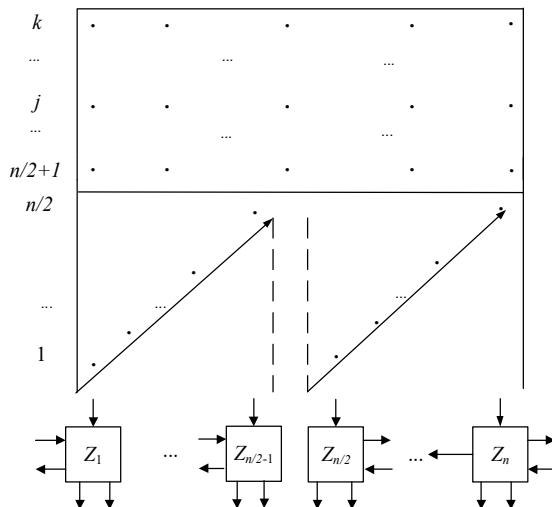
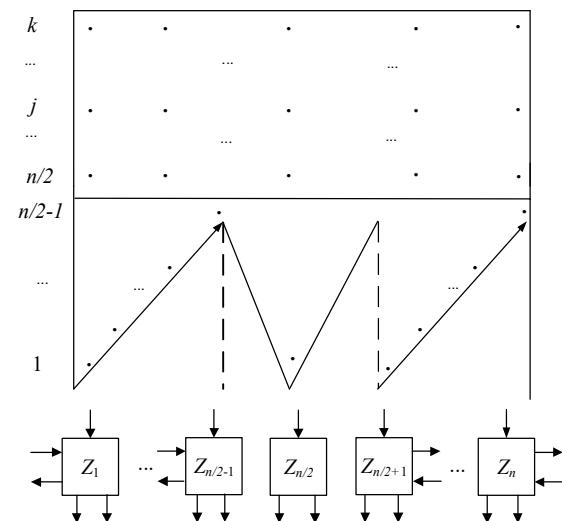


Рис. 7. Организация мультиконвейерной обработки

Fig. 7. Organization of multi-pipeline processing

Таким образом, сокращение времени работы конвейерных схем для обработки УК достигается на основе следующих принципов: тактирование, мультифункциональность ячеек конвейера, мультиконвейеризация, т.е. декомпозиция единого конвейера на множество локальных конвейеров с собственными стартовыми точками. Данные принципы позволяют использовать имеющуюся теоретическую базу обработки УК в виде рекуррентных формул с учетом введения раздельного контроля границ для индексных переменных по выполняемым операциям и назначения стартовых точек для локальных конвейеров, работающих одновременно в составе итеративной сети.



Результаты и их обсуждение

С практической точки зрения наиболее востребованными в аппаратных способах, схемах и устройствах являются следующие операции над УК:

- поиск первой (слева) логической «1», операция Y_1 ;
- формирование правой серии логических «1», операция Y_2 ;
- поиск последней (справа) логической «1», операция Y_3 ;
- формирование левой серии логических «1», операция Y_4 .

Используя принципы мультифункциональности, мультиконвейеризации, рассматривается схема конвейера для выполнения операций Y_1-Y_4 в рамках одной итерационной сети (рис. 8).

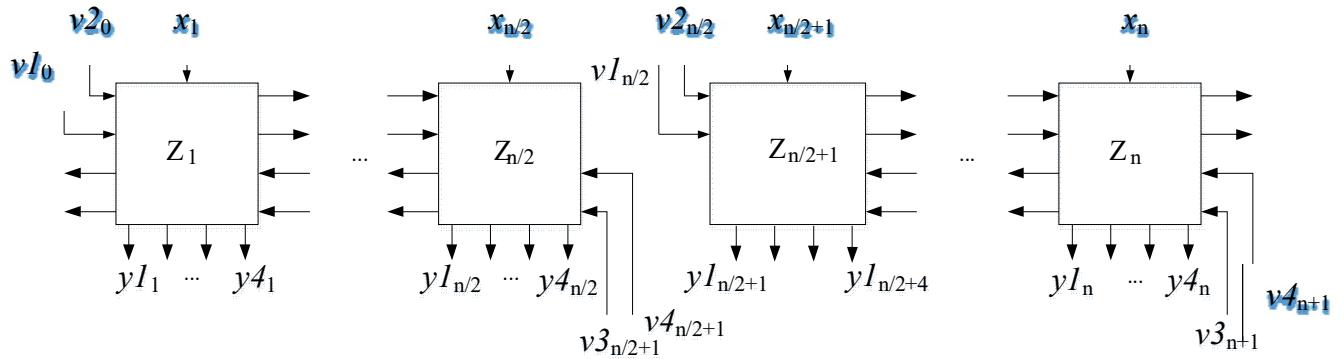
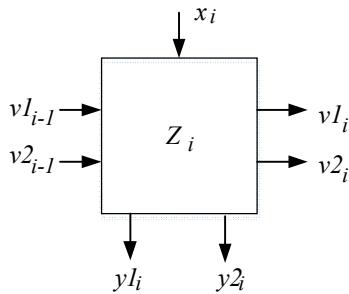


Рис. 8. Конвейерная схема для реализации операций Y1-Y4

Fig. 8. Conveyor scheme for implementing operations Y1-Y4

На рис. 9 показана i -я ячейка итеративной сети для вычисления двух бит $y1_i, y2_i$ операций поиска первой (левой) логической «1» и формирования правой серии логических «1». Направление обхода ячеек сети для операций $Y1, Y2$ – от левой границы к правой границе сети.

Рис. 9. Ячейка итеративной сети для операций $Y1, Y2$ Fig. 9. Iterative network cell for operations $Y1, Y2$

Стартовые точки $v1_0, v2_0$ связующих функций имеют по умолчанию значения

$v1_0=0$ и $v2_0=0$. Они кодируют начальные состояния поиска первой (левой) логической «1» и формирования (генерации) серии логических «1» от найденной логической «1» соответственно.

Стартовые точки $v1_{n/2}, v2_{n/2}$ связующих функций получают начальные значения на основе многовходового элемента ИЛИ от элементов левой половины УК. Действительно, если левая половина УК уже содержит хотя бы одну логическую «1», то второй локальный конвейер должен вести сброс всех логических «1» во второй половине УК (для операции $Y1$) и генерацию логических «1» во всех позициях элементов второй половины (для операции $Y2$). В таблице 2 приведены таблицы истинности для i -го бита операций $Y1, Y2$.

Таблица 2. Таблица истинности работы ячейки на операциях $Y1, Y2$ Table 2. Table of cell operation on operations $Y1, Y2$

$v1_{i-1}$	x_i	$y1_i$	$v1_i$
0	0	0	0
0	1	1	1
1	0	0	1
1	1	0	1

$v2_{i-1}$	x_i	$y2_i$	$v2_i$
0	0	0	0
0	1	1	1
1	0	1	1
1	1	1	1

Аналогичным образом создается ячейка и таблицы истинности для вычисления i -ых выходных бит операций $Y3$, $Y4$ с применением связующих бит $v3_i$, $v4_i$ для них. Направление обхода ячеек сети

$$\begin{cases} v1_{q_1} = x_{q_1} \vee v1_{q_1-1}, q_1 = 1..n/2, v1_0 = 0 \\ y1_{q_1} = x_{q_1} \& \bar{v}1_{q_1-1}, q_1 = 1..n/2 \\ v2_{q_1} = x_{q_1} \vee v2_{q_1-1}, q_1 = 1..n/2, v2_0 = 0 \\ y2_{q_1} = x_{q_1} \vee v2_{q_1-1}, q_1 = 1..n/2, \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} v1_{q_2} = x_{q_2} \vee v1_{q_2-1}, q_2 = n/2 + 1..n, v1_{n/2} = OR_1^{n/2}(x_k) \\ y1_{q_2} = x_{q_2} \& \bar{v}1_{q_2-1}, q_2 = n/2 + 1..n, \\ v2_{q_2} = x_{q_2} \vee v2_{q_2-1}, q_2 = n/2 + 1..n, v2_{n/2} = OR_1^{n/2}(x_k) \\ y2_{q_2} = x_{q_2} \vee v2_{q_2-1}, q_2 = n/2 + 1..n, \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} v3_{q_2} = x_{q_2} \vee v3_{q_2+1}, q_2 = n..n/2 + 1, v3_{n+1} = 0 \\ y3_{q_2} = x_{q_2} \& \bar{v}3_{q_2+1}, q_2 = n..n/2 + 1 \\ v4_{q_2} = x_{q_2} \vee v4_{q_2+1}, q_2 = n..n/2 + 1, v4_{n+1} = 0 \\ y4_{q_2} = x_{q_2} \vee v4_{q_2+1}, q_2 = n..n/2 + 1, \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} v3_{q_1} = x_{q_1} \vee v3_{q_1+1}, q_1 = 1..n/2, v3_{n/2+1} = OR_{n/2+1}^n(x_k) \\ y3_{q_1} = x_{q_1} \& \bar{v}3_{q_1+1}, q_1 = 1..n/2 \\ v4_{q_1} = x_{q_1} \vee v4_{q_1+1}, q_1 = 1..n/2, v4_{n/2+1} = OR_1^{n/2}(x_k) \\ y4_{q_1} = x_{q_1} \vee v4_{q_1+1}, q_1 = 1..n/2. \end{cases} \quad (12)$$

Таблица 3. Таблица истинности работы ячейки на операциях $Y3$, $Y4$

Table 3. Table of cell operation on operations $Y3$, $Y4$

$v3_i$	x_i	$y3_i$	$v3_{i-1}$
0	0	0	0
0	1	1	1
1	0	0	1
1	1	0	1

Оценка временной задержки ступени t_{level} конвейера содержит время срабатывания ячейки t_{lcell} сети и время тактирования (задержка, например, D -триггера), необходимое для сохранения и передачи промежуточных данных между ступенями. Также учитывается время подготовки

для операций $Y3$, $Y4$ – от левой границы к правой границе сети (табл. 3).

Рекуррентные формулы для реализации данных операций на мультиконвейере имеют вид

$$\begin{cases} v1_{q_1} = x_{q_1} \vee v1_{q_1-1}, q_1 = 1..n/2, v1_0 = 0 \\ y1_{q_1} = x_{q_1} \& \bar{v}1_{q_1-1}, q_1 = 1..n/2 \\ v2_{q_1} = x_{q_1} \vee v2_{q_1-1}, q_1 = 1..n/2, v2_0 = 0 \\ y2_{q_1} = x_{q_1} \vee v2_{q_1-1}, q_1 = 1..n/2, \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} v1_{q_2} = x_{q_2} \vee v1_{q_2-1}, q_2 = n/2 + 1..n, v1_{n/2} = OR_1^{n/2}(x_k) \\ y1_{q_2} = x_{q_2} \& \bar{v}1_{q_2-1}, q_2 = n/2 + 1..n, \\ v2_{q_2} = x_{q_2} \vee v2_{q_2-1}, q_2 = n/2 + 1..n, v2_{n/2} = OR_1^{n/2}(x_k) \\ y2_{q_2} = x_{q_2} \vee v2_{q_2-1}, q_2 = n/2 + 1..n, \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} v3_{q_2} = x_{q_2} \vee v3_{q_2+1}, q_2 = n..n/2 + 1, v3_{n+1} = 0 \\ y3_{q_2} = x_{q_2} \& \bar{v}3_{q_2+1}, q_2 = n..n/2 + 1 \\ v4_{q_2} = x_{q_2} \vee v4_{q_2+1}, q_2 = n..n/2 + 1, v4_{n+1} = 0 \\ y4_{q_2} = x_{q_2} \vee v4_{q_2+1}, q_2 = n..n/2 + 1, \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} v3_{q_1} = x_{q_1} \vee v3_{q_1+1}, q_1 = 1..n/2, v3_{n/2+1} = OR_{n/2+1}^n(x_k) \\ y3_{q_1} = x_{q_1} \& \bar{v}3_{q_1+1}, q_1 = 1..n/2 \\ v4_{q_1} = x_{q_1} \vee v4_{q_1+1}, q_1 = 1..n/2, v4_{n/2+1} = OR_1^{n/2}(x_k) \\ y4_{q_1} = x_{q_1} \vee v4_{q_1+1}, q_1 = 1..n/2. \end{cases} \quad (12)$$

$v4_i$	x_i	$y4_i$	$v4_{i-1}$
0	0	0	0
0	1	1	1
1	0	1	1
1	1	1	1

данных для подачи на ячейки конвейера. С учетом выражений (9)-(12) $t_{level}=4\tau$, где τ – время логического вентиля. Тогда эффект от мультифункциональности и мультиконвейеризации оценивается временем, приходящимся на одну операцию.

На рис. 10 показаны времена (в усл. единицах) на одну операцию для моно- и мультиконвейеров, где параметры

конвейера: m_1 – количество функций; m_2 – количество локальных конвейеров.

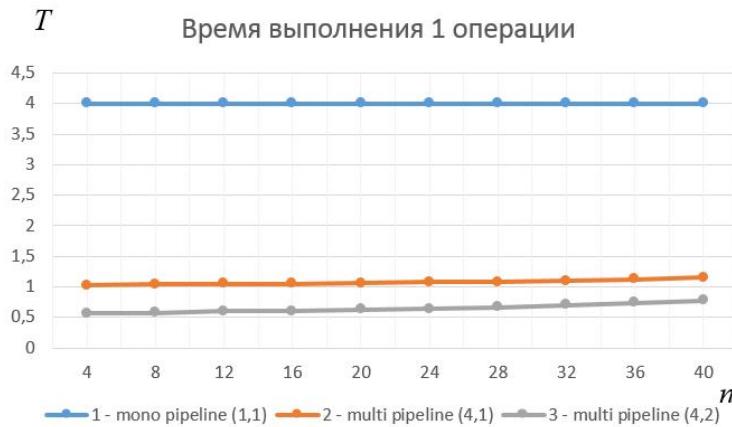


Рис. 10. Время, приходящееся на одну операцию в моно- и мультиконвейерах

Fig. 10. Time per operation in mono- and multi-pipelines

Данные графики показывают повышение удельной производительности конвейерных схем на базе двунаправленной итеративной сети за счет параллельного вычисления нескольких функций в составе ячеек сети и специально организованных локальных конвейерах.

Выводы

Эффективная работа современных однородных ВС поддерживается параллельно-конвейерной обработкой унитарных кодов.

Унитарные коды широко используются во многих проблемно-поисковых и информационно-аналитических, задачах обработки изображений, когнитивных задачах и процессах при планировании па-

раллельных вычислений [23]. Для их эффективной обработки целесообразно использовать многофункциональные конвейеры с параллельной работой локальных конвейеров, имеющих собственные стартовые точки. Объединение принципов тактирования ячеек, выбора направления обработки унитарных кодов, мультифункциональности ячеек, мультиконвейеризации позволяет повысить удельную производительность конвейера при соответствующем увеличении аппаратных затрат на специальную подготовку и подачу элементов кодов из входных потоков. Оценка времени, приходящегося на одну выполняемую операцию, показала не менее 4-кратного временного выигрыша.

Список литературы

1. Корнеев В. В. Вычислительные системы. М.: Гелиос АРВ, 2004. 510 с.
2. Хорошевский В. Г. Архитектура вычислительных систем. 2-е изд. М.: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2008. 520 с.

3. Бурцев В. С. Параллелизм вычислительных процессов и развитие архитектуры суперЭВМ: сб. статей. М.: Торус Пресс, 2006. 414 с.
4. Гузик В.Ф., Каляев И.А., Левин И.И. Реконфигурируемые вычислительные системы. Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2016. 472 с.
5. Каляев И. А., Левин И.И. Реконфигурируемые вычислительные системы на основе ПЛИС. Ростов-на-Дону: Южный научный центр РАН, 2022. 475 с.
6. Огнев И.В., Борисов В.В., Сутула Н.А. Ассоциативные память, среды, системы. М.: Горячая линия – Телеком, 2016. 420 с.
7. Гэри М., Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. М.: Мир, 1982. 416 с.
8. Lothaire M. Applied Combinatorics on Words // Encyclopedia of Mathematics and its Applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
9. Рыбина Г.В. Основы построения интеллектуальных систем. М.: Финансы и статистика, ИНФРА-М, 2010. 432 с.
10. Архитектура вычислительных систем с элементами конвейерной обработки / О.Я. Кравец, Е.С. Подвальский, В.С. Титов, А.С. Ястребов. Воронеж, Курск, Санкт-Петербург: Политехника, 2009. 151 с.
11. Воеводин В.В. Математические модели и методы в параллельных процессах. М.: Наука, 1986. 296 с.
12. Voevodin V.V., Voevodin Vl.V. Parallel computing. St. Petersburg: BHV-Peterburg Publ., 2002. 608 p.
13. Бандман О.Л., Миленков Н.Н., Седухин С.Г. Специализированные процессоры для высокопроизводительной обработки данных. М.: Радио и связь, 1988. 208 с.
14. Фет Я. И. Параллельные процессоры для управляющих систем. М.: Энергоиздат, 1981. 160 с.
15. Обзор исследований киберстрахования / А. Л. Ханис, С. В. Беспалько, Е. А. Титенко [и др.] // Интеллектуальные информационные системы: тенденции, проблемы, перспективы: материалы докладов VII всероссийской очной научно-практической конференции «ИИС-2019». Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. С. 108-118.
16. Павлов П. А. Математические модели и методы организации вычислений в мультипроцессорных системах // Компьютерные исследования и моделирование. 2025. Т. 17, № 3. С. 423-436.
17. Кобайло А. С. Применение гибридных методов проектирования вычислительных систем реального времени // Труды БГТУ. Серия 3: Физико-математические науки и информатика. 2018. № 1(206). С. 120-124.
18. Ватутин Э. И., Зотов И.В., Титов В.С. Использование схемных формирователей и преобразователей двоичных последовательностей при построении комбинатор-

но-логических акселераторов // Известия Курского государственного технического университета. 2008. №4(25). С. 32-39.

19. Зельдин Е.А. Цифровые интегральные микросхемы в информационно-измерительной аппаратуре. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 280 с.
20. Аппаратно-ориентированный метод ускоренного поиска вхождений образца на основе структурно-процедурных вычислений / Е. А. Титенко, Э. И. Ватутин, М. А. Титенко [и др.] // Известия ЮФУ. Технические науки. 2024. № 5(241). С. 68-78.
21. Титенко Е. А., Скорняков К.С., Бусыгин К.Н. Методы и сумматоры с параллельными групповыми процессами // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. № 1. С. 161-166.
22. Титенко Е. А., Семенихин Е.А., Петрик Е. А. Структурно-функциональная организация арбитра параллельной обработки запросов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. Т. 8, № 11. С. 30-34.
23. Титенко Е. А., Типикин А. П., Лапин Д. В. Некоторые пути построения перспективных вычислительных систем для параллельной обработки массивов данных и изображений на ПЛИС // Электромагнитные волны и электронные системы. 2016. Т. 21, № 10. С. 56-59.

References

1. Korneev V. V. Computing systems. Moscow: Gelios ARV; 2004. 510 p. (In Russ.).
2. Khoroshevsky V. G. Architecture of computing systems. 2nd ed. Moscow: Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. N.E. Baumana; 2008. 520 p. (In Russ.).
3. Burtsev V. S. Parallelism of computing processes and development of supercomputer architecture. Collection of articles. Moscow: TORUS PRESS; 2006. 414 p. (In Russ.).
4. Guzik V. F., Kalyaev I. A., Levin I. I. Reconfigurable computing systems Rostov-on-Don: Yuzhnyi federal'nyi universitet; 2016. 472 p. (In Russ.).
5. Kalyaev I. A., Levin I. I. Reconfigurable computing systems based on FPGAs. Rostov-on-Don:Yuzhnyi federal'nyi universitet; 2022. 475 p. (In Russ.).
6. Ognev I. V., Borisov V. V., Sutula N. A. Associative memory, environments, systems Moscow: Goryachaya Liniya – Telecom; 2016. 420 p. (In Russ.).
7. Gary M., Johnson D. Computing machines and difficult-to-solve problems. Moscow: Mir; 1982. 416 p. (In Russ.).
8. Lothaire M. Applied Combinatorics on Words. In: *Encyclopedia of Mathematics and its Applications*. Cambridge: Cambridge University Press; 2005.
9. Rybina G. V. Fundamentals of Building Intelligent Systems. Moscow: Finansy i statistika; INFRA-M; 2010. 432 p. (In Russ.).

10. Kravets O. Ya., Podvalny E. S., Titov V. S., Yastrebov A. S. Architecture of Computing Systems with Elements of Conveyor Processing. Voronezh, Kursk, Sankt-Peteburg: Politekhnika; 2009. 151 p. (In Russ.).
11. Voevodin V. V. Mathematical Models and Methods in Parallel Processes. Moscow: Nauka; 1986. 296 p. (In Russ.).
12. Voevodin V. V., Voevodin Vl. V. Parallel Computing. St. Petersburg: BHV-Peterburg Publ.; 2002. 608 p. (In Russ.).
13. Bandman O.L., Mirenkov N.N., Sedukhin S.G. Specialized processors for high-performance data processing. Moscow: Radio i svyaz; 1988. 208 p. (In Russ.).
14. Fet Ya. I. Parallel processors for control systems. Moscow: Energoizdat; 1981. 160 p. (In Russ.).
15. Khanis A. L., Bespalko S. V., Titenko E. A., et al. Review of cyber insurance research. In: *Intellektual'nye informatsionnye sistemy: tendentsii, problemy, perspektivy: materialy dokladov VII vserossiiskoi ochnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «IIS-2019» = Intelligent information systems: trends, problems, prospects. Materials of reports of the VII All-Russian face-to-face scientific and practical conference "IIS-2019".* Kursk: Southwest State University; 2019. P. 108-118. (In Russ.).
16. Pavlov P. A. Mathematical models and methods for organizing computations in multiprocessor systems. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie = Computer research and modeling.* 2025; 17(3): 423-436. (In Russ.).
17. Kobailo A. S. Application of hybrid methods for designing real-time computing systems. *Trudy BGTU. Seriya 3: Fiziko-matematicheskie nauki i informatika = Proceedings of BSTU. Series 3: Physical and mathematical sciences and computer science.* 2018; (1): 120-124. (In Russ.).
18. Vatutin E. I., Zotov I. V., Titov V. S. Use of circuit shapers and binary sequence converters in the construction of combinatorial logic accelerators. *Izvestiya Kurskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Kursk State Technical University.* 2008; (4): 32-39. (In Russ.).
19. Zel'din E.A. Digital integrated circuits in information-measuring equipment. Lenin-grad: Energoatomizdat; 1986. 280 p. (In Russ.).
20. Titenko E. A., Vatutin E. I., Titenko M. A., et al. Hardware-oriented method for accelerated search for sample occurrences based on structural-procedural calculations. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Bulletin of the Southern Federal University. Technical sciences.* 2024; (5): 68-78. (In Russ.).
21. Titenko E. A., Skornyakov K.S., Busygin K.N. Methods and adders with parallel group processes. *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; (1): 161-166. (In Russ.).

22. Titenko E. A., Semenikhin E. A., Petrik E. A. Structural and functional organization of the arbitrator of parallel query processing. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy = Information, measuring and control systems.* 2010; 8(11): 30-34. (In Russ.).
23. Titenko E. A., Tipikin A. P., Lapin D. V. Some ways of constructing promising computing systems for parallel processing of data arrays and images on FPGA. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy = Electromagnetic waves and electronic systems.* 2016; 21(10): 56-59. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Титенко Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: johntit@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5659-4747>

Сизов Александр Семенович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: johntit@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8110-9929>

Титенко Михаил Андреевич, аспирант кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: johntit@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0008-1560-5594>

Evgeny A. Titenko, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Software Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: johntit@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5659-4747>

Alexandr S. Sizov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Software Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: johntit@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8110-9929>

Mikhail A. Titenko, Post-Graduate Student, Southwest State University, Software Engineering Department, Kursk, Russian Federation, e-mail: johntit@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0008-1560-5594>

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.921

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-157-170>

Разработка геоинформационной системы для мониторинга состояния государственной геодезической и государственной нивелирной сетей Курской области

Е. И. Аникина¹ , Н. А. Чугреев¹

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

✉ e-mail: elenaanikina@inbox.ru

Резюме

Цель исследования. Целью проведенного исследования является создание специализированной геоинформационной системы в качестве единой платформы для систематизации и автоматизации работы с пространственными и семантическими данными при планировании и проведении мониторинга состояния пунктов государственной геодезической и государственной нивелирной сетей на территории Курской области, а также формирования отчетной электронной документации для передачи актуальной информации в Федеральный фонд пространственных данных.

Методы. На основе объектно-ориентированного анализа предметной области сформулированы функциональные требования к специализированной геоинформационной системе. Построена концептуальная модель системы для реализации функциональных требований. На основе объектно-связного метода спроектирована реляционная база данных централизованного хранения и анализа семантической и пространственной информации о пунктах государственных геодезических сетей. Для визуализации данных об актуальном состоянии и расположении на местности пунктов геодезических сетей применен метод тематического картографирования.

Результаты. Разработана кроссплатформенная web-ориентированная специализированная геоинформационная система, предоставляющая пользователям следующий набор функций: визуализация расположения и актуального состояния пунктов государственной геодезической и государственной нивелирной сетей на карте Курской области; преобразование координат из системы WGS 84 в систему МСК 46; поддержка базы данных в актуальном состоянии; поиск пунктов с применением различных фильтров; определение расстояний между точками или произвольными отрезками на карте; расчёт геодезических координат охранных зон пунктов; изображение на карте границ охранных зон пунктов; построение оптимального маршрута для перемещения между пунктами; операции экспорт/импорт файлов электронных таблиц.

Заключение. Разработанная геоинформационная система может применяться специалистами геодезических служб и отделов государственного земельного надзора для сбора, хранения, редактирования, визуализации и анализа пространственных и семантических данных при планировании и проведении мониторинга состояния пунктов государственных геодезических сетей, а также при формировании отчётной документации для передачи актуальной информации в Федеральный фонд пространственных данных.

Ключевые слова: геоинформационная система; веб-приложение; клиент-серверная архитектура; база пространственных данных; тематическая карта; государственная геодезическая сеть; государственная нивелирная сеть координат.

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

Для цитирования: Аникина Е. И., Чугреев Н. А. Разработка геоинформационной системы для мониторинга состояния государственной геодезической и государственной нивелирной сетей Курской области // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(3): 157-170. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-157-170>.

Поступила в редакцию 30.04.2025

Подписана в печать 05.06.2025

Опубликована 30.09.2025

Development of a geoinformation system for monitoring the status of the state geodetic and state leveling networks of the Kursk region

Elena I. Anikina¹ , Nikita A. Chugreev¹

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

 e-mail: elenaanikina@inbox.ru

Abstract

Purpose. The purpose of the conducted research is to create a specialized geoinformation system as a single platform for systematization and automation of work with spatial and semantic data in planning and monitoring the state of points of the state geodetic and state leveling networks in the territory of the Kursk region, as well as the formation of reporting electronic documentation for the transfer of up-to-date information to the Federal Spatial Data Fund.

Methods. Based on the object-oriented analysis of the subject area, functional requirements for a specialized geoinformation system are formulated. A conceptual model of the system for implementing the functional requirements is built. Based on the object-connected method, a relational database for centralized storage and analysis of semantic and spatial information about points of state geodetic networks is designed. The method of thematic mapping is used to visualize data on the current state and location of points of geodetic networks on the ground.

Results. A cross-platform web-oriented specialized geographic information system has been developed, providing users with the following set of functions: visualization of the location and current status of points of the state geodetic and state leveling networks on the map of the Kursk region; transformation of coordinates from the WGS 84 system to the MSC 46 system; maintaining the database in an up-to-date state; searching for points using various filters; determining distances between points or arbitrary segments on the map; calculating geodetic coordinates of security zones of points; displaying the boundaries of security zones of points on the map; constructing an optimal route for moving between points; export/import operations for spreadsheet files

Conclusion. The developed geographic information system can be used by specialists of geodetic services and state land supervision departments for collecting, storing, editing, visualizing and analyzing spatial and semantic data when planning and monitoring the status of points of state geodetic networks, as well as when generating reporting documentation for transferring up-to-date information to the Federal Spatial Data Fund.

Keywords: geographic information system; web application; client-server architecture; spatial database; thematic map; state geodetic network; state leveling coordinate network.

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

For citation: Anikina E. I., Chugreev N. A. Development of a geoinformation system for monitoring the status of the state geodetic and state leveling networks of the Kursk region. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(3): 157-170 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-157-170>.

Received 30.04.2025

Accepted 05.06.2025

Published 30.09.2025

Введение

Государственная геодезическая и государственная нивелирная сети являются базой и критически важной инфраструктурой для проведения геодезических и картографических работ на территории Российской Федерации. Государственная геодезическая сеть (ГГС) предназначена для установления и распространения государственных систем координат. Государственная нивелирная сеть (ГНС) предназначена для определения системы высот точек на земной поверхности [1].

ГГС из ГНС состоят из множества пунктов, представляющих собой специальные закреплённые на местности инженерные конструкции и знаки. Информация о пунктах ГГС и ГНС хранится в Федеральном Фонде пространственных данных Росреестра¹. Пункты ГГС и ГНС находятся под воздействием природных, техногенных и антропогенных факторов, что может привести к изменению их состояния. Для актуализации информации в Федеральном фонде пространственных данных ежегодно проводится мониторинг состояния пунктов ГГС и ГНС [2, 3].

В Курской области мониторинг состояния пунктов ГГС и ГНС проводится специалистами отдела государственного земельного надзора, геодезии и картографии, контроля (надзора) в сфере

саморегулируемых организаций Управления Росреестра по Курской области.

В настоящее время в данном отделе сложилась следующая непростая ситуация с применением информационных технологий. Используется мониторинговая устаревшая система накопления и хранения информации во множестве отдельных несвязанных между собой документах в бумажной и электронной форме, являющаяся причиной фрагментарности, дублирования и рассогласования данных. Современным подходом к решению этих проблем является создание и использование единой базы данных [4].

Для решения профессиональных задач, связанных с необходимостью получения и визуализации пространственных данных, специалисты отдела, в основном, используют 3 отдельных программно-информационных системы: коммерческий картографический сервис² и Национальная система пространственных данных (НСПД)³. Необходимость применения нескольких программных продуктов и геопорталов объясняется тем, что в каждом из них можно выполнить только отдельные виды работ. Применение устаревшей системы хранения данных и работа с несколькими программно-информационными системами приводят к ошибкам и нерациональным затратам ра-

¹ Федеральный портал пространственных данных (ФППД): государственная информационная система. URL: <https://portal.fppd.cgkipd.ru/main>.

² GeoBridge: программный комплекс: URL: <https://geobridge.ru/maps#>.

³ Национальная система пространственных данных: официальный портал. URL: <https://nsdpd.gov.ru/>.

бочего времени, поэтому существует необходимость создания специализированного программно-информационного комплекса для объединения необходимых функций в рамках единого программного продукта на основе единой базы данных.

Современным подходом к информатизации деятельности геодезических служб является разработка и внедрение геоинформационных систем (ГИС) [5, 6, 7].

Материалы и методы

Специализированная ГИС разрабатывается с учетом определенных особенностей состава и способов представления информации о пунктах ГГС и ГНС, на основе которой проводится анализ текущей ситуации и планируются мониторинговые мероприятия [8, 9, 10].

Информация о пунктах ГГС и ГНС, которая должна храниться в базе данных ГИС, включает в себя два вида данных: пространственные и семантические [11].

Пространственные данные о пунктах ГГС и ГНС – это геодезические координаты точки на местности, с которой связан данный пункт. В работе российских геодезических служб и надзорных органов традиционно используются системы координат двух различных типов: всемирная геодезическая система WGS-84 (World Geodetic System) и местная система координат (МСК). На территории Курской области используется система геодезических координат МСК-46, разделенная на две зоны для западной и восточной частей области (первая и вто-

рая зона). Граница зон проходит немноголи западнее 37-го меридиана ($\approx 36.98^\circ$) восточной долготы. Специализированная ГИС должна иметь инструменты для автоматического взаимного преобразования координат пунктов, представленных в WGS-84 и МСК-46 [12].

Каждый пункт ГГС и ГНС имеет охранную зону [13]. Если при очередном обследовании определенный пункт ГГС или ГНС признается сохранным, а до обследования состояние пункта было неизвестно, то устанавливается охранная зона пункта. ГИС должна иметь функцию автоматического расчета координат вершин прямоугольной области на местности для определения и построения на карте границ охранных зон пунктов.

Семантические данные о пунктах ГГС и ГНС – это описательная информация о пункте ГГС или ГНС, которая включает:

- название пункта;
- название административного района Курской области, на территории которого находится пункт;
- номер марки центра пункта;
- класс пункта в соответствии с геодезической классификацией;
- наличие или отсутствие наземного знака пункта;
- тип центра пункта;
- дата последнего обследования пункта;
- текущее состояние пункта (сохранён, утрачен, повреждён, не найден).

На основе объектно-ориентированного подхода проведен анализ предмет-

ной области ГИС, в результате которого были сформулированы следующие функциональные требования к специализированной геоинформационной системе (ГИС).

1. Централизованное хранение пространственных и семантических данных о пунктах ГГС и ГНС в единой базе данных.

2. Добавление, удаление и редактирование данных о пунктах в базе данных.

3. Визуализация местоположения пунктов ГГС и ГНС на географической карте Курской области.

4. Визуализация актуального состояния пунктов ГГС и ГНС.

5. Поиск пунктов ГГС и ГНС по ряду признаков.

6. Импорт данных из файлов Excel.

7. Экспорт данных в Excel.

8. Определение расстояний между точками или произвольными отрезками на карте.

9. Вывод значений геодезических координат пунктов на местности.

10. Расчёт и отображение на карте границ охранной зоны выбранного пункта.

11. Построение и отображение на карте оптимального маршрута для перемещения между пунктами.

12. Автоматическое преобразование геодезических координат пунктов из системы WGS-84 в систему МСК-46 и поддержка переключения между этими системами координат.

13. Выбор и отображение картографической подложки.

14. Возможность работы в полевых условиях через специальный интегрированный в систему Telegram-бот.

На рис. 1 представлена концептуальная модель разработанной специализированной ГИС.

Результаты и их обсуждение

Для реализации функциональных требований к специализированной геоинформационной системе разработано web-приложение.

Клиентская часть веб-приложения разработана с использованием языков HTML и JavaScript. Для отображения тематической карты местности в окне браузера в веб-приложении используется открытая картографическая JavaScript-библиотека Leaflet.

Серверная часть веб-приложения разработана с использованием языка программирования Python и фреймворка Flask¹ [14]. База пространственных данных [15] реализована в среде системы управления базами данных PostgreSQL с расширением PostGIS.

Веб-приложение имеет модульную структуру, компоненты которой взаимодействуют друг с другом в соответствии с представленной на рис. 2 моделью.

Описание функционала компонентов веб-приложения представлено в табл. 1.

На рис.3 показан внешний вид рабочей области веб-приложения.

¹ Whitebox Geospatial Analysis Tools. URL: <https://whiteboxgeospatial.wordpress.com>.

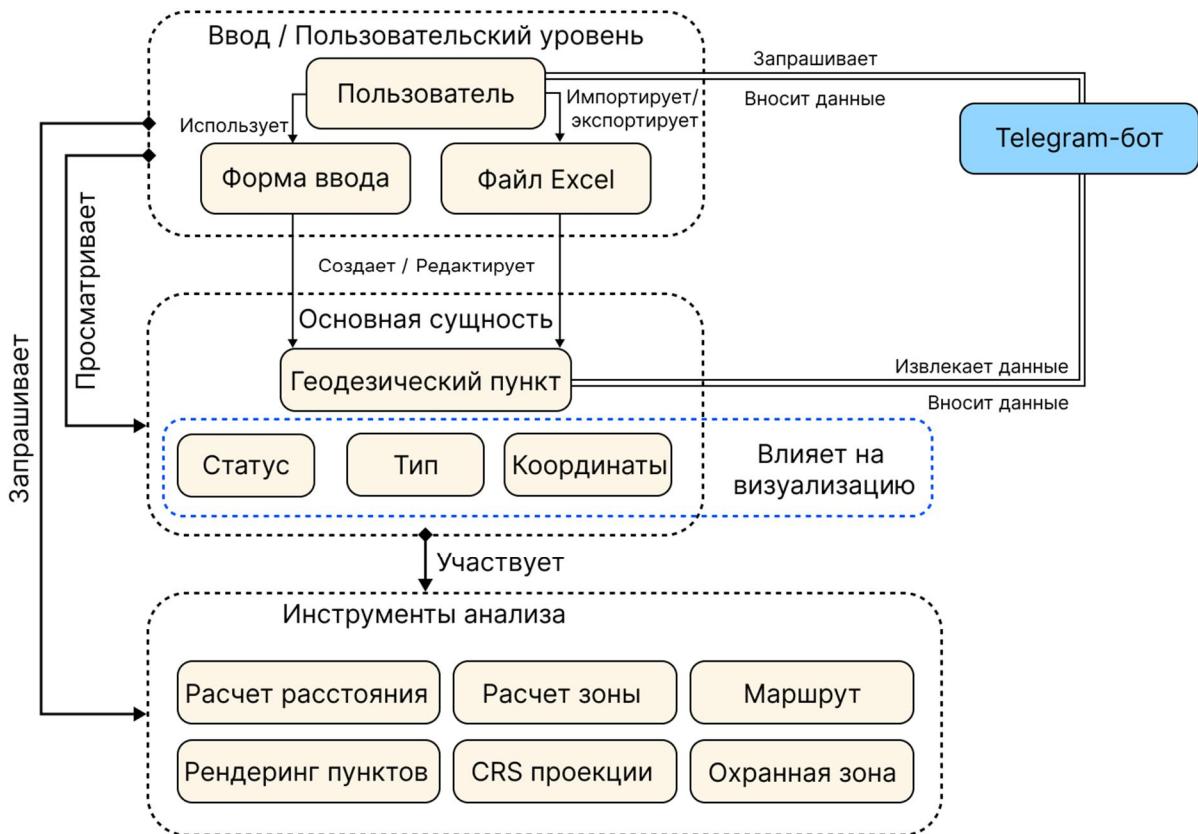


Рис. 1. Концептуальная модель специализированной ГИС

Fig. 1. Conceptual model of specialized GIS

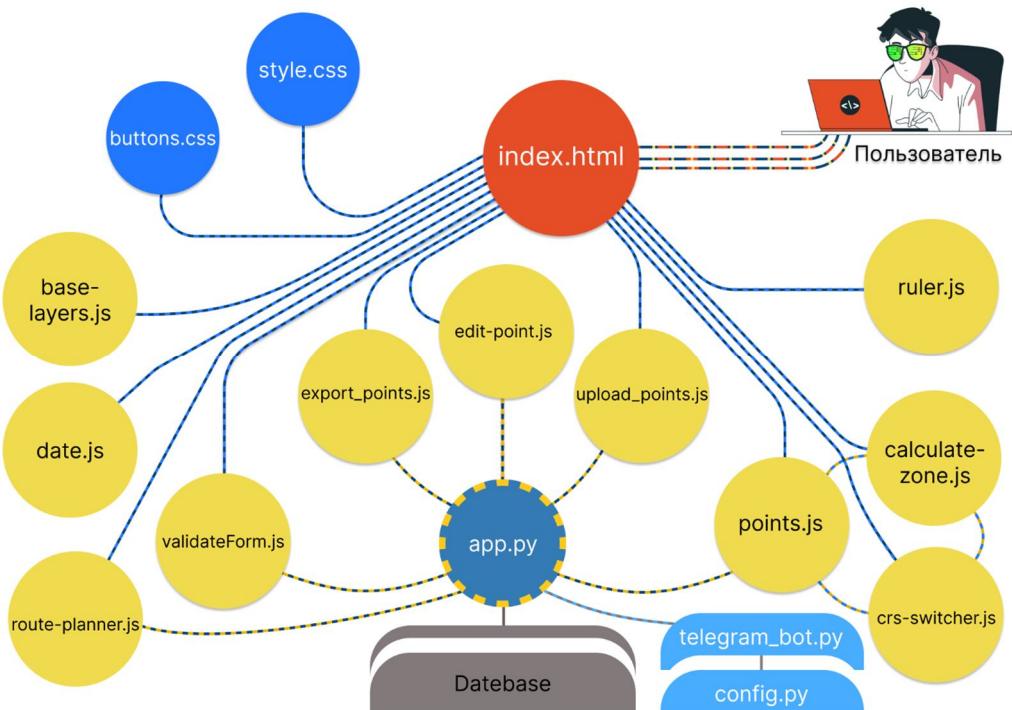
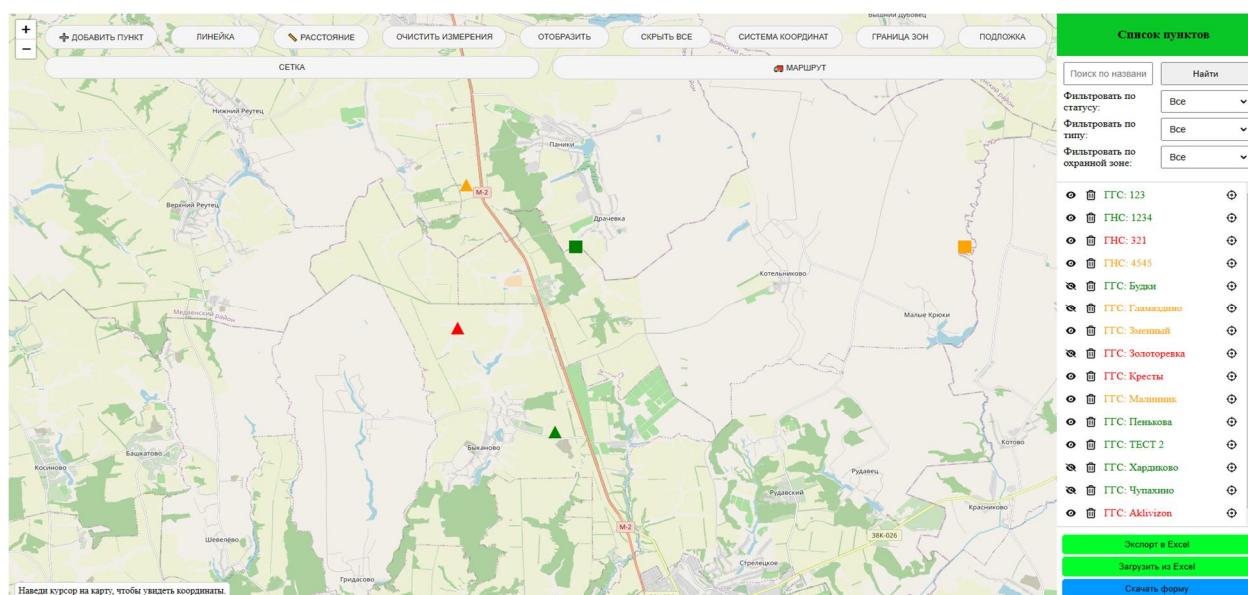


Рис. 2. Взаимодействие компонентов веб-приложения

Fig. 2. Interaction of web application components

Таблица 1. Функции компонентов веб-приложения**Table 1.** Functions of web application components

Имя компонента / Component Name	Функция / Function
points.js	Работа со списком пунктов
Calculate-zone.js	Расчёт охранной зоны
crs-switcher.js	Переключатель систем координат
base-layers.js	Управление подложками карты
ruler.js	Измерение расстояний
edit-point.js	Редактирование карточки пункта
validateForm.js	Валидация форм
upload_points.js	Импорт данных из Excel
export_points.js	Экспорт данных в Excel
date.js	Обработка даты обследования
app.py	Веб-сервер k)
style.css	Основные стили интерфейса
buttons.css	Анимации и стили кнопок
index.html	Основная веб-страница

**Рис. 3.** Рабочая область веб-приложения**Fig. 3.** Web application workspace

Пользователь системы работает с тематической картой, на которую выводятся маркеры пунктов ГГС и ГНС в соответствии с принятыми в геодезии обозначениями.

Маркеры в виде треугольников обозначают пункты ГГС, а маркеры в виде прямоугольников – пункты ГНС.

Цвет маркера обозначает текущее состояние пункта:

– серый цвет: пункт не обследован;

- зеленый цвет: пункт сохранён;
- красный цвет: пункт утрачен;
- оранжевый цвет: пункт поврежден.

Название пунктов появляется на карте при наведении курсора на маркер пункта (рис. 4).

По умолчанию в качестве картографической основы используется карта OpenStreetMap, при этом для анализа обстановки на местности можно выбрать картографическую основу Stamen Terrain или Ersi satellite.

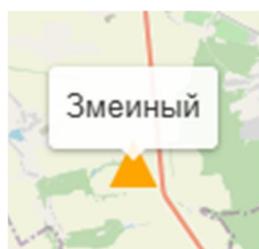


Рис. 4. Вывод названия пункта

Fig. 4. Example of the item name output

В верхней части рабочей области расположена панель инструментов для выполнения основных действий. Элементы панели инструментов и их функции представлены в табл. 2.

Справа от карты выводится список загруженных в базу данных пунктов ГГС и ГНС с инструментами для поиска, фильтрации и управления выводом на экран. Пример работы с инструментом фильтрации пунктов показан на рис. 5. Пользователь может получить полную информацию об определенном пункте в виде карточки пункта. Для этого надо навести курсор мыши на маркер пункта на карте или выбрать название пункта из списка. Пример вывода карточки пункта приведен на рис. 6.

Таблица 2. Элементы панели инструментов

Table 2. Toolbar elements

Название / Name	Функция / Function
ДОБАВИТЬ ПУНКТ	Вывод на экран формы для добавления данных нового пункта ГГС или ГНС
ЛИНЕЙКА	Вывод расстояний на карте
РАССТОЯНИЕ	Вывод на экран окна для расчёта расстояния между двумя выбранными пунктами
ОЧИСТИТЬ ИЗМЕРЕНИЯ	Удаление с карты результатов измерения расстояний
ОТОБРАЗИТЬ	Отображение на карте все пункты, которые находятся в пределах текущего экрана
СКРЫТЬ ВСЕ	Отключение режима вывода маркеров пунктов на карту все маркеры пунктов с карты
СИСТЕМА КООРДИНАТ	Вывод на экран меню выбора системы координат
ГРАНИЦА ЗОН	Включение/отключение режима отображения на карте границы между зонами МСК-46 (зона 1) и МСК-46 (зона 2)
ПОДЛОЖКА	Вывод меню выбора картографической подложки
СЕТКА	Включение / отключение отображения координатной сетки
МАРШРУТ	Вывод на экран окна для построения оптимального маршрута между выбранными пунктами

Поиск по названию	Найти												
Фильтровать по статусу:	Сохранён ▾												
Фильтровать по типу:	ГГС ▾												
Фильтровать по охранной зоне:	Не установлен ▾												
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 10%; text-align: center; vertical-align: middle;"> </td> <td style="width: 10%; text-align: center; vertical-align: middle;"> </td> <td style="width: 70%; text-align: left; vertical-align: middle;"> ГГС: Пенькова </td> <td style="width: 10%; text-align: center; vertical-align: middle;"> <input type="radio"/> </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; vertical-align: middle;"> </td> <td style="text-align: center; vertical-align: middle;"> </td> <td style="text-align: left; vertical-align: middle;"> ГГС: Хардиково </td> <td style="text-align: center; vertical-align: middle;"> <input type="radio"/> </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; vertical-align: middle;"> </td> <td style="text-align: center; vertical-align: middle;"> </td> <td style="text-align: left; vertical-align: middle;"> ГГС: Чупахино </td> <td style="text-align: center; vertical-align: middle;"> <input type="radio"/> </td> </tr> </table>				ГГС: Пенькова	<input type="radio"/>			ГГС: Хардиково	<input type="radio"/>			ГГС: Чупахино	<input type="radio"/>
		ГГС: Пенькова	<input type="radio"/>										
		ГГС: Хардиково	<input type="radio"/>										
		ГГС: Чупахино	<input type="radio"/>										

Рис. 5. Пример фильтрации пунктов**Fig. 5.** Example of filtering items

Информация о пункте

ID: 67

Номер индекса: М3605784

Название: Гламаздино

Марка: нет

Описание местоположения: Не указано

Административный район: Хомутовский район

Класс пункта: 3

Наличие знака: Нет

Тип центра: 41

Дата последнего обследования: 01-01-2025

Статус: поврежден

Координаты: X = 34.71286569, Y = 51.94425489

Комментарии: Нет

Охранная зона: Не установлена

Редактировать
Рассчитать зону
Закрыть

Рис. 6. Карточка пункта**Fig. 6.** Item card

Специально разработанный и интегрированный с веб-приложением Telegram-бот предназначен для добавления в базу данных ГИС информации о новых пунктах ГГС и ГНС в полевых условиях.

Тестиирование разработанного веб-приложения [16] показало полное соответствие функциональным требованиям к специализированной ГИС

Функционал разработанной ГИС позволяет решать все практические задачи,

для которых ранее приходилось использовать три отдельных системы: коммерческий картографический сервис GEOBRIDGE, Федеральный портал пространственных данных (ФПДД) и Национальная система пространственных данных (НСПД).

В табл. 3 представлены результаты сравнительного анализа функциональных возможностей названных систем и разработанной ГИС.

Таблица 3. Сравнение функциональных возможностей систем

Table 3. Comparison of functional capabilities of systems

Функция / система / Function / system	GEOBRIDGE	ФПДД	НСПД	Разработанная ГИС / Developed GIS
Визуализация местоположения пунктов на карте	✓	✓	—	✓
Одновременное отображение пунктов ГГС и ГНС	✓	—	—	✓
Визуализация текущего статуса пунктов ГГС и ГНС	—	—	—	✓
Полный набор атрибутов пункта	—	✓	—	✓
Работа с системами координат WGS-84 и МСК-46 (зоны 1 и 2)	✓	—	—	✓
Редактирование и добавление данных о пунктах	—	—	—	✓
Операции импорта и экспорта файлов в формате Excel	—	—	—	✓
Расширенный поиск пунктов	—	✓	—	✓
Расчёт координат охранной зоны	—	—	—	✓
Отображение границ охранных зон пунктов	—	—	✓	✓
Построение оптимального маршрута для перемещения между пунктами	—	—	—	✓

Выводы

Разработана кроссплатформенная web-ориентированная специализированная геоинформационная система, предоставляющая пользователям следующий набор функций:

- визуализация местоположения и актуального состояния пунктов государственной геодезической и государственной нивелирной сетей на карте Курской области;
- переключение между системами координат WGS-84 / МСК-46;
- поддержка базы данных в актуальном состоянии;
- поиск пунктов по ряду параметров;
- определение расстояний между точками или произвольными отрезками на карте;
- расчёт координат и изображение на карте границ охранных зон пунктов;

- построение оптимального маршрута для перемещения между пунктами;
- операции экспорта/импорта файлов электронных таблиц;
- актуализация данных о состоянии пунктов в полевых условиях через специально разработанный Telegram-бот.

Разработанная геоинформационная система может применяться специалистами геодезических служб и отделов государственного земельного надзора для сбора, хранения, актуализации, визуализации и анализа пространственных и семантических данных при планировании и проведении мониторинга состояния пунктов государственных геодезических сетей, а также при формировании отчётной документации для передачи актуальной информации в Федеральный фонд пространственных данных.

Список литературы

1. Хвостова О. А. Пункты государственной геодезической сети // Инновационные методы проектирования строительных конструкций зданий и сооружений: сб. науч. трудов 4-й Всерос. науч.-практ. конф., Курск, 22 ноября 2022 г. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. С. 529–532.
2. Об обследовании пунктов государственной геодезической сети в 2024 году // Картография. Геодезия. Кадастр: новостной портал. URL: <https://kartgeocentre.ru/itogi-raboty/ob-obsledovaniyu-punktov-gosudarstvennoy-geodezicheskoy-seti-v-2024-godu-0> (дата обращения: 26.03.2025).
3. Khaustov I.A., Rylev S.S., Kovaleva E.N. Development and application of modern geographic information systems for monitoring the environmental status of objects // Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2019. Vol. 81, № 4 (82). P. 263-267.
4. Аникина Е. И., Чугреев Н. А., Немцева В. А. Цифровизация процессов геодезического надзора и охраны пунктов государственной геодезической и нивелирной сети // Программная инженерия: современные тенденции развития и применения (ПИ-2024): материалы 10-й региональной научно-практической конференции. Курск, 2024. С. 133 –139.

5. Основные направления использования геоинформационных систем в землеустройстве и земельном кадастре / С. В. Шайтура, В. Ф. Гранкин, А. В. Коломейцев, Ю. П. Кожаев, И. А. Байгутлина // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 2. С. 165–171.
6. Быстров А.Ю., Майоров А.А. Обзор современных теорий и принципов построения мультифункциональных динамических мониторинговых геоинформационных систем // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2021. Т. 65, № 1. С. 108–116.
7. Курагин А.В., Колесенков А.Н., Костров Б.В. Разработка и анализ методов проектирования геоинформационных систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 9. С. 283-287.
8. Зайцев Е.М., Коломиец Е.А., Николаев В. Н. Формализация этапов жизненного цикла создания геоинформационной продукции на научно-производственном предприятии // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 146-165. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-146-165>.
9. Романова И.Н., Юнаков В.С. Подходы к созданию Региональной ГИС Алтайского края // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2022. №4(28). С.156-169.
10. Guonian Lü, Xudong Li, Min Chen . Towards information geography in ternary space //Information Geography. 2025. Vol.1. P. 24-34.
11. Курагин А.В., Колесенков А.Н., Костров Б.В. Разработка и анализ методов проектирования геоинформационных систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 9. С. 283-28.
12. Непоклонов В.Б., Максимова М.В., Неподоба А.А. Сравнительный анализ точности преобразований координат при использовании различных онлайн-конверторов // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2022. Т. 66, № 6. С. 6–18.
13. Пархоменко Д. В., Чернов А. В., Пархоменко И. В. Применение геоинформационных технологий для создания охранных зон пунктов государственной геодезической основы // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2020. № 4.
14. Гринберг М. Разработка веб-приложений с использованием Flask на языке Python. М.: ДМК Пресс, 2022.
15. Тарапин А.М. Понятие и реализация базовых наборов пространственных данных в национальной системе пространственных данных Российской Федерации // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2022. Т. 27, № 2. С. 44-58.
16. Аникина Е.И., Тембо И. Выбор метода приоритизации тестовых наборов при регрессионном тестировании программной системы // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, №4. С. 120-129. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2021-11-4-120-129>.

References

1. Khvostova O. A. Points of the state geodetic network. In: *Innovatsionnye metody proektirovaniya stroitel'nykh konstruktsii zdani i sooruzhenii: sb. nauch. trudov 4-i Vseros. nauch.-prakt. konf. = Innovative methods for designing building structures of buildings and structures. Collection of scientific papers of the 4th All-Russian scientific and practical conf.* Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2022. P. 529–532. (In Russ.).
2. On the survey of points of the state geodetic network in 2024. *Kartografiya. Geodeziya. Kadastr: novostnoi portal = Cartography. Geodesy. Cadastre: news portal.* (In Russ.). Available at: <https://kartgeocentre.ru/itogi-raboty/ob-obsledovanii-punktov-gosudarstvennoy-geodezicheskoy-seti-v-2024-godu-0> (accessed: 26.03.2025).
3. Khaustov I.A., Rylev S.S., Kovaleva E.N. Development and application of modern geographic information systems for monitoring the environmental status of objects. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies.* 2019; 81(4): 263-267.
4. Anikina E. I., Chugreev N. A., Nemtseva V. A. . Digitalization of processes of geodetic supervision and protection of points of the state geodetic and leveling network. In: *Programmnaya inzheneriya: sovremennoye tendentsii razvitiya i primeneniya (PI-2024): materialy 10-i regional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii.* Kursk; 2024. P. 133 – 139 (In Russ.).
5. Shajtura S. V., Grankin V. F., Kolomejcev A. V., Kozhaev Yu. P., Bajgutlina I. A. Main directions of use of geoinformation systems in land management and land cadastre. *Vestnik Kurskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii = Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy.* 2022; (2): 165–171. (In Russ.).
6. Bystrov A.Yu., Maiorov A.A. Review of modern theories and principles of constructing multifunctional dynamic monitoring geoinformation systems. *Izv. vuzov «Geodeziya i aerofotos»emka» = News of universities "Geodesy and aerial photography".* 2021; 65(1): 108–116. (In Russ.).
7. Kuragin A.V., Kolesenkov A.N., Kostrov B.V. Development and analysis of methods for designing geoinformation systems. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Bulletin of Tula State University. Technical sciences.* 2021; (9): 283-287. (In Russ.).
8. Zaitsev E. M., Kolomiets E. A., Nikolaev V. N. Formalization of Life Cycle Stages of Geographic Information Products Creation at Research and Production Enterprises. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University.* 2020; 24(4): 146-165 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-146-165>.
9. Romanova I.N., Yunakov V.S. Approaches to the creation of a Regional GIS of Altai Krai. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and Mathematical Technologies in Science and Management.* 2022; (4): 156-169. (In Russ.).
10. Guonian Lü, Xudong Li, Min Chen . Towards information geography in ternary space. *Information Geography.* 2025; (1): 24-34.

11. Kuragin A.V., Kolesenkov A.N., Kostrov B.V. Development and analysis of geoinformation systems design methods. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Bulletin of Tula State University. Technical sciences.* 2021; (9): 283-28. (In Russ.).
12. Nepoklonov V.B., Maksimova M.V., Nepodoba A.A. Comparative analysis of the accuracy of coordinate transformations using various online converters. *Izvestiya vuzov «Geodeziya i aerofotos» emka = Bulletin of universities "Geodesy and aerial photography".* 2022; 66(6): 6–18. (In Russ.).
13. Parkhomenko D. V., Chernov A. V., Parkhomenko I. V. Application of geoinformation technologies for the creation of security zones of state geodetic base points. *Vestnik SGUGiT (Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologii) = Bulletin of SSUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies).* 2020; (4). (In Russ.).
14. Grinberg M. Developing Web Applications Using Flask in Python. Moscow; DMK Press; 2022. (In Russ.).
15. Tararin A.M. Concept and implementation of basic spatial datasets in the national spatial data system of the Russian Federation. *Vestnik SGUGiT (Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologii) = Bulletin of SSUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies).* 2022; 27(2): 44-58. (In Russ.).
16. Anikina E.I., Tembo I. Choosing a Method of Test Cases Prioritizing for Regression Testing of a Software System. *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.* 2021;11(4):120-129. (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2021-11-4-120-129>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Аникина Елена Игоревна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: elenaanikina@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6047-8688>, Scopus ID: 57217310974

Чугреев Никита Андреевич, студент магистратуры, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: chug46@mail.ru

Elena I. Anikina, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Software Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: elenaanikina@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6047-8688>

Nikita A. Chugreev, Master Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: chug46@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.932

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-171-181>

Программно-информационная система для конструирования веб-сайтов

И.Н. Ефремова¹ , Е.А. Петрик¹, А.М. Кириллов¹

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

✉ e-mail: efremova-in@inbox.ru

Резюме

Цель исследования. Актуальной проблемой в системах конструирования сайтов является цена и доступность. Следовательно, актуальна задача разработки системы конструирования веб-сайтов, рассчитанной на широкий круг пользователей, и обеспечения свободного доступа к ней. Целью данного исследования является разработка программно-информационной системы для конструирования веб-сайтов.

Методы. Конструктор веб-сайтов был написан на языке PHP. Также при реализации конструктора для создания пользовательского интерфейса были использованы HTML, CSS, JavaScript и Bootstrap. Для работы с данными использовалась СУБД MySQL, распространяемая под лицензией GNU General Public License, что обеспечивает её бесплатное использование, снижая финансовые затраты для пользователей программного продукта. MySQL характеризуется высокой производительностью, стабильностью функционирования и поддержкой кроссплатформенности данных и кода. Администрирование базы данных выполняется с помощью веб-приложения с открытым исходным кодом phpMyAdmin.

Результаты. Разработанным конструктором веб-сайтов предоставляются следующие возможности пользователю: навигация в пользовательском меню; регистрация нового пользователя, авторизация зарегистрированного пользователя, выход из кабинета; создание, удаление сайта; добавление и удаление блока, редактирование текста, цвета и фона блока; редактирование фона сайта. Система представляет собой единый модуль, обеспечивающий управление созданными сайтами и редактирование их содержимого. Система представляет собой единый модуль, обеспечивающий управление созданными сайтами и редактирование их содержимого. Результатом работы пользователя является HTML-файл, содержащий созданный веб-сайт, и связанные с ним CSS-файлы. В ходе тестирования была проанализирована работоспособность конструктора при реализации всех предоставляемых функций.

Заключение. Разработанный конструктор работает стablyно и готов к внедрению. Система призвана упростить создание веб-сайтов, минимизируя временные и финансовые затраты. Созданный конструктор веб-сайтов может быть использован широким кругом пользователей.

Ключевые слова: система создания сайтов; веб-сайт; конструктор веб-сайтов; веб-дизайн; веб-программирование.

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

Для цитирования: Ефремова И.Н., Петрик Е.А., Кириллов А.М. Программно-информационная система для конструирования веб-сайтов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(3): 171-181. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-171-181>.

Поступила в редакцию 09.06.2025

Подписана в печать 22.07.2025

Опубликована 30.09.2025

© Ефремова И.Н., Петрик Е.А., Кириллов А.М., 2025

Software and information system for web site construction

Irina N. Efremova¹✉, Elena A. Petrik¹, Alexander M. Kirillov¹

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

✉ e-mail: efremova-in@inbox.ru

Abstract

Purpose of research. The current problem in website construction systems is price and availability. Therefore, the task of developing a website construction system designed for a wide range of users and providing free access to it is relevant. The purpose of this study is to develop a software and information system for website construction.

Methods. The website builder was written in PHP. HTML, CSS, JavaScript, and Bootstrap were also used to create the user interface. MySQL, which is distributed under the GNU General Public License, was used to work with data, providing free use and reducing financial costs for software users. MySQL is known for its high performance, stability, and support for cross-platform data and code. The database is managed using the open-source web application phpMyAdmin.

Results. The developed website builder provides the following features to the user: navigation in the user menu; registration of a new user, authorization of a registered user, exit from the cabinet; creation, deletion of the site; adding and deleting a block, editing the text, color and background of the block; editing the background of the site. The system is a single module that provides management of created sites and editing of their contents. The system is a single module that provides management of created sites and editing of their contents. The result of the user's work is an HTML file containing the created website and its associated CSS files. During the testing, the functionality of the constructor was analyzed when all the provided functions were implemented.

Conclusion. The developed website builder is stable and ready for implementation. The system is designed to simplify the creation of websites by minimizing time and financial costs. The created website builder can be used by a wide range of users.

Keywords: website creation system; website; website builder; web design; web programming.

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

For citation: Efremova I. N., Petrik E. A., Kirillov A. M. Software and information system for web site construction. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(3): 171-181 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-171-181>.

Received 09.06.2025

Accepted 22.07.2025

Published 30.09.2025

Введение

В настоящее время значительная часть взаимодействия людей в социуме, в том числе и ведение бизнеса происходят с использованием сети Интернет. Можно сказать, что на сегодняшний день

именно веб-приложения являются основным способом реализации указанной тенденции. Таким образом, сайты являются неотъемлемой важной частью современного мира.

Веб-разработка остается ресурсоемким процессом, требующим участия ква-

лифицированных специалистов или команд разработчиков. Финансовые затраты на создание веб-приложений могут быть недоступны для ряда пользователей. В качестве альтернативы существуют конструкторы сайтов, предназначенные для самостоятельного создания веб-ресурсов. Выбор между профессиональной разработкой и использованием конструкторов определяется масштабом потребностей пользователя: для локальных задач целесообразно применение конструкторов. Однако на рынке отсутствуют полноценные бесплатные решения, что подчеркивает актуальность разработки новых инструментов.

Исходя из вышесказанного была поставлена задача разработки конструктора веб-сайтов с простым и понятным интерфейсом, который не требовал бы при его использовании владением профессиональными знаниями и навыками и был доступен широкой аудитории. Но

тем не менее, этот конструктор должен предоставлять пользователю функциональные возможности, приближенные к профессиональным системам подобного класса. Конструктор веб-сайтов был написан на языке PHP. Также при реализации конструктора для создания пользовательского интерфейса были использованы HTML, CSS, JavaScript и Bootstrap [1; 2]. Разрабатываемая система призвана упростить создание веб-сайтов, минимизируя временные и финансовые затраты.

Система представляет собой единый модуль, обеспечивающий управление созданными сайтами и редактирование их содержимого. Результатом работы пользователя является HTML-файл, содержащий созданный веб-сайт, и связанные с ним CSS-файлы. Функциональные возможности системы отражены в диаграмме прецедентов (рис. 1), включающей ключевые сценарии взаимодействия пользователя с продуктом.

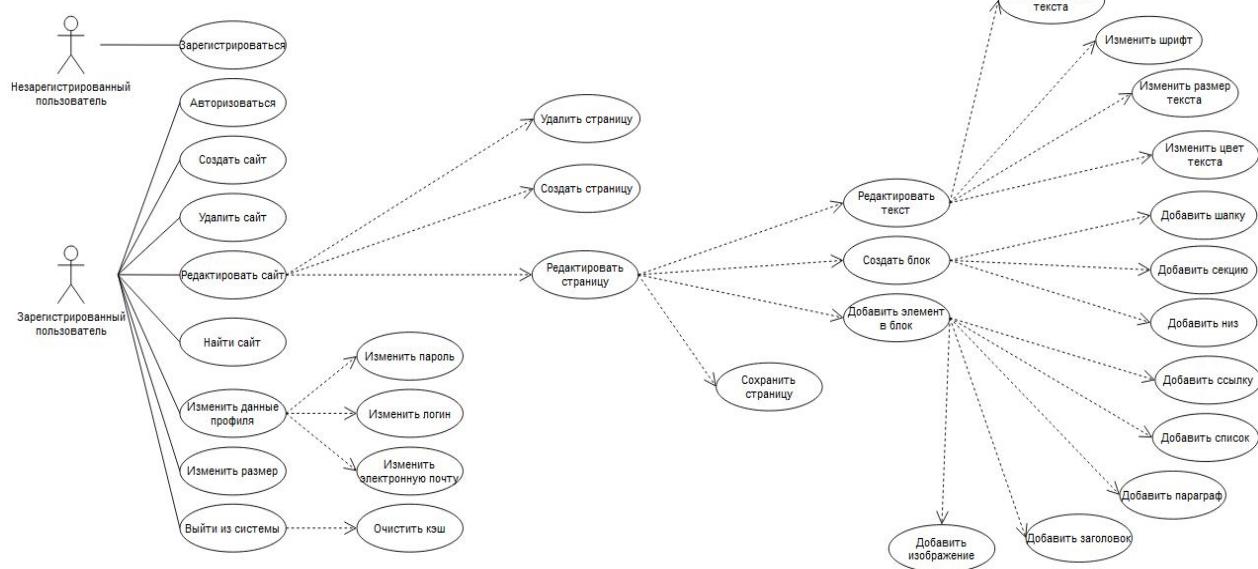


Рис. 1. Диаграмма прецедентов для программно-информационной системы

Fig. 1. Use Case Diagram of the software information system

В конструкторе должны присутствовать: регистрация и авторизация; создание, редактирование и удаление сайтов; главная страница с данными статистики; страница по редактированию сайта, включающая в себя блочное разделение [3-5].

Материалы и методы

Данные о пользователях и их проектах содержатся в табличной базе данных. Для работы с этими данными использовалась СУБД MySQL, распространяемая под лицензией GNU General Public License, что обеспечивает её бесплатное использование, снижая финансовые затраты для пользователей программного продукта. MySQL характеризуется высокой производительностью, стабильностью функционирования и поддержкой кроссплатформенности данных и кода [6-8]. Администрирование базы данных выполняется с помощью веб-приложения с открытым исходным кодом phpMyAdmin [9, 10].

На основе анализа предметной области разработана структура базы данных, содержащая три типа таблиц: 1) информация о зарегистрированном пользователе, включающая данные для аутентификации и контактную информацию; 2) информация о созданных пользователем веб-проектах; 3) информация о страницах, созданных (создаваемых) с помощью конструктора веб-сайтов.

Созданный конструктор веб-сайтов является клиент-серверным приложением. Программный интерфейс с пользователем реализуется на компьютере пользователя. А данные о компонентах конструктора веб-сайта хранятся на сервере. Взаимодействие клиентской части с сер-

вером осуществляется по протоколам HTTP и HTTPS.

В ходе разработки были изучены вопросы структуры веб-сайта. Также теоретически и практически во взаимодействии с потенциальными пользователями, был сформирован программный интерфейс разрабатываемого конструктора с пользователем¹ [11, 12, 13, 14, 15].

На рис. 2 изображена структура меню и показаны разделы системы. На рис. 3 представлена диаграмма классов.

Диаграмма классов (рис. 3) служит для визуального отображения совокупности классов, интерфейсов и их взаимодействий, иллюстрируя связи между элементами предметной области, включая объекты и подсистемы. Она служит инструментом для визуализации внутренней структуры системы и анализа типов отношений между её элементами.

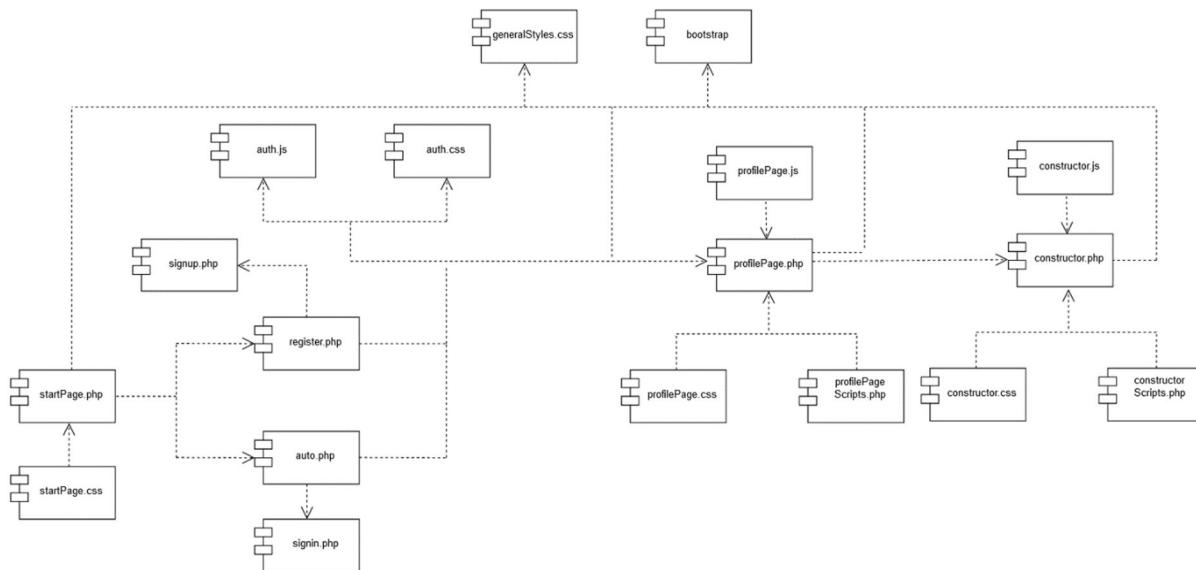
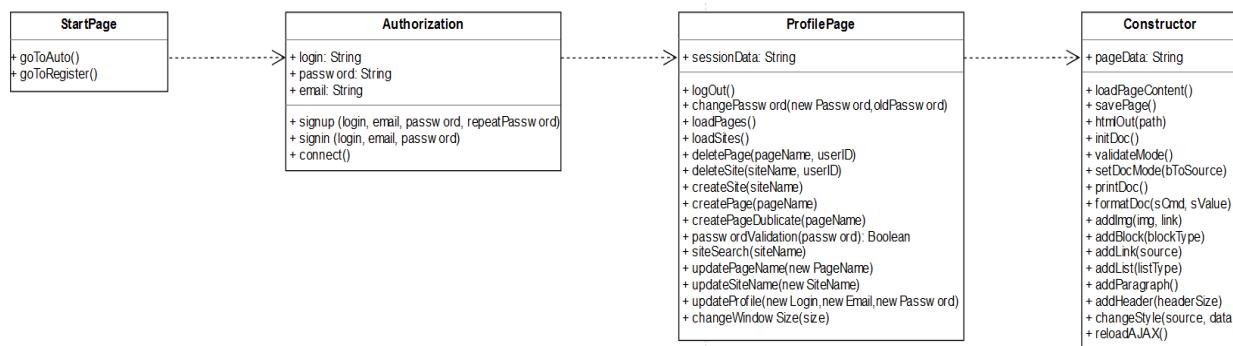
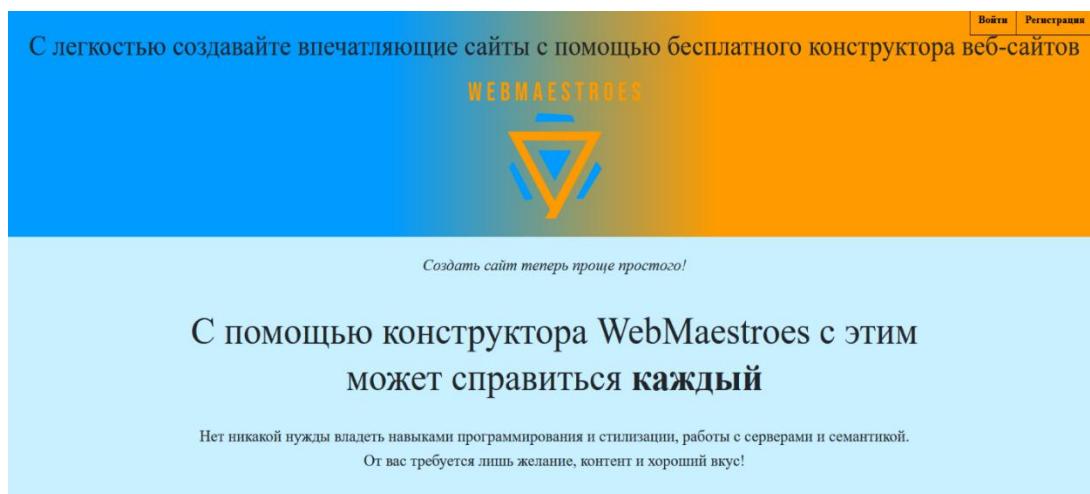
Результаты и их обсуждение

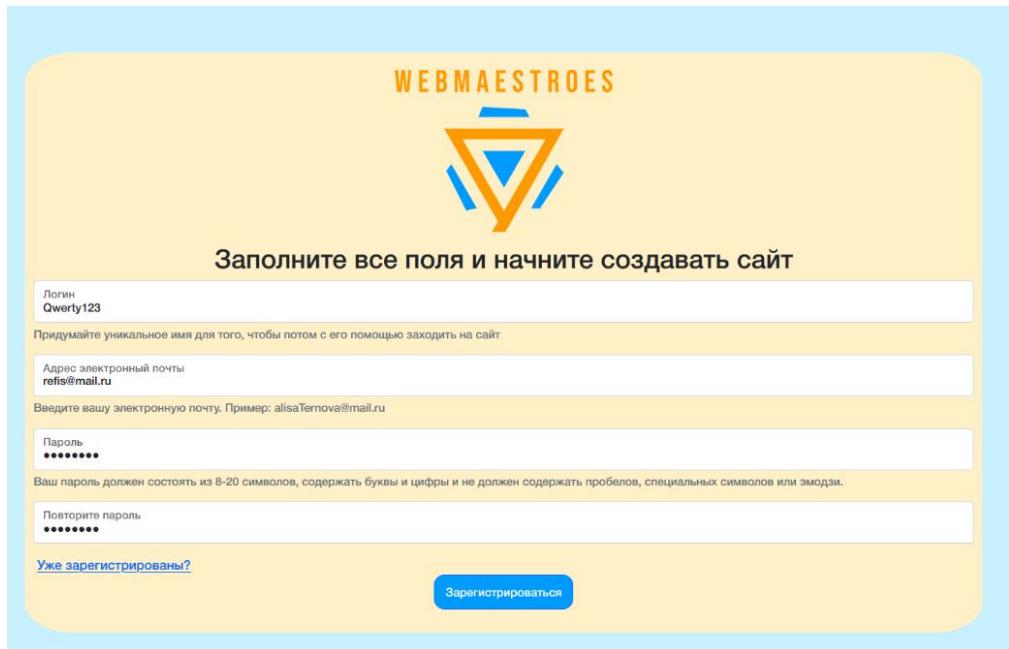
Разработанная система тестировалась с использованием подходов, описанных в источниках [16-18].

При посещении веб-сайта пользователь перенаправляется на начальную страницу (рис. 4), где ему предоставляется возможность зарегистрироваться или авторизоваться.

После того, как клиент нажмет на кнопку Войти, произойдет переход на страницу авторизации (рис. 5) или, если нажмет на кнопку Регистрация, на страницу регистрации (рис. 6).

¹ METANIT.COM - Сайт о программировании: образовательная платформа: сайт. СПб., 2021. URL: <https://metanit.com/sharp/monogame/1.1.php>

**Рис. 2. Диаграмма компонентов системы****Fig. 2. Diagram of the components of the system****Рис. 3. Диаграмма классов системы****Fig. 3. Class diagram****Рис. 4. Начальная страница****Fig. 4. Start page**

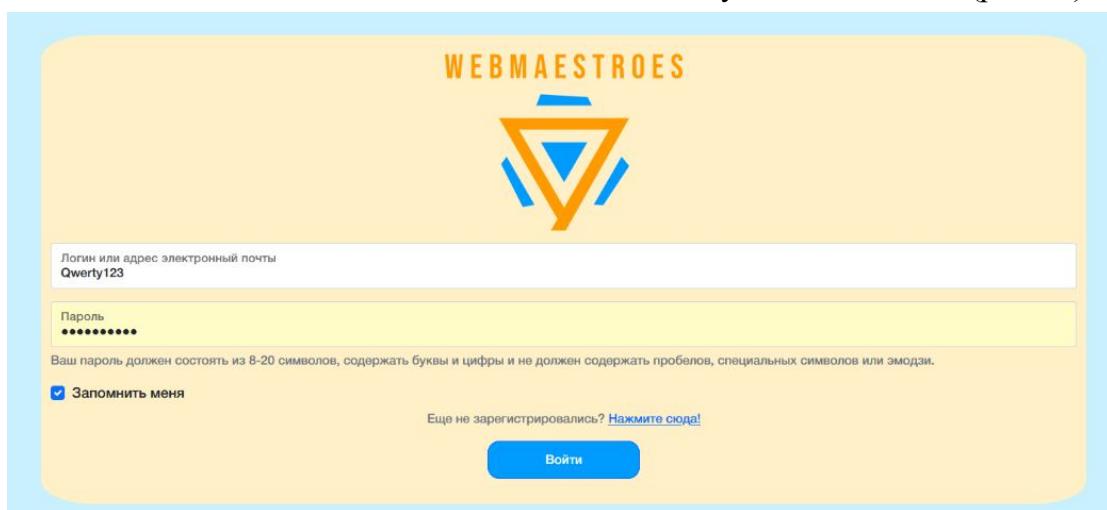
**Рис. 5.** Страница авторизации**Fig. 5.** Authorization page

Заполнив форму, клиент переходит на страницу своего профиля (рис. 7). Отсюда он может управлять созданными сайтами – удалять их, менять, заходить в конструктор, создавать.

При попытке настроить каждый из сайтов путем нажатия на шестеренку пользователь переходит на страницу на-

строек сайта (рис. 8), набор связанных друг с другом страниц.

После нажатия на панель настроек пользователь может зайти в режим конструктора (рис. 9). Отсюда возможны разные манипуляции со страницей. К примеру, изменение положения блока и фона (рис. 10), изменение текста (рис. 11), создание дубликатов блоков (рис. 12).

**Рис. 6.** Страница регистрации**Fig. 6.** Registration page

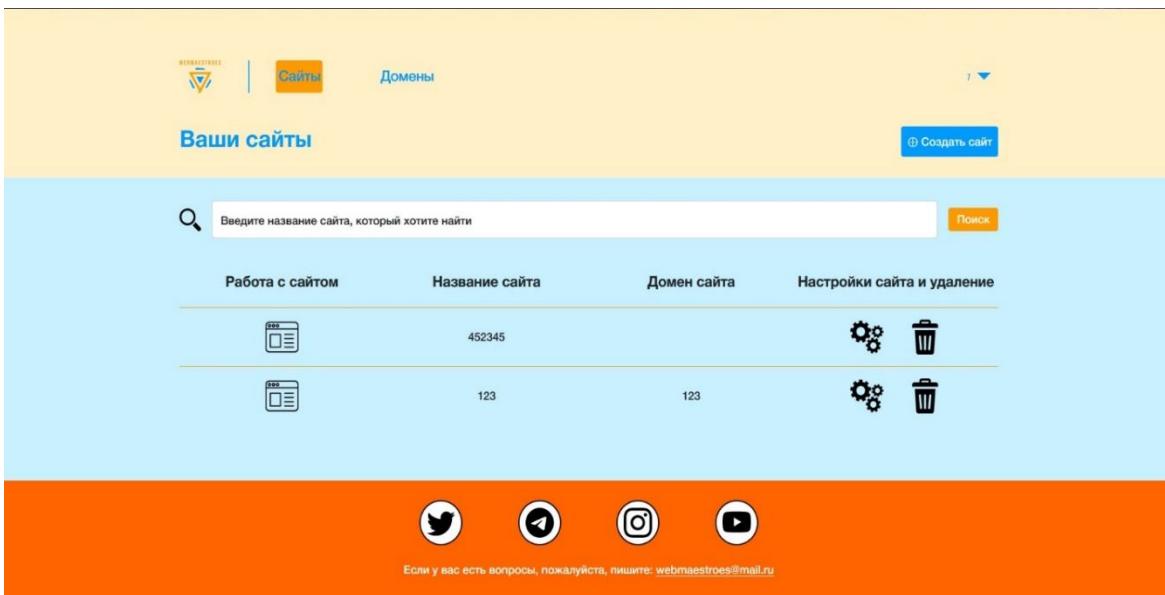


Рис. 7. Страница профиля

Fig. 7. Profile page

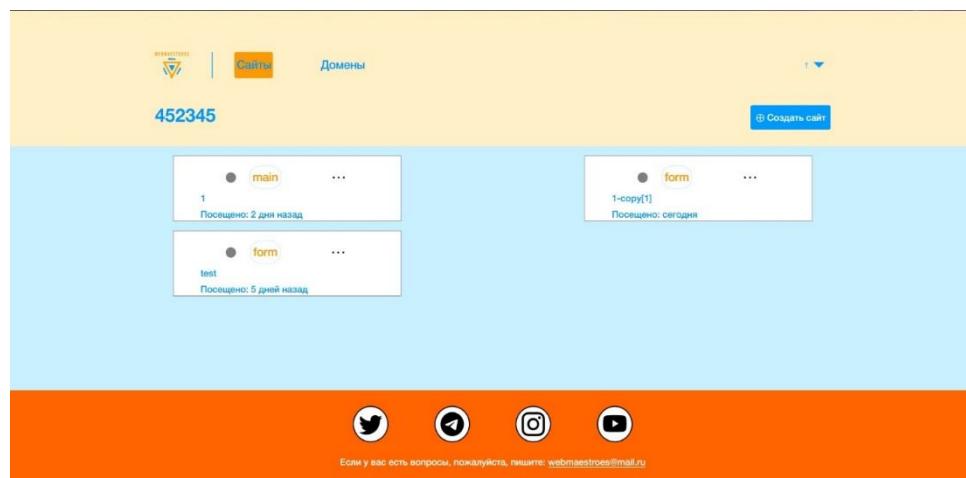


Рис. 8. Страница сайта

Fig. 8. Site page

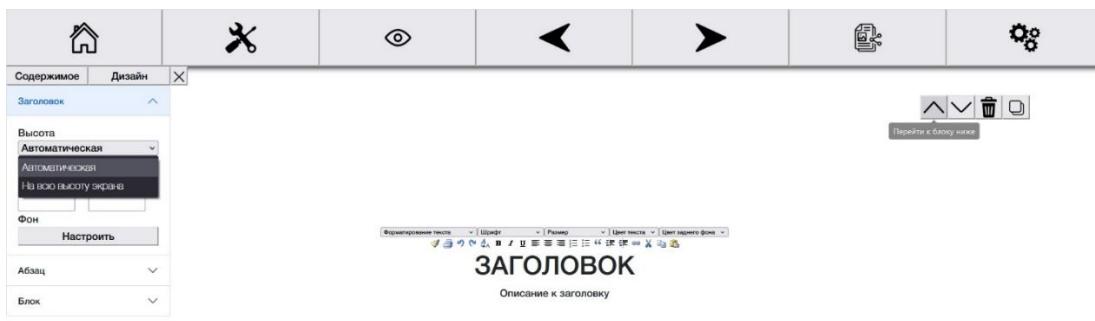


Рис. 9. Страница конструктора

Fig. 9. Constructor page

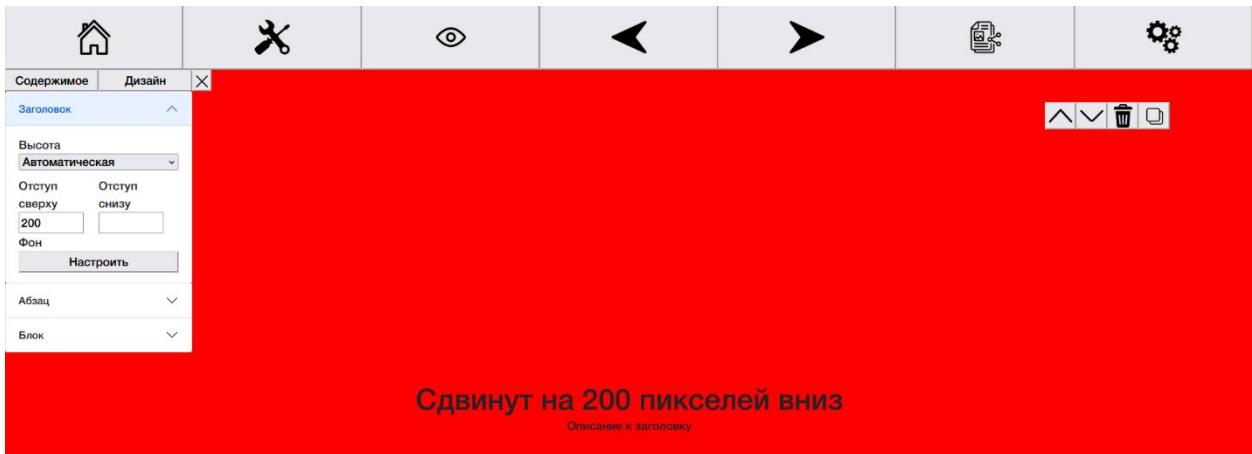


Рис. 10. Пример смены стилизации

Fig. 10. Style change example

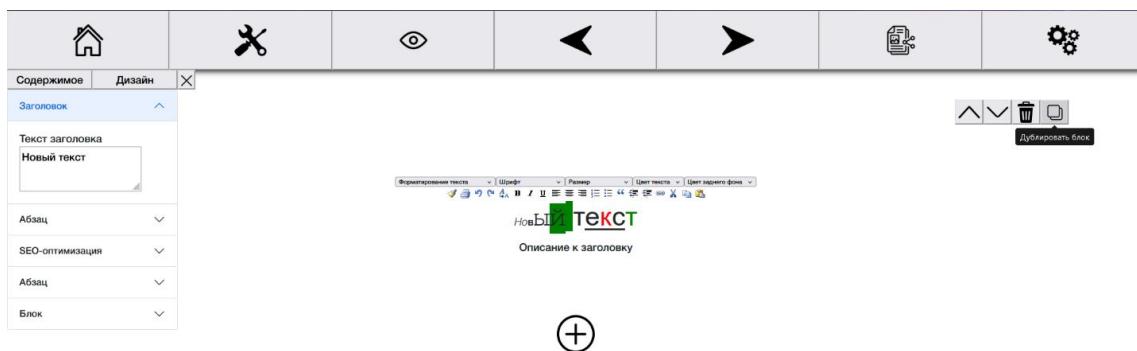


Рис. 11. Пример изменения текста

Fig. 11. Text change example

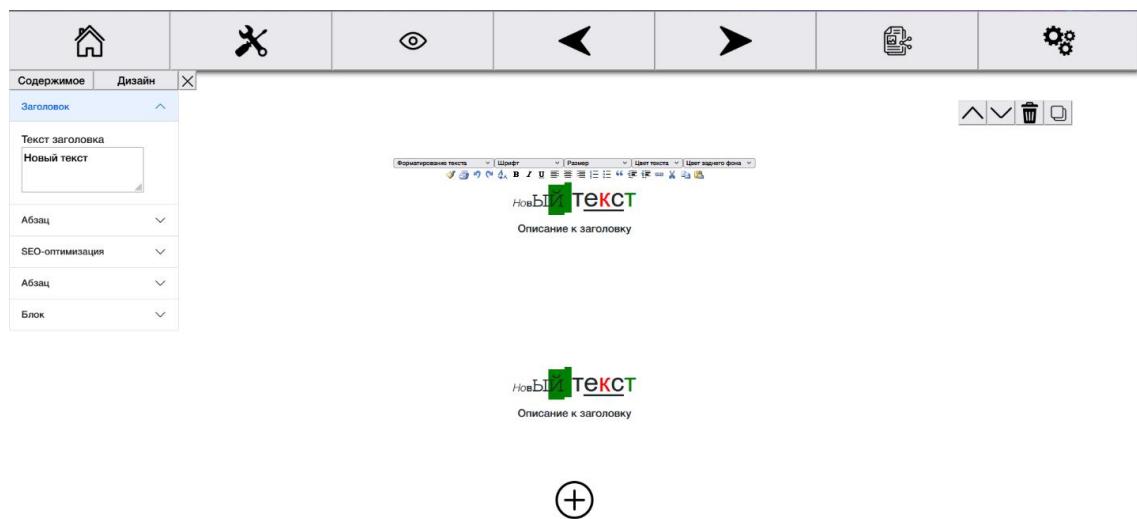


Рис. 12. Пример создания блока-копии

Fig. 12. Example of creatign block-copy

Выводы

Разработана, реализована и протестирована система разработки веб-сайтов. В ходе тестирования была проанализирована работа конструктора в различных условиях, также протестирована работоспособность конструктора при реализации всех предоставляемых функций. В итоге были сделаны выводы о стабиль-

ности и готовности программно-информационной системы к внедрению. Созданный конструктор веб-сайтов может быть использован широким кругом пользователей.

Разработанный конструктор может быть использован в том числе в образовательных целях, например, для создания ресурсов, описанных в [19, 20].

Список литературы

1. Мартин Р. Идеальный программист: как стать профессионалом разработки ПО. СПб.: Питер, 2021. 224 с.
2. Мартин Р. Чистая архитектура. Искусство разработки программного обеспечения / пер. с англ. А. Кисилева. СПб.: Питер, 2018. 351 с.
3. Назаров С. В. Архитектура и проектирование программных систем. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ИНФРА-М, 2020. 374 с. URL: <https://znanium.com/catalog/product/1093643>
4. Приемы объектно-ориентированного проектирования / Э. Гамма, Р. Хелм, Р. Джонсон, Дж. Влиссивус. СПб.: Питер, 2017. 368 с.
5. Рудаков А.В., Федорова Г.Н. Технология разработки программных продуктов. М.: Издательский центр «Академия», 2016. 192 с.
6. Печенкин Г. SQL для непрограммистов. Мытищи, 2016. 149 с.
7. Кляйн К., Кляйн Д., Хант Б. SQL. Справочник. СПб.: Символ-Плюс, 2012. 656 с.
8. Бьюли А. Изучаем SQL. СПб.: Символ-Плюс, 2017. 312 с.
9. Люк Веллинг, Лора Томсон Разработка веб-приложений с помощью PHP и MySQL. М.: Вильямс, 2013. 848 с.
10. Мюллер Р.Д. Проектирование баз данных и UML / пер. с англ. Е.Н. Молодцова. М.: Лори, 2013. 420 с.
11. Иванова Г. С. , Ничушкина Т. Н. Проектирование программного обеспечения. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 102 с.
12. Вайсфельд М. Объектно-ориентированное мышление: пер. с англ. В. Черник; под ред. Д. Виницкий. СПб.: Питер, 2014. 304 с.
13. Иванова Г. С. Технология программирования. М.: КноРус, 2018. 336 с.
14. Арлоу Д., Нейштадт А. UML 2 и Унифицированный процесс. Практический объектно-ориентированный анализ и проектирование / пер. с англ. Н. Шатохиной; под ред. А. Петухова. СПб.: Символ-Плюс, 2007. 642 с.
15. Пайлон Д. UML 2 для программистов. СПб.: Питер, 2012. 240 с.
16. Блек Р. Ключевые процессы тестирования. Планирование, подготовка, проведение, совершенствование. М.: Лори, 2014. 544 с.

17. Тамре Л. Введение в тестирование программного обеспечения / пер. с англ. В. В. Марченко; под ред. А. В. Слепцова. М.: Издательский дом «Вильямс», 2002. 368 с.
18. Агальцов В.П. Базы данных. Локальные базы данных. М.: ИД ФОРУМ, НИЦ ИНФРА-М, 2016. 352 с.
19. Разработка концепции информационной системы построения информационно-образовательного мультимедийного интерактивного пространства / В.И. Шнырков, И.Н. Ефремова, В.В. Ефремов, Н.Н. Бочanova // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2012. №2-3. С.16-19.
20. Структура информационной системы построения информационно-образовательного мультимедийного интерактивного пространства / В.И. Шнырков, И.Н. Ефремова, В.В. Ефремов, Е.И. Аникина // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2012. № 2-3. С. 46-49.

References

1. Martin R. The ideal programmer: how to become a software development professional. St. Petersburg: Piter; 2021. 224 p. (In Russ.).
2. Martin R. Pure architecture. The art of software development. St. Petersburg: Piter; 2018. 351 p. (In Russ.).
3. Nazarov S. V. Architecture and design of software systems. 2nd ed. Moscow: INFRA-M; 2020. 374 p. (In Russ.). Available at: <https://znanium.com/catalog/product/1093643>.
4. Gamma E., Helm R., Johnson R., Vlissivus J. Methods of object-oriented design. St. Petersburg: Peter; 2017. 368 p. (In Russ.).
5. Rudakov A.V., Fedorov G.N. Technology for developing software products. Moscow: Izdatel'skii tsentr «Akademiya»; 2016. 192 p. (In Russ.).
6. Pechenkin G. SQL for non-programmers. Mytishchi; 2016. 149 p. (In Russ.).
7. Klein K., Klein D., Hunt B. SQL. Reference book. St. Petersburg: Symbol-Plus; 2012. 656 p. (In Russ.).
8. Bewley A. Learning SQL. St. Petersburg: Symbol-Plus; 2017. 312 p. (In Russ.).
9. Welling Luke, Thomson Laura Developing web applications with PHP and MySQL. Moscow: Williams; 2013. 848 p. (In Russ.).
10. Muller R.D. Database design and UML. Moscow: Lori; 2013. 420 p. (In Russ.).
11. Ivanova G. S., Nichushkina T. N. Software design: study guide. Moscow: MGTU im. N. E. Baumana; 2002. 102 p. (In Russ.).
12. Weisfeld M. Object-oriented thinking. St. Petersburg: Peter; 2014. 304 p. (In Russ.).
13. Ivanova G. S. Programming technology. Moscow: KnoRus; 2018. 336 p. (In Russ.).
14. Arlow D., Neishtadt A. UML 2 and the Unified Process. Practical object-oriented analysis and design. St. Petersburg: Symbol-Plus; 2007. 642 p. (In Russ.).

15. Pylon D. UML 2 for programmers. St. Petersburg: Peter; 2012. 240 p. (In Russ.).
16. Black R. Key testing processes. Planning, preparation, implementation, improvement. Moscow: Lori; 2014. 544 p. (In Russ.).
17. Tamre L. Introduction to software testing. Moscow: Izdatel'skii dom «Vil'yams»; 2002. 368 p. (In Russ.).
18. Agaltsov V.P. Database. Local databases. Moscow: ID FORUM, NIC INFRA-M; 2016. 352 p. (In Russ.).
19. Shnyrkov V.I., Efremova I.N., Efremov V.V., Bochanova N.N. Development of the concept of an information system for building an information and educational multimedia interactive space. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoе priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2012; (2-3): 16-19. (In Russ.).
20. Shnyrkov V.I., Efremova I.N., Efremov V.V., Anikina E.I. Structure of the information system for building an information and educational multimedia interactive space. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoе priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2012; (2-3): pp. 46-49. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Ефремова Ирина Николаевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: efremova-in@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5644-2674>

Петрик Елена Анатольевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: petrik.ea@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9296-4047>

Кириллов Александр Михайлович, студент, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: alexkir@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6312-8691>

Irina N. Efremova, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Software Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: efremova-in@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5644-2674>

Elena A. Petrik, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Software Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: petrik.ea@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9296-4047>

Alexander M. Kirillov, Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: alexkir@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6312-8691>

Оригинальная статья / Original article

УДК 681.3.06

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-182-192>



Адаптивные нечеткие когнитивные карты с гибридной оптимизацией для прогнозирования продаж в условиях рыночной волатильности

А.С. Сизов¹, Ю.А. Халин¹✉, А.А. Белых¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российской Федерации

✉ e-mail: yur-khalin@yandex.ru

Резюме

Цель работы. Разработка и валидация методики адаптивных НКК с гибридной оптимизацией весов и динамической коррекцией функций принадлежности для нестабильных рынков.

Методы. Методология включает предложение трехуровневой архитектуры НКК (5 входов, 4 скрытых узла, 3 выхода), инициализированной методом Саати с коэффициентом согласованности $CR=0.038$; гибридную оптимизацию весов, сочетающую алгоритм роя частиц (PSO) и адаптивную регуляризацию; а также ежеквартальную адаптацию трапециевидных функций принадлежности на основе потоковой кластеризации методом Streaming C-means и слаживания экспоненциальным взвешиванием (EMA).

Результаты. Результаты тестирования на данных розничной сети N (временной охват 62 недели, 345 наблюдений) показали: высокую точность прогнозирования с MAPE 7.2% (95% доверительный интервал [6.8; 7.6]), что статистически значимо ниже ($p<0.01$) ошибок моделей LSTM (9.8%) и статической НКК (15.8%), и сопоставимо с точностью XGBoost (7.8%, $p=0.12$), при этом адаптивная НКК обеспечивает превосходство в интерпретируемости каузальных связей (например, вес влияния маркетингового бюджета на объем продаж $w_{11}=0.78\pm 0.05$); повышенную робастность, выразившуюся в меньшем приросте ошибки прогноза в шоковый период марта (+49.2% для адаптивной НКК против +86.9% для LSTM); и значительную экономическую эффективность, подтвержденную результатами внедрения в ERP-систему: снижение логистических издержек на 15.2% (абсолютная экономия 5.1 млн руб.), сокращение оборачиваемости запасов с 18.3 до 15.1 дней, квартальный ROI 287.5% и расчетная чистая приведенная стоимость (NPV) проекта 9.2 млн руб. (95% ДИ [8.1; 10.3]).

Заключение. Разработанная методология обеспечивает высокоточное, интерпретируемое и робастное прогнозирование продаж в нестабильных рыночных условиях, доказав свою практическую эффективность и экономическую целесообразность. Перспективные направления развития включают автоматизацию построения карт с использованием GAN, ускорение вычислений за счет реализации на CUDA и интеграцию с графовыми нейронными сетями (GNN).

Ключевые слова: адаптивные нечеткие когнитивные карты; прогнозирование продаж; рыночная волатильность; гибридная оптимизация; динамические функции принадлежности; потоковая кластеризация; розничная аналитика; потребительская лояльность; эмоциональная вовлеченность.

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

Для цитирования: Сизов А.С., Халин Ю.А., Белых А.А. Адаптивные нечеткие когнитивные карты с гибридной оптимизацией для прогнозирования продаж в условиях рыночной волатильности // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(3): 182-192. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-182-192>.

Поступила в редакцию 10.06.2025

Подписана в печать 04.07.2025

Опубликована 30.09.2025

Adaptive fuzzy cognitive maps with hybrid optimization for predicting sales in conditions of market volatility

Alexander S. Sizov¹, Yuri A. Khalin¹✉, Alexander A. Belykh¹

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

✉ e-mail: yur-khalin@yandex.ru

Abstract

Purpose. Development and validation of the adaptive NCC methodology with hybrid weight optimization and dynamic correction of membership functions for unstable markets.

Methods. The methodology includes a proposal for a three-level NCC architecture (5 inputs, 4 hidden nodes, 3 outputs) initialized by the Saaty method with a consistency ratio of CR=0.038; hybrid weight optimization combining the particle swarm algorithm (PSO) and adaptive regularization; and quarterly adaptation of trapezoidal membership functions based on streaming clustering using Streaming C-means and exponential smoothing (EMA).

Results. The results of testing on data from the retail chain N (time span of 62 weeks, 345 observations) showed: high prediction accuracy with MAPE 7.2% (95% confidence interval [6.8;7.6]), which is statistically significantly lower ($p<0.01$) than the errors of the LSTM (9.8%) and static NCC (15.8%) models, and is comparable to the accuracy of XGBoost (7.8%, $p=0.12$), while adaptive NCC provides superiority in the interpretability of causal relationships (for example, the weight of the marketing budget's impact on sales $w_{11}=0.78\pm 0.05$); increased robustness, resulting in a smaller increase in forecast error during the March shock period (+49.2% for adaptive NCC versus +86.9% for LSTM); and significant economic efficiency, confirmed by the results of implementation in the ERP system: reduction of logistics costs by 15.2% (absolute savings of 5.1 million rubles), reduction of inventory turnover from 18.3 to 15.1 days, quarterly ROI of 287.5% and estimated net present value (NPV) of the project 9.2 million rubles (95% CI [8.1;10.3]).

Conclusion. The developed methodology provides highly accurate, interpretable, and robust sales forecasting in unstable market conditions, proving its practical effectiveness and economic feasibility. Promising areas of development include the automation of map construction using GANs, the acceleration of calculations through CUDA implementation, and the integration with graph neural networks (GNN).

Keywords: adaptive fuzzy cognitive maps; sales forecasting; market volatility; hybrid optimization; dynamic membership functions; streaming clustering; retail analytics; consumer loyalty; emotional engagement.

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

For citation. Sizov A.S., Khalin Y. A., Belykh A. A. Adaptive fuzzy cognitive maps with hybrid optimization for predicting sales in conditions of market volatility. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(3): 182-192 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-182-192>.

Received 10.06.2025

Accepted 04.07.2025

Published 30.09.2025

Введение

Прогнозирование продаж в условиях высокой рыночной волатильности требует учета слабоформализуемых факторов, включая нелинейную динамику спроса, ценовую эластичность и макроэкономические колебания. Согласно исследованиям McKinsey Global Institute (2023), традиционные методы (ARIMA, регрессионный анализ) демонстрируют среднюю абсолютную процентную ошибку (MAPE) 12–18% в сегменте электронной коммерции при инфляционных шоках [1], что ведет к значительным операционным потерям из-за дисбаланса спроса и предложения. Особую сложность представляют "шоковые" сценарии (санкции, сырьевые кризисы), где когнитивные искажения потребителей искажают исторические паттерны [2, 3]. Нечеткие когнитивные карты (НКК), введенные в научный оборот Кошко [4], формируют теоретический базис для моделирования сложных причинно-следственных систем. Однако их практическая реализация сталкивается с двумя принципиальными ограничениями: во-первых, субъективностью определения весов связей (w_{ji}), обусловленной зависимостью от экспертных оценок [5]; во-вторых, статичностью функций принадлежности, неспособных адаптироваться к динамике рыночной среды [2, 6]. Предлагаемая методология преодолевает указанные барьеры посредством синтеза гибридного машинно-экспертного обучения и механизма потоко-

вой адаптации параметров к рыночным аномалиям [7, 8].

Материалы и методы

Исследование базируется на данных, предоставленных российской розничной сетью «N» (на условиях конфиденциальности), специализирующейся на продаже бытовой электроники и цифровой техники. Сеть объединяет 23 магазина в городах с населением свыше 500 тыс. человек [9, 10].

Первичным источником послужили операционные данные ERP-системы сети за период с 1 января 2024 г. по 31 марта 2025 г. (65 полных календарных недели), включающие [11]:

- Ежедневные данные о продажах в денежном и натуральном выражении в разрезе товарных категорий (SKU).
- Данные об остатках товаров на складах и в торговых залах.
- Внутренние данные о маркетинговой активности и бюджетах.
- Транзакционные данные, позволяющие идентифицировать повторные покупки.

Для учета макроэкономического контекста и внешних факторов были привлечены официальные данные Росстата [12]:

- Индекс потребительских цен (ИПЦ).
- Индекс деловой активности в сфере услуг.

Дополнительным источником стали данные из социальных медиа (Twitter, VKontakte, Telegram), агрегированные с использованием API сервиса Brand Analy-

tics, для оценки медиаактивности и тональности обсуждений бренда [13, 14].

После интеграции и очистки был сформирован панельный набор данных, включающий 345 уникальных наблюдений (временных срезов). Препроцессинг данных включал:

Нормализацию: методом RobustScaler для устойчивости к выбросам.

Импутацию пропущенных значений: с помощью итеративного метода MICE (Multiple Imputation by Chained Equations).

Операционализацию латентных переменных:

- Лояльность (H_2): интегральная метрика на основе NPS-опросов и данных о частоте повторных покупок.

- Эмоциональная вовлеченность (H_4): оценка тональности текстов онлайн- отзывов и обсуждений с помощью предобученной языковой модели BERT.

Для количественной оценки эффективности предложенной методики был проведен сравнительный анализ с современными методами прогнозирования [15, 16].

Статическая НКК: Базовая версия нечеткой когнитивной карты с весами, инициализированными экспертами, и фиксированными функциями принадлежности. Выступает в качестве бейзлайна для оценки вклада адаптивности.

XGBoost (Extreme Gradient Boosting): Современный алгоритм машинного обучения, известный высокой точностью в задачах табличных данных. Служит эталоном по предиктивной мощности.

LSTM (Long Short-Term Memory):

Рекуррентная нейронная сеть, предназначенная для работы с временными рядами. Выступает в качестве эталона для учета временных зависимостей.

Критериями сравнения были выбраны: средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE), среднеквадратичная ошибка (RMSE), робастность к шокам (прирост ошибки в волатильный период) и интерпретируемость модели.

Нечеткая когнитивная карта представляет собой ориентированный взвешенный граф, где узлы – это концепты (переменные системы), а дуги – причинно-следственные связи между ними [17, 18]. Алгоритм прогнозирования на основе НКК заключается в итеративном пересчете значений концептов по формуле

$$C_i(t+1) = f(\sum w_{ji} \cdot C_j(t)),$$

где $C_i(t+1)$ – значение i -го концепта в момент времени $t+1$, w_{ji} – вес влияния концепта j на концепт i , f – функция активации (в данной работе – сигмоидальная).

Таким образом, процесс прогнозирования является итеративной симуляцией системы: задавая значения входных концептов (например, маркетинговый бюджет, цена конкурентов) на будущий период, модель рассчитывает значения выходных концептов (объем продаж), учитывая все причинно-следственные петли и нелинейные преобразования.

Модель реализует трехуровневую иерархию (рис. 1):

Входы (5): Маркетинговый бюджет (X_1), Цена конкурентов (X_2), Сезонность (X_3), Индекс потребительских цен (X_4), Индекс социальной активности (X_5).

Скрытые узлы (4): Узнаваемость бренда (H_1), Лояльность (H_2), Ценовая привлекательность (H_3), Эмоциональная вовлеченность (H_4).

Выходы (3): Объем продаж (Y_1), Доля рынка (Y_2), Рентабельность (Y_3).

Обоснование архитектуры: Выбор узлов основан на анализе 32 факторов влияния методом главных компонент (PCA) с кумулятивной дисперсией 85.7%. Иерархия отражает цепочку ценообразования "маркетинг → восприятие → конверсия".

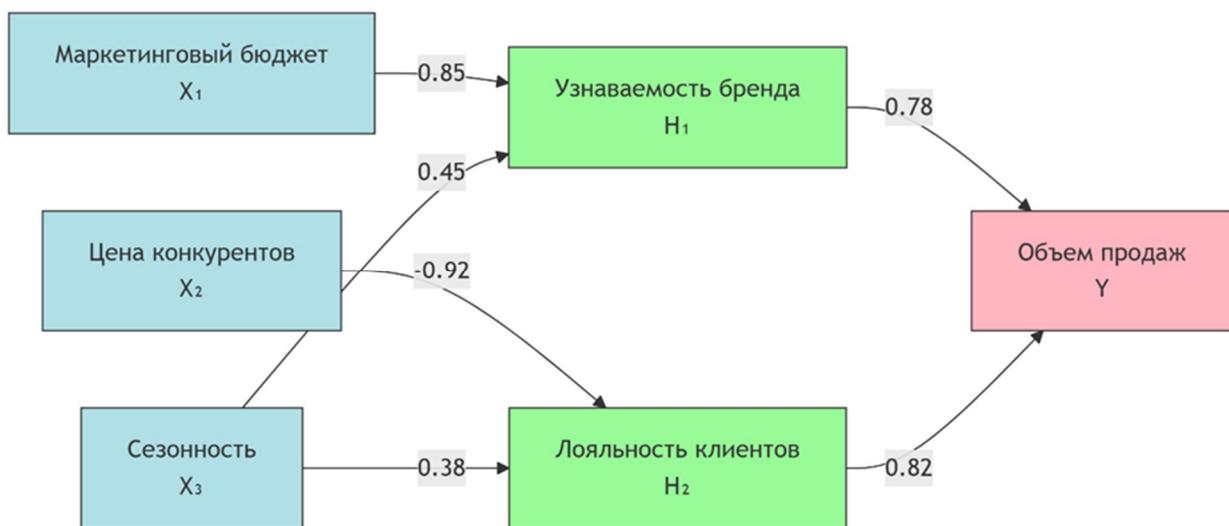


Рис. 1. Архитектура НКК для прогнозирования продаж

Fig. 1. NCC architecture for sales forecasting

Матрица весов W (12×12) инициализирована методом Саати:

Шкала сравнений: 9-балльная (от 1/"равнозначность" до 9/"абсолютное превосходство")

Эксперты: 10 специалистов с опытом >5 лет в FMCG

Согласованность: CR=0.038 (CI=0.032–0.044, $\alpha=0.05$) < порога 0.1 [19]

Далее применяется гибридный алгоритм оптимизации весов для минимизации ошибки прогноза на исторических данных.

```

python
def hybrid_weights_optimization(W_expert, X, Y_actual):
    # Шаг 1: PSO-оптимизация
    pso = PSO(objective=MSE,
               n_particles=50, bounds=[-2,2],
               omega=0.729 (инерция [10]),
               c1=1.5 (коэффициент), c2=1.7 (социальный))
    W_pso =
    pso.optimize(max_iter=200, tol=0.001)
    # Шаг 2: Адаптивная регуляризация
    alpha = 0.7 # Коэффициент доверия к данным (калиброван на Валидации. Выборке)
  
```

```

W_hybrid = α * W_pso + (1-α)
* W_expert
    return W_hybrid

```

Обоснование параметров PSO: Значения ω , c_1 , c_2 выбраны на основе метаанализа [20], обеспечивая баланс между исследованием пространства (exploration) и использованием знаний (exploitation). Критерий остановки: $|\Delta g_{best}| < 0.001$ за 50 итераций.

Алгоритм адаптации:

Кластеризация транзакций: Streaming C-means ($c=3$, валидация индексом Xie-Beni [19]).

Расчет параметров трапециидальной функции:

$a = 5\%$ -й квантиль кластера "Низкий";
 $b = 25\%$ -й квантиль кластера "Средний";
 $c = 75\%$ -й квантиль кластера "Средний";
 $d = 95\%$ -й квантиль кластера "Высокий".

Стабилизация: Сглаживание параметров методом экспоненциального взвешивания (EMA, $\beta=0.6$)

Результаты и их обсуждение

Сравнительный анализ прогностической точности выявил статистически значимое превосходство предложенной адаптивной НКК над альтернативными подходами (табл. 1).

Таблица 1. Ошибки прогнозирования (95% доверительные интервалы)

Table 1. Prediction errors (95% confidence intervals)

Метод / Method	MAPE, %	CI(MAPE)	RMSE	CI(RMSE)
Адапт. НКК	7.2	[6.8;7.6]	112.5	[108;117]
LSTM	9.8*	[9.3;10.3]	146.7*	[141;152]
XGBoost	7.8	[7.4;8.2]	119.8	[115;124]
Стат. НКК	15.8*	[15.2;16.4]	227.6*	[220;235]
*Стат. значимость различий с адапт. НКК (t-test, $p < 0.01$)				

Адаптивная НКК продемонстрировала существенно более высокую точность по сравнению с моделью LSTM ($p\text{-value} = 0.003$, Cohen's $d = 1.25$) и статической НКК ($p\text{-value} < 0.001$, Cohen's $d = 2.1$). Хотя разница в средней точности прогноза между адаптивной НКК и алгоритмом XGBoost не достигла общепринятого уровня статистической значимости ($p\text{-value} = 0.12$), принципиальным

преимуществом адаптивной НКК является ее высокая интерпретируемость. Модель предоставляет прозрачные оценки силы и направления влияния факторов, выраженные, например, в весовом коэффициенте $w_{11} = 0.78 \pm 0.05$ (доверительный интервал 95%) для воздействия фактора X_1 на целевую переменную Y_1 , что невозможно получить из "черного ящика" бустинговых моделей.

Устойчивость адаптивной НКК к экзогенным шокам была убедительно продемонстрирована в период повышенной рыночной волатильности в марте. В то время как ошибка прогноза модели LSTM возросла на 86.9% относительно базового уровня, адаптивная НКК показала значительно меньший прирост ошибки – лишь 49.2%. Эта повышенная рабочая способность является прямым следствием способности модели динамически адаптировать свои параметры.

Внедрение методики в ERP-систему розничной сети N подтвердило ее экономическую эффективность:

- Снижение логистических издержек на 15.2% (абсолютная экономия 5.1 млн руб.).
- Сокращение оборачиваемости запасов с 18.3 до 15.1 дней.
- Квартальный ROI 287.5%.
- Расчетная чистая приведенная стоимость (NPV) проекта 9.2 млн руб. (95% ДИ [8.1;10.3]).

Выводы

Разработанная методология адаптивных нечетких когнитивных карт преодолевает ключевое ограничение статических аналогов – ригидность параметров в динамической среде. Эмпирическая валидация подтвердила ее статистически значимое превосходство в точности прогнозирования (MAPE 7.2%) над моделями LSTM ($p=0.003$) и статическими НКК, а также сопоставимую с XGBoost эффективность ($p=0.12$), дополненную уникальной интерпретируемостью каузальных связей. Методология доказала повышенную устойчивость к волатильности и значительную экономическую эффективность. Перспективные направления развития включают автоматизацию построения карт с использованием генеративно-состязательных сетей (GAN), ускорение вычислений за счет реализации на CUDA и интеграцию с графовыми нейронными сетями (GNN) для создания когнитивных цифровых двойников ритейл-сетей.

Список литературы

1. Исторические структурные особенности регулирования финансовых обязательств / Х. С. Асатуллаев, З. А. Арсаханова, Е. С. Азарова, Н. В. Кучковская // Вопросы истории. 2021. № 6-2. С. 82–86. DOI: 10.31166/VoprosyIstorii202106Statyi32.
2. Исторические аспекты реализации влияний политических движений на экономическую среду в посткоммунистических странах / О. Т. Астанакулов, А. М. Гачаев, М. У. Яхьяева, Н. В. Кучковская // Вопросы истории. 2021. № 4-2. С. 66–75. DOI: 10.31166/VoprosyIstorii202104Statyi70.
3. Историческое формирование модели экономической безопасности государства / М. Г. Успаева, А. М. Гачаев, Н. В. Кучковская, В. Ф. Васюков // Вопросы истории. 2021. № 12-4. С. 95–102. DOI: 10.31166/VoprosyIstorii202112Statyi101.

4. Кибермошенничество: информационная угроза прошлого, настоящего и будущего / В. Ф. Васюков, А. А. Бисултанова, Н. В. Кучковская, А. Н. Першин // Вопросы истории. 2021. № 11-3. С. 275–281. DOI: 10.31166/VoprosyIstorii202111Statyi83.
5. Герасименко В. В., Куркова Д. Н., Курбацкий А. Н. Внедрение технологий искусственного интеллекта в маркетинг российских компаний: перспективы и барьеры // Российский журнал менеджмента. 2024. № 3. С. 483–508.
6. Герасименко В. В., Курбацкий А. Н., Куркова Д. Н. Цифровизация рыночных взаимодействий российских предприятий // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. 2023. Т. 39, № 4. С. 534–559. DOI: 10.21638/spbu05.2023.404.
7. Дейнекин Т. В. Искусственный интеллект в маркетинге // Маркетинг в России и за рубежом. 2019. № 2. С. 33–38.
8. Какурина А.В., Сизов А.С., Халин Ю.А. Когнитивное моделирование и прогнозирование потребления электроэнергии // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023. Т. 27, № 4. С. 44–61. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-4-44-61>.
9. Лапидус Л. В. Вызовы цифровой экономики как триггеры цифровой трансформации: эволюционная шкала и причинно-следственные связи // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2023. № 3. С. 11–27.
10. Молодчик М. А., Гагарин А. С., Елтышев Р. А. Цифровой образ компании и ее стоимость // Российский журнал менеджмента. 2023. Т. 21, № 1. С. 5–22. DOI: 10.21638/spbu05.2023.101.
11. Шутько Л. Г. Конкурентные преимущества виртуальных организаций и конкурентная среда "новой экономики" России // Современные тенденции и инновации в науке и производстве: материалы X международной научно-практической конференции, г. Междуреченск, 22 апреля 2021 года. Междуреченск: КузГТУ имени Т. Ф. Горбачева, 2021. С. 280.1–280.6.
12. Стратегия цифровой трансформации: написать, чтобы выполнить / под ред. Е. Г. Потаповой, П. М. Потеева, М. С. Шклярук. М.: РАНХиГС, 2021. 184 с.
13. Зуб А. Т. Стратегический менеджмент. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство Юрайт, 2021. 375 с.
14. Development of Organizational and Economic Mechanism of Functioning High-Tech Enterprises in the Introduction of Digital Technologies / M. G. Uspaeva, S. A. Tronin, R. A. Abramov, Y. M. Potanina // International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology. 2022. Vol. 12, no. 1. P. 131–136. DOI: 10.18517/ijaseit.12.1.9988.
15. Федулов А.С. Нечеткие реляционные когнитивные карты // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2005. №1. С. 120-132.
16. Фишберг Питер С. Теория полезности для принятия решений / пер. с англ. В.Н. Воробьёва и А.Я Кирути; под ред. Н.Н.Воробьёва. М.: Наука, 1978. 352с.

17. Формализация описания неопределённости в информационных системах на основе теории нечётких множеств / С. В. Дегтярев, Ю. А. Халин, Л. А. Лисицин, В. Е. Старков // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013. Т. 11, № 8. С. 66-69. EDN QZFZVR.
18. Халин Ю.А., Афанасьев А.А., Кудинов В.А. Разработка онтологической модели предметной области для обработки данных корпоративных хранилищ // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №2. С. 114-133. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-114-133>
19. Клиентоцентричный подход в государственном управлении: Навигатор цифровой трансформации / под ред. О. В. Линник, А. В. Ожаровского, М. С. Шклярук. М.: РАНХиГС при Президенте РФ, 2020. 180 с.
20. Локтионов А. П., Ватутин Э. И. Обработка вычислительной системой зашумленных конструктивных входных данных // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №3. С. 245-264. <https://doi.org/10.21869/ 2223-1560-2024-28-3-245-264>

References

1. Asatullayev Kh. S., Arsakhanova Z. A., Azarova E. S., Kuchkovskaya N. V. Historical Structural Features of Financial Obligations Regulation. *Voprosy istorii = History issues*. 2021; (6-2): 82–86. (In Russ.). DOI: 10.31166/VoprosyIstorii202106Statyi32.
2. Astanakulov O. T., Gachaev A. M., Yakhyaeva M. U., Kuchkovskaya N. V. Astanakulov, O. T. Historical Aspects of the Implementation of the Influence of Political Movements on the Economic Environment in Post-Communist Countries. *Voprosy istorii = History issues*. 2021; (4-2): 66–75. (In Russ.). DOI: 10.31166/VoprosyIstorii202104Statyi70.
3. Uspaeva M. G., Gachaev A. M., Kuchkovskaya N. V., Vasyukov V. F. Historical Formation of the State's Economic Security Model. *Voprosy Istorii = History issues*. 2021; (12-4): 95–102. (In Russ.). DOI: 10.31166/VoprosyIstorii202112Statyi101.
4. Vasyukov V. F., Bisultanova A. A., Kuchkovskaya N. V., Pershin A. N. Cyberfraud: Information Threats of the Past, Present, and Future. *Voprosy istorii = History issues*. 2021; (11-3): 275–281. (In Russ.). DOI: 10.31166/VoprosyIstorii202111Statyi83.
5. Gerasimenko V. V., Kurkova D. N., Kurbatsky A. N. Implementation of Artificial Intelligence Technologies in the Marketing of Russian Companies: Prospects and Barriers. *Rossiiskii zhurnal menedzhmenta = Russian Management Journal*. 2024; (3): 483–508. (In Russ.).
6. Gerasimenko V. V., Kurbatsky A. N., Kurkova D. N. Digitalization of Market Interactions of Russian Enterprises. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ekonomika = Bulletin of St. Petersburg University. Economics*. 2023; 39(4): 534-559. (In Russ.). DOI: 10.21638/spbu05.2023.404.

7. Deinekin T. V. Artificial intelligence in marketing. *Marketing v Rossii i za rubezhom = Marketing in Russia and abroad*. 2019; (2): 33-38. (In Russ.).
8. Kakurina A. V., Sizov A. S., Khalin Y. A. Cognitive Modelling and Forecasting of Electricity Consumption. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(4): 44-61 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-4-44-61>
9. Lapidus L. V. Challenges of the Digital Economy as Triggers of Digital Transformation: Evolutionary Scale and Causal Relations. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii = Intelligence. Innovations. Investments*. 2023; (3): 11–27. (In Russ.).
10. Molodchik M. A., Gagarin A. S., Yeltyshев R. A. Digital Image of a Company and Its Value. *Rossiiskii zhurnal menedzhmenta = Russian Management Journal*. 2023; 21(1): 5–22. (In Russ.). DOI: 10.21638/spbu05.2023.101.
11. Shutko L. G. Competitive Advantages of Virtual Organizations and the Competitive Environment of Russia's "New Economy". In: *Sovremennye tendentsii i innovatsii v naуke i proizvodstve: materialy X mezdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Modern Trends and Innovations in Science and Production. Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference*. Mezhdurechensk: KuzGTU named after T. F. Gorbachev; 2021. P.280.1–280.6. (In Russ.).
12. Potapova E. G., Poteev P. M., Shklyaruk M. S.(eds.). Strategy of Digital Transformation: To Write to Execute. Ed. by. Moscow: RANEPA; 2021. 184 p. (In Russ.).
13. Zub A. T. Strategic Management. 4th ed. Moscow: Yurayt Publishing House; 2021. 375 p. (In Russ.).
14. Uspaeva M. G., Tronin S. A., Abramov R. A., Potanina Y. M. Development of Organizational and Economic Mechanism of Functioning High-Tech Enterprises in the Introduction of Digital Technologies. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*. 2022; 12(1): 131–136. DOI: 10.18517/ijaseit.12.1.9988.
15. Fedulov A.S. Fuzzy relational cognitive maps. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and management systems*. 2005; (1): 120-132/ (In Russ.).
16. Fishberg Peter S. The Theory of Utility for Decision-Making. Moscow: Nauka; 1978. 352 p. (In Russ.).
17. Degtyarev S. V., Khalin Yu. A., Lisitsin L. A., Starkov V. E. Formalization of the Description of Uncertainty in Information Systems Based on the Theory of Fuzzy Sets. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy = Information, Measurement, and Control Systems*. 2013; 11(8): 66-69. (In Russ.). EDN QZFZVR.
18. Khalin Y. A., Afanasyev A. A., Kudinov V. A. Development of an ontological model of the subject area for corporate storage data processing. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosu-*

darstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University. 2024; 28(2): 114-133 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-114-133>.

19. Linnik O. V., Ozharovsky A. V., Shklyaruk M. S. (eds.). Customer-centric approach in public administration: A digital transformation navigator. Moscow; 2020. 180 p. (In Russ.).
20. Loktionov A. P., Vatutin E. I. Measuring-polynomial processing of input data of a computer system. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University.* 2024; 28(3): 245-264 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-245-264>

Информация об авторах / Information about the Authors

Сизов Александр Семёнович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kafedra-ipm@mail.ru

Alexander S. Sizov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of Software Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kafedra-ipm@mail.ru

Халин Юрий Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: yur-khalin@yandex.ru

Yuri A. Khalin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Software Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: yur-khalin@yandex.ru

Белых Артём Александрович, аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: belykhartem.a@mail.ru

Artem A. Belykh, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: belykhartem.a@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.93

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-193-209>

Исследование влияния гаммы-коррекции изображения в задаче распознавания объектов на пешеходном переходе

Н. А. Милостная¹, Н. И. Янгляева¹

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

✉ e-mail: KhrapovaNI@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Повышение достоверности распознавания объектов на изображении путём исследования влияния гамма-коррекции входного изображения на качество распознавания объектов на нём.

Методы. Предварительная обработка входных изображений, полученных с помощью комплекса видеоФиксации нарушений правил дорожного движения, установленного в городе Курске, включает гамма-коррекцию, преобразования из RGB в градации серого, размытия фильтром Гаусса, выделения границ объектов на основании алгоритма Canny, классификации объектов с помощью алгоритма YOLO.

Результаты. Рассмотрены основные преимущества систем регулирования дорожного движения с адаптивным управлением. Описана структурная схема системы управления пешеходным переходом и этапы предварительной обработки входного изображения, включающие гамма-коррекцию, и их влияние на достоверность детектирования объектов. Проведён расчёт показателя Recall для количественной оценки эффективности детекции при различных значениях гамма-коррекции каждого из рассматриваемых классов: пешеходы ($Recall = 0,46$), автомобили ($Recall = 0,824$), светофоры ($Recall = 0,60$).

Заключение. Результаты серии проведённых экспериментальных исследований доказывают положительное воздействие гамма-коррекции на эффективность распознавания только некоторых классов объектов, таких как светофоры, требуя минимального значения $\gamma \approx 1,5$ (гамма 100) для начала распознавания. Детекция других рассмотренных классов, таких как пешеходы и автомобили, остаётся стабильной при любых значениях гамма из диапазона [0; 200]. Наибольшее количество обнаружений зафиксировано при гамме 20 и 80 для пешеходов и при гамме 60, 100 и 120 для автомобилей.

Ключевые слова: адаптивное управление; интеллектуальный светофор; транспортный поток; пешеходный поток; YOLO; автоматизированная система управления дорожным движением.

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

Финансирование: Работа выполнена в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» проекта «Приоритет 2030».

Для цитирования: Милостная Н. А., Янгляева Н. И. Исследование влияния гаммы-коррекции изображения в задаче распознавания объектов на пешеходном переходе // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(3): 193-209. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-193-209>.

Поступила в редакцию 16.07.2025

Подписана в печать 22.08.2025

Опубликована 30.09.2025

Investigation of the effect of gamma image correction in the problem of object recognition at a pedestrian crossing

Natalia A. Milostnaya¹, Natalia I. Yanglyaeva¹ 

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

 e-mail: KrapovaNI@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. Improving the reliability of object recognition in an image by investigating the effect of gamma correction of the input image on the quality coefficient of object recognition on it.

Methods. Pre-processing of images obtained using the complex of video recording of traffic violations installed in the city of Kursk includes gamma correction, conversion from RGB to grayscale, blurring with a Gauss filter, highlighting the boundaries of objects based on the Canny algorithm, classification of objects using the YOLO algorithm.

Results. The main advantages of adaptive control traffic control systems are considered. The structural scheme of the pedestrian crossing control system and the stages of input image preprocessing, including gamma correction, and their effect on the reliability of object detection are described. The Recall indicator was calculated to quantify the detection efficiency at different gamma correction values for each of the classes under consideration: pedestrians (Recall = 0.46), cars (Recall = 0.824), traffic lights (Recall = 0.60).

Conclusion. The results of a series of experimental studies prove the positive effect of gamma correction on the recognition efficiency of only certain classes of objects, such as traffic lights, requiring a minimum value of $\gamma \approx 1.5$ (gamma 100) to start recognition. The detection of other classes considered, such as pedestrians and cars, remains stable at any gamma values from the range [0; 200]. The largest number of detections was recorded at ranges of 20 and 80 for pedestrians and at ranges of 60, 100 and 120 for cars.

Keywords: adaptive control; intelligent traffic light; traffic flow; pedestrian flow; YOLO; automated traffic control system.

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

Funding: The work was carried out as part of the implementation of the development program of the South-Western State University under the project «Priority 2030».

For citation. Milostnaya N. A., Yanglyaeva N. I. Investigation of the effect of gamma image correction in the problem of object recognition at a pedestrian crossing. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(3): 193-209 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-193-209>.

Received 16.07.2025

Accepted 22.08.2025

Published 30.09.2025

Введение

Адаптивные системы управления светофорами широко внедряются в современных крупных городах [1-4]. Они пришли на смену системам с фиксирован-

ным интервалом смены сигналов светофора, которые не эффективны в условиях высокой интенсивности дорожного движения, провоцируя появления транспортных заторов на перекрёстках.

Адаптивное управление (АУ) – это интеллектуальная система регулировки движения транспорта, основанная на динамическом изменении временных циклов переключения сигналов светофора в зависимости от реальной дорожной ситуации. Система собирает данные с датчиков, установленных вдоль дорог, и анализирует интенсивность транспортного потока, скорость автомобилей, наличие заторов и аварийных ситуаций. На основе полученных данных алгоритм регулирует продолжительность зеленого и красного сигнала таким образом, чтобы оптимизировать пропускную способность перекрестков и минимизировать время ожидания водителей и пешеходов¹ [5, 6, 7].

Корректное управление сигналами интеллектуального светофора возможно при высоком проценте достоверности распознавания объектов [8, 9, 10, 11], участвующих в дорожном движении – транспортных средств и пешеходов, находящихся на рассматриваемом перекрёстке в определённый момент времени.

Распознавание объектов является одной из основных задач компьютерного зрения, широко применяемой в различных областях. Точность распознавания зависит от множества факторов, одним из

которых является качество исходного изображения.

Работа [12] посвящена повышению надёжности систем обнаружения и распознавания дорожных знаков в условиях переменной освещённости. В данной статье предлагается адаптивная архитектура, в которой модуль предварительной обработки на основе нечёткой системы вывода [13, 14] оценивает качество экспозиции входного изображения по каналу освещённости. В зависимости от полученной оценки изображение либо направляется напрямую в детектор, либо проходит этап улучшения яркости с сохранением цветовой информации с помощью специализированной свёрточной нейросети. Такой подход позволяет избежать избыточной обработки и снизить вычислительные затраты, одновременно повышая точность распознавания – на 10–18 % по метрике Recall и на 5–9 % по mAP.

В работе [15] предлагается метод, направленный на решение проблемы обнаружения пешеходов вочных условиях с неравномерной и недостаточной освещённостью. Основная идея заключается в интеграции улучшенного алгоритма Zero-DCE++ для генерации изображений с несколькими уровнями экспозиции, которые затем объединяются с исходным кадром и подаются на вход детектору на основе архитектуры YOLO. Для усиления взаимодействия между модулем улучшения изображения и детектором предложены «многоцелевая функция потерь» и «двухэтапная стратегия оптимизации». Эксперименты на нескольких общедоступных наборах дан-

¹ Патент № 2827781 С2 Российской Федерации, МПК G08G 1/01, G08G 1/08. Устройство управления светофором на основе нечеткой логики: № 2023101536: заявл. 25.01.2023: опубл. 02.10.2024 / М. В. Бобырь, Н. И. Храпова; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Юго-Западный государственный университет".

ных показывают, что описанный метод значительно снижает логарифмически усреднённый показатель пропусков, достигая оптимального баланса между точностью и вычислительной эффективностью.

Однако многие из существующих систем детектирования имеют недостатки, такие как ошибки классификации объектов и их классов, проблемы с сегментацией изображения, а также повышенная чувствительность к шуму и освещённости, что ухудшает качество и детализацию рассматриваемой фотографии.

Ключевую роль в обеспечении точного процесса распознавания объектов играет предварительная обработка изображения, позволяющая устранить недостатки исходных данных и повысить эффективность алгоритмов распознавания [16, 17, 18, 19].

Материалы и методы

Процесс адаптивного управления светофорами включает этапы сбора данных, предобработки полученных изображений, обработки данных в блоке детекции, обработки данных в блоке расчёта времени, формирования управляющих сигналов. Описанные этапы отражены в структурной схеме системы управления пешеходным переходом¹, представленной на рис. 1.

¹ Храпова Н. И. Онтологическая модель нейро-нечёткого управления пешеходным переходом в системе глаз-мозг-компьютер: дис. ... канд. техн. наук. Курск, 2024. 132 с.

Этап предварительной обработки изображения перед основным процессом распознавания позволяет подготовить изображение для лучшего выявления искомых объектов, снижая влияние помех и повышая точность детекции.

Для предварительной обработки исходного изображения используются процедуры преобразования информации, которые направлены на оптимизацию визуального качества изображения путем увеличения четкости, контрастности, яркости и детализации. Представленная процедура позволяет увеличить резкость контуров объектов, устраниТЬ недостатки освещения, удалить артефакты, вызванные плохим качеством съемки, провести цветовую коррекцию и улучшить контрастность объектов на изображении. Рассмотрим основные шаги преобразований.

1. Преобразование значения интенсивности изображения в нормализованную форму. Перед началом гамма-коррекции необходимо привести интенсивность изображения к диапазону [0,1] путем деления всех значений цветов на максимальное возможное значение:

$$I_{norm} = (x, y) = \frac{I(x, y)}{255},$$

где $I(x,y)$ – исходное значение интенсивности пикселя; 255 – максимальное возможное значение интенсивности пикселя; x – положение пикселя в столбце; y – положение пикселя в строке.

2. Применение гамма-коррекций [20], предполагающих применение нелинейной функции преобразования интенсивностей:

$$I_{cor}(x,y) = I'_{norm}(x,y),$$

где $1 < \gamma < 2$.

3. Нормализация к целочисленному формату:

$$I_{fin}(x,y) = I_{cor}(x,y) \times 255.$$

Важным этапом является преобразование изображения из формата RGB в

оттенки серого, что значительно упрощает процесс детекции объектов, сокращая объём обрабатываемых данных, снижая нагрузку на процессор и ускоряя выполнение операций. Использование монохромного изображения улучшает качество работы алгоритма выделения границ объектов.

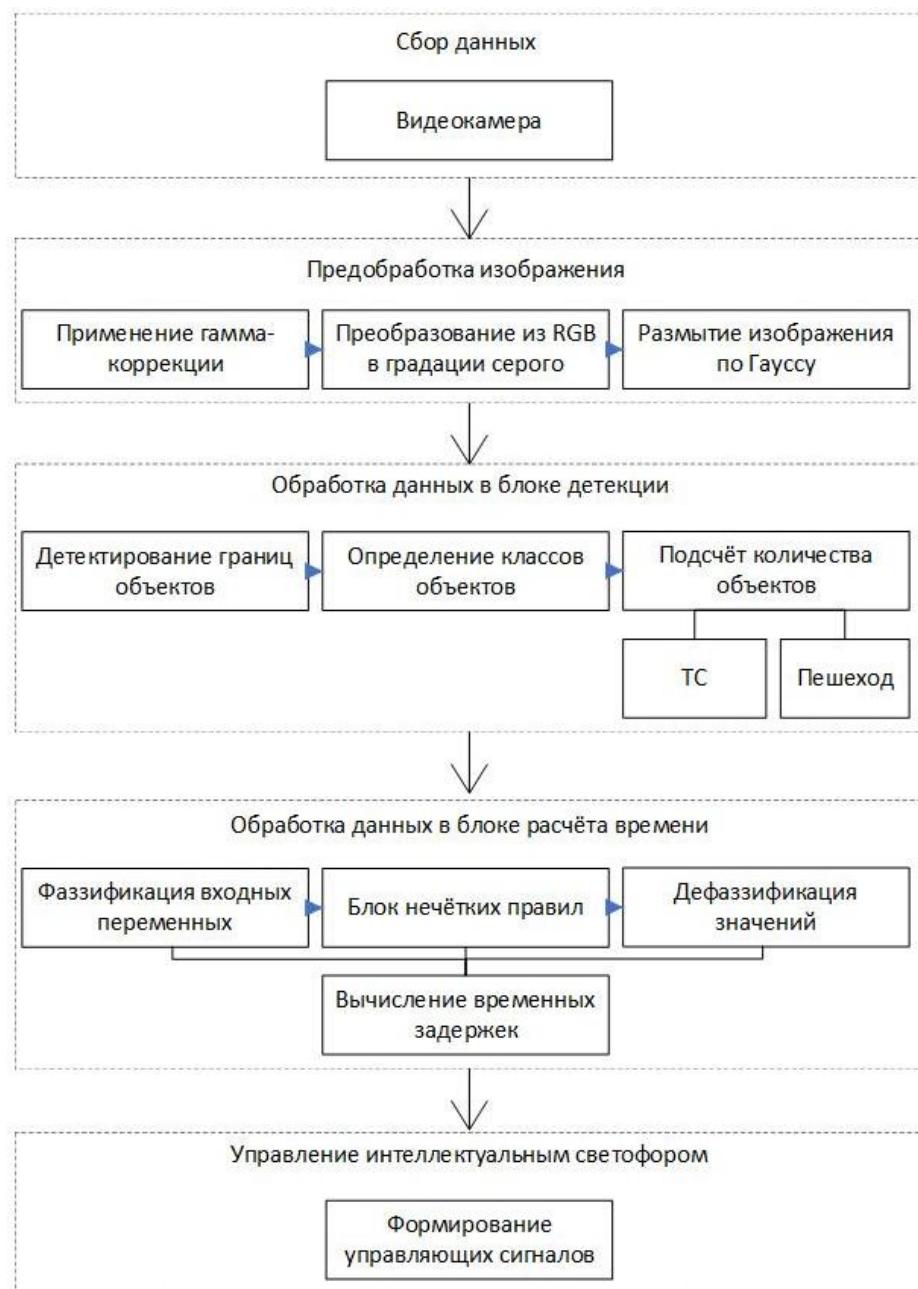


Рис. 1. Структурная схема системы управления пешеходным переходом

Fig. 1. Block diagram of the pedestrian crossing control system

$$I(x,y)_\gamma = \frac{I_{fin}(x,y)R + I_{fin}(x,y)G + I_{fin}(x,y)B}{3} + 1,$$

где $I(x,y)_\gamma$ – интенсивность цвета каждого пикселя; R – интенсивность красной составляющей цвета; G – интенсивность зелёной составляющей цвета; B – интенсивность синей составляющей цвета.

Следующим этапом предобработки является размытие изображения с помощью фильтра Гаусса, основанное на свёртке исходного изображения с двумерной функцией распределения Гаусса. Размытие с применением гауссова фильтра позволяет смягчить мелкие детали и снизить уровень высокочастотного шума, обеспечивая плавные переходы и уменьшение острых краёв.

$$K_{(x,y)} = \sum_{x=-2}^2 \sum_{y=-2}^2 \frac{1}{b} G_m I(x,y),$$

где G_m – матрица Гаусса; b – коэффициент нормировки.

Этап выделения границ объектов важен для точного определения положения, формы и контура объекта, что в дальнейшем позволит провести более точную классификацию объекта и отслеживать его движение. Когнитивная модель принятия решений о существовании границы подробно описана в работе [7].

Классификация объектов – это процесс разделения объектов на категории на основании определенных признаков и характеристик. Современный подход к решению задач классификации базируется на применении глубоких нейронных сетей [21, 22] и технологий машинного обучения [23, 24]. Для определения классов объектов широко используются алгоритмы библиотеки YOLO [25].

Алгоритм YOLO содержит процесс разделения изображения на сетку, расчёт ограничительных рамок и её привязанности к определённому классу. На первом этапе каждый блок сетки предсказывает B ограничивающих рамок с оценкой вероятности объекта внутри рамки:

$$OMS = S \times S \times (B \times 5 + C),$$

где S – размер сетки (количество блоков по вертикали и горизонтали); B – число предсказанных ограничивающих рамок на каждый блок; C – количество классов объектов.

Для оптимизации YOLO используется комплексная функция потерь, состоящая из трёх компонентов:

- ошибка позиционирования границ рамки

$$L_c = \lambda_c \sum_{i=0}^{s^2} \sum_{j=0}^B I_o^{ij} [(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2],$$

где λ_c – весовой коэффициент; I_o^{ij} – коэффициент ожидаемого наличия объекта; i – количество ячеек; j – количество рамок; x_i и y_i – истинные координаты центра рамки; \hat{x}_i и \hat{y}_i – предсказанные координаты центра рамки.

- неверная оценка наличия объекта

$$L_o = \lambda_{no} \sum_{i=0}^{s^2} \sum_{j=0}^B (I_o^{ij} - P_o^{ij})^2,$$

где λ_{no} – весовой коэффициент; P_o^{ij} – коэффициент предсказанного наличия объекта.

- классификация объектов

$$L_{cl} = \sum_{i=0}^{s^2} I_o^{ij} \sum_{cl} (p_c - \hat{p}_c)^2,$$

где p_c – истинный класс объекта; \hat{p}_c – предсказанный класс объекта.

Общая функция потерь равна сумме всех компонентов:

$$L = L_c + L_o + L_{cl}.$$

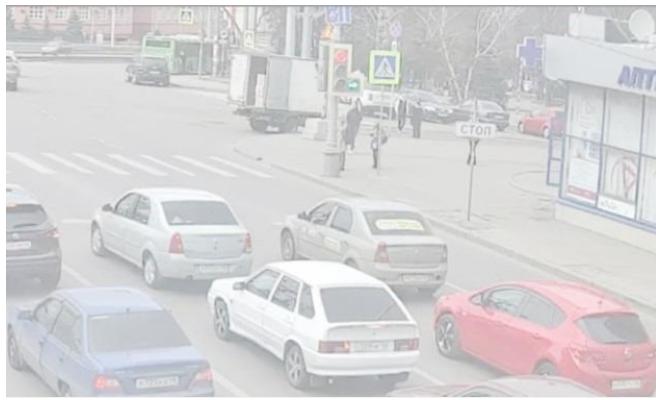
После завершения работы алгоритма YOLO на итоговом изображении найденные объекты выделены рамками, а выходная информация содержит сведения о количестве объектов, принадлежащих к каждому искомому классу.

Результаты и их обсуждение

Для исследования влияния гамма-коррекции на точность детекции объектов алгоритмом YOLOv8 была реализована серия экспериментов с изменением параметра γ в диапазоне от 1 до 2. Для удобства масштабирования и унификации измерений физические значения гаммы были линейно преобразованы в интервал [0; 200], где:

- значение 100 соответствует исходному изображению без коррекции ($\gamma = 1,5$);
- значения ниже 100 (до 20) соответствуют уменьшению гаммы ($\gamma < 1,5$), то есть повышению яркости тёмных участков и снижению контрастности;

Гамма: 20



– значения выше 100 (до 190) соответствуют увеличению гаммы ($\gamma > 1,5$), то есть осветлению светлых участков и повышению контрастности.

На первом этапе проведена проверка исходного изображения: $\gamma = 1,5$, масштабированное значение 100. Затем, начиная с этого значения, параметр гаммы постепенно уменьшался вниз (в сторону более светлых изображений) до значения 20, после чего он постепенно увеличивался вверх (в сторону более темных изображений) до значения 190. На каждом шаге (с шагом 20, за исключением последнего – 190) производилась детекция трёх классов объектов: пешеходов, автомобилей и светофоров. Количество обнаруженных объектов каждого класса фиксировалось как мера точности распознавания при данном значении гаммы.

Экспериментальные исследования проводились на изображении, полученном с комплекса видеофиксации нарушений правил дорожного движения. Результаты представлены на рис. 2 и в табл. 1.

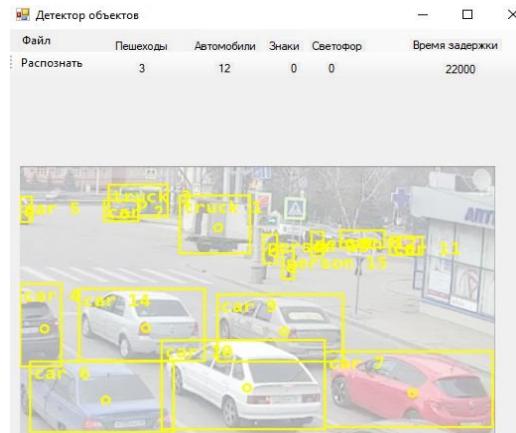
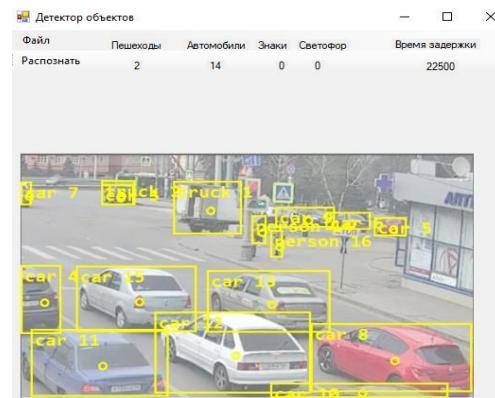
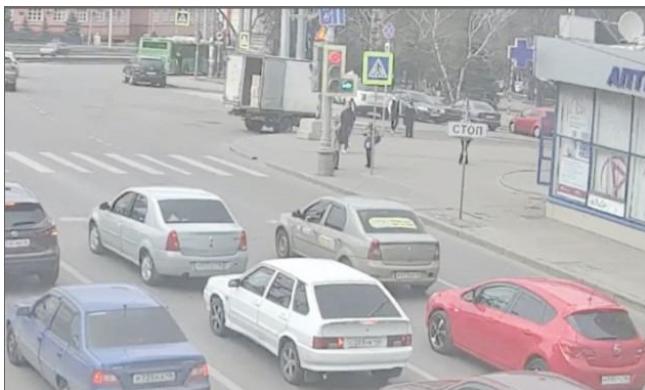


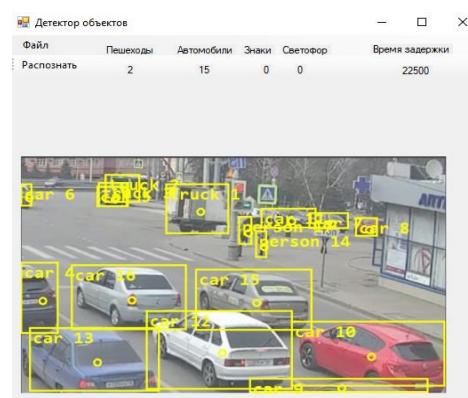
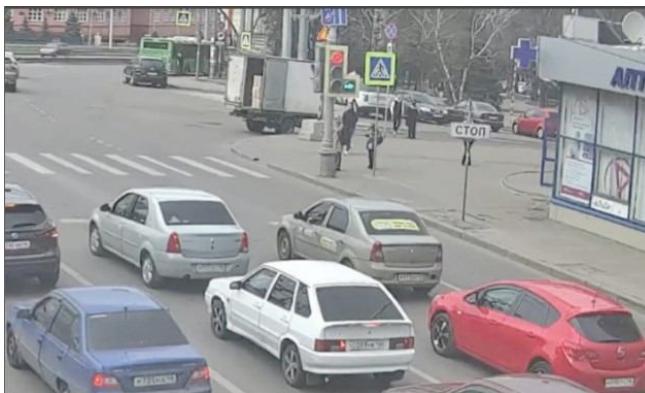
Рис. 2. Результаты гамма-коррекции изображения и детектирования искомых объектов

Fig. 2. The results of gamma image correction and detection of the desired objects

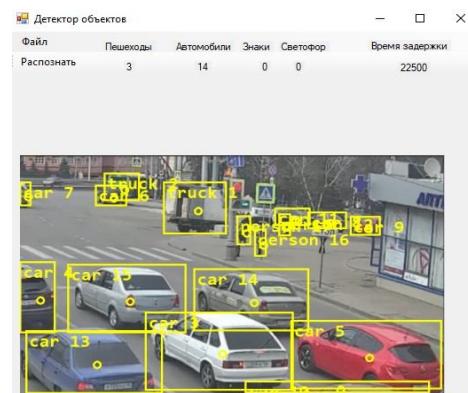
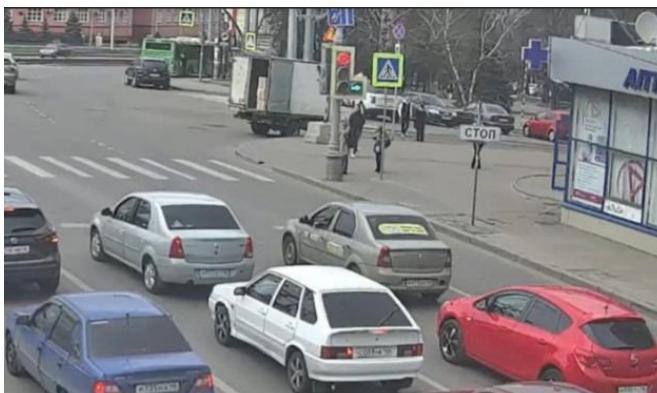
Гамма: 40



Гамма: 60



Гамма: 80



Гамма: 100

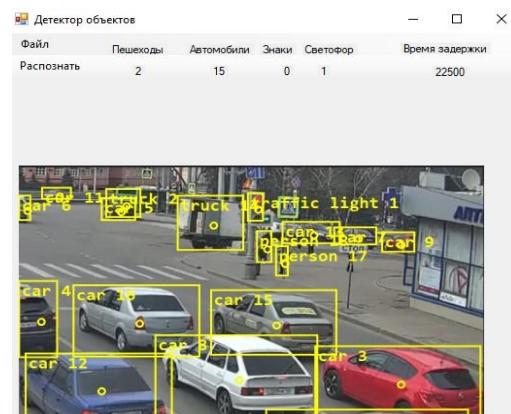
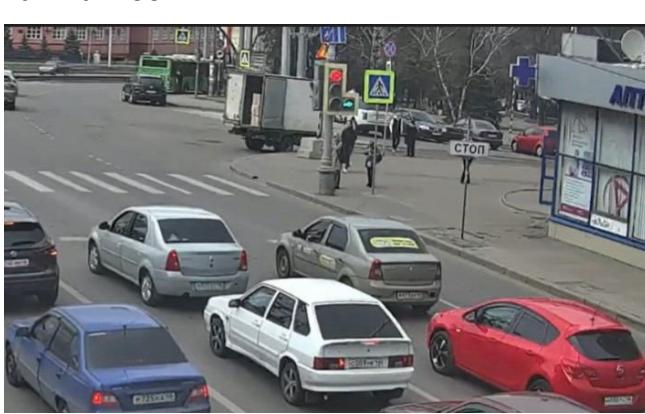
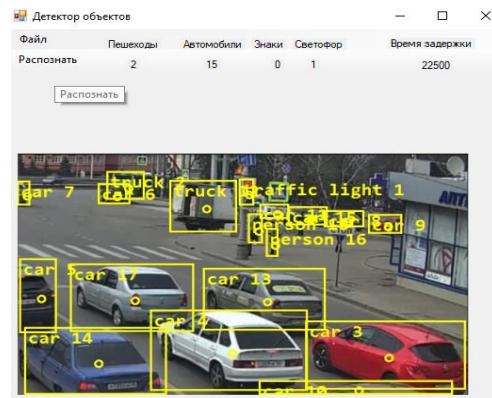
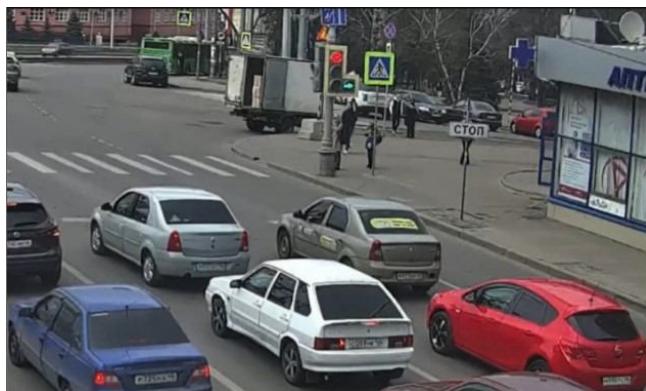


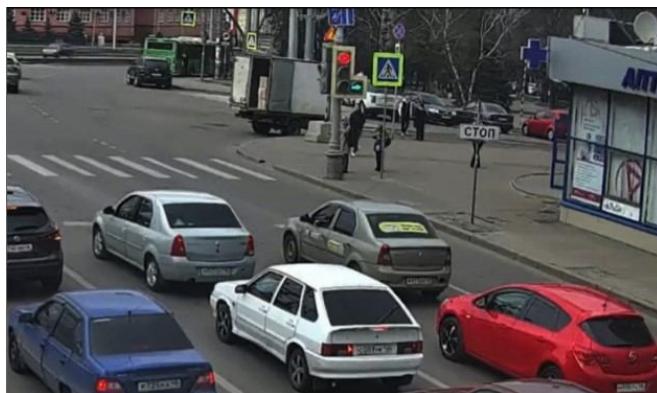
Рис. 2. Продолжение (начало на с. 199, окончание на с. 201, 202)

Fig. 2. Continuation (beginning on p. 199, ending on p. 201, 202)

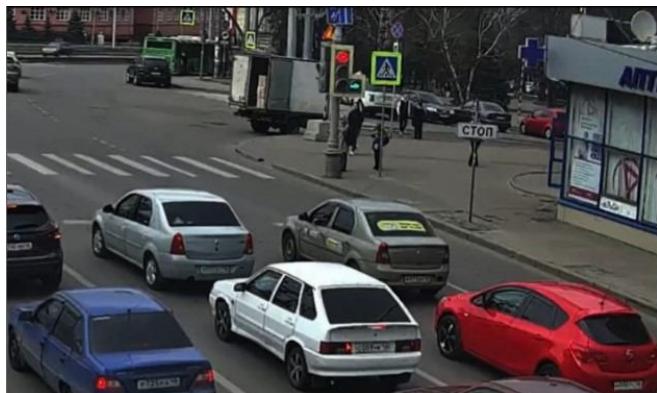
Гамма: 120



Гамма: 140



Гамма: 160



Гамма: 180

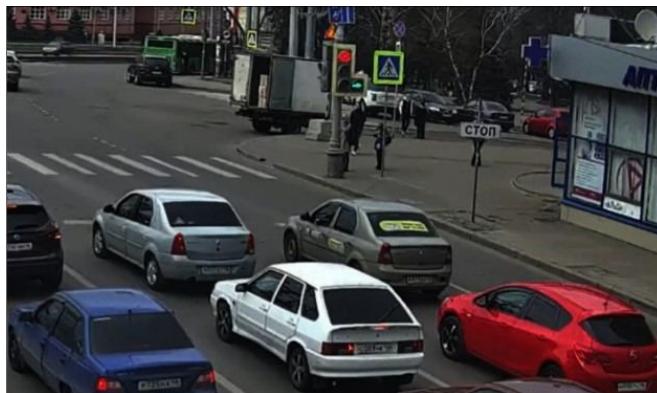


Рис. 2. Продолжение (начало на с. 199, 200, окончание на с. 202)

Fig. 2. Continuation (beginning on p. 199, 200, ending on p. 202)

Гамма: 190

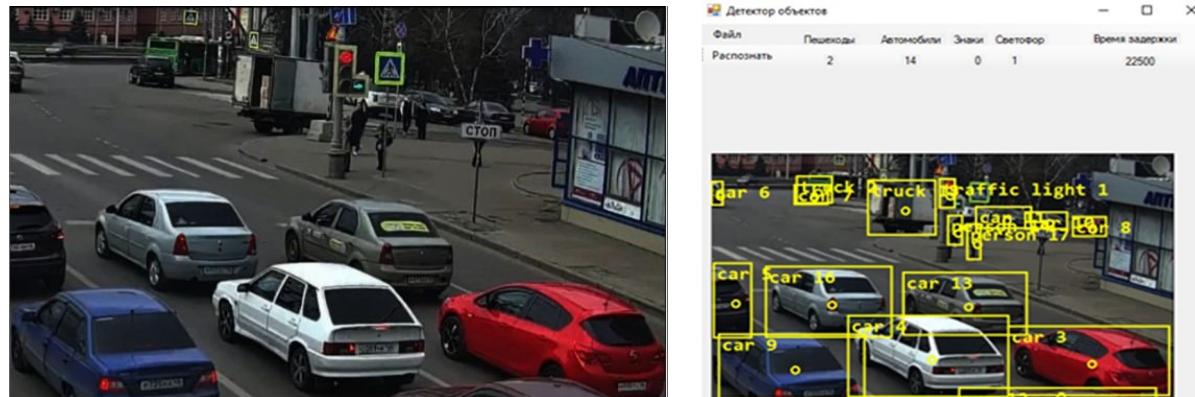


Рис. 2. Окончание (начало на с. 199, 200, 201)

Fig. 2. Ending (beginning on p. 199, 200, 201)

Таблица 1. Результаты распознавания объектов в зависимости от варьирования коэффициента γ

Table 1. Object recognition results depending on the variation of the coefficient γ

Гамма / Gamma	20	40	60	80	100	120	140	160	180	190
Пешеходы	3	2	2	3	2	2	2	2	2	2
Автомобили	12	14	15	14	15	15	14	13	14	14
Светофор	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1

На основе данных из табл. 1 проведён анализ результатов детектирования объектов:

1. Пешеходы. Количество корректно распознанных пешеходов колеблется в пределах 2–3 экземпляров. Наибольшее количество обнаружений (3) зафиксировано при гамме 20 и 80. При остальных значениях гаммы наблюдается стабильное значение детектирования – 2. Это указывает на слабую зависимость точности детекции пешеходов от параметра гамма в заданном диапазоне.

2. Автомобили. Распознавание автомобилей демонстрирует высокую устойчивость к изменениям гамма-коррекции: количество обнаруженных объектов варьируется в пределах 12–15. Максимальные

значения (15) достигаются при гамме 60, 100 и 120. Незначительное снижение (до 13) наблюдается при гамме 160, что может свидетельствовать о небольшой потере контрастности или яркости, влияющей на детекцию крупных объектов.

3. Светофоры. Данный класс объектов представляет наибольший интерес в рамках исследования. При гамме от 20 до 80 (соответствующим физическим значениям $\gamma \approx 1,1 - 1,4$) светофоры не распознаются (0 обнаружений). Первое успешное распознавание происходит при гамме 100 ($\gamma \approx 1,5$), после чего количество обнаруженных светофоров стабилизируется на уровне 1 при всех последующих значениях гаммы (до 190, соответствующего $\gamma \approx 1,95$).

Таким образом, гамма-коррекция оказывает существенное влияние на способность модели YOLOv8 распознавать светофоры. Критический порог для начала детекции светофоров лежит в районе гаммы 100 (физическое значение $\gamma \approx 1,5$). Ниже этого порога светофоры практически не обнаруживаются, что может быть связано с недостаточной контрастностью или яркостью сигнальных элементов на изображении. При повышении гаммы выше 100 точность распознавания светофоров стабилизируется, однако не увеличивается – модель обнаруживает только один объект данного класса, что может указывать на ограничения в датасете или настройках модели.

Для других классов (пешеходы и автомобили) влияние гамма-коррекции незначительно, что говорит об их более вы-

сокой устойчивости к изменению яркостных характеристик изображения.

Следовательно, для задач, где критически важно распознавание светофоров, рекомендуется использовать гамма-коррекцию с параметром не ниже 100 (в масштабированной шкале), что соответствует физическому значению $\gamma \geq 1,5$.

Для количественной оценки эффективности детекции при различных значениях гамма-коррекции были рассчитаны метрики Recall (полнота детектирования) для каждого класса объектов на основе истинного количества объектов в изображении: 5 пешеходов, 17 автомобилей и 1 светофор. Поскольку в рамках данного эксперимента не анализировались ложные срабатывания (FP), метрика Precision не рассчитывалась, а основной акцент был сделан на Recall – показателе, отражающем долю обнаруженных истинных объектов (табл. 2).

Таблица 2. Результаты расчёта показателя Recall

Table 2. Results of calculation of the Recall indicator

Гамма / Gamma	Recall		
	Пешеходы / Pedestrians	Автомобили / Cars	Светофор / Traffic lights
20	0,60	0,706	0,00
40	0,40	0,824	0,00
60	0,40	0,882	0,00
80	0,60	0,824	0,00
100	0,40	0,882	1,00
120	0,40	0,882	1,00
140	0,40	0,824	1,00
160	0,40	0,765	1,00
180	0,40	0,824	1,00
190	0,40	0,824	1,00
Среднее	0,46	0,824	0,60

Как видно из результатов табл. 2, среднее значение Recall по всем значениям гаммы составляет:

- 0,46 для пешеходов — указывает на низкую стабильность детекции этого класса;
- 0,824 для автомобилей — демонстрирует высокую надёжность модели при распознавании крупных объектов;
- 0,60 для светофоров — отражает критическую зависимость от гамма-коррекции: при значениях $\gamma < 1,5$ (гамма < 100) $\text{Recall} = 0$, а при $\gamma \geq 1,5$ (гамма ≥ 100) $\text{Recall} = 1,0$; что подтверждает пороговое поведение модели в отношении данного класса.

Таким образом, гамма-коррекция оказывает наибольшее влияние на детекцию светофоров, требуя минимального значения $\gamma \approx 1,5$ (гамма 100) для начала распознавания. Для других классов влияние

менее выражено, особенно для автомобилей, которые сохраняют высокий уровень детекции во всём диапазоне.

Выводы

В представленной статье исследовано влияние предварительной обработки входного изображения, включающей гамма-коррекцию, на качество распознавания объектов. В ходе работы проведены экспериментальные исследования, которые доказывают, что гамма-коррекция изображения влияет в разной степени на каждый класс детектируемых объектов. Кorrectное распознавание светофоров возможно только при определённых значениях $\gamma \approx 1,5$, в то время как детекция пешеходов и автомобилей сохраняет высокую степень достоверности при любых значениях во всём диапазоне.

Список литературы

1. Бекларян А. Л., Бекларян Л. А., Акопов А. С. Имитационная модель интеллектуальной транспортной системы «умного города» с адаптивным управлением светофорами на основе нечеткой кластеризации // Бизнес-информатика. 2023. Т. 17, № 3. С. 70-86.
2. Мясников В. В., Агафонов А. А., Юмаганов А. С. Детерминированная прогнозная модель управления сигналами светофоров в интеллектуальных транспортных и геоинформационных системах // Компьютерная оптика. 2021. Т. 45, № 6. С. 917-925.
3. Жанказиев С. В., Воробьев А. И., Бачманов М. Д. Оптимизация адаптивного управления светофорными объектами в рамках директивного управления транспортным потоком // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2016. № 4(47). С. 138-143.
4. Андронов С. А. Сравнение эффективности адаптивных алгоритмов светофорного регулирования в среде AnyLogic // Программные продукты и системы. 2019. № 1. С. 150-158.

5. Бобырь М. В., Храпова Н. И., Ламонов М. А. Система управления интеллектуальным светофором на основе нечеткой логики // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. Т. 25, № 4. С. 162-176. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-162-176..>
6. Bobyr M. V., Khrapova N. I. A Two-Level Information and Analytical Control System for Intelligent Traffic Lights // Automatic Documentation and Mathematical Linguistics. 2024. Vol. 58, no. S5. P. S269-S278.
7. Бобырь М.В., Емельянов С.Г., Храпова Н.И. Онтологическая модель управления временем ожидания разрешающего сигнала светофора участниками дорожного движения в зоне пешеходного перехода // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, № 4. С. 124-137. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-4-124-137>.
8. Емалетдинова Л. Ю., Назаров М. А. Нейросетевой алгоритм распознавания объекта на изображении на основе эталонного контура // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2020. Т. 4. С. 137-141.
9. Распознавание объектов и типов опорной поверхности по данным комплексированной системы технического зрения / А. В. Вазаев, В. П. Носков, И. В. Рубцов, С. Г. Цариченко // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 2(175). С. 127-139.
10. Медведев М. В., Кирпичников А. П. Система управления беспилотным летательным аппаратом на основе вейвлет-методов обнаружения и распознавания объектов на изображениях // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, № 19. С. 359-362.
11. Соловьев Ф. С., Тарасов И. Е., Петров А. Б. Распознавание образов и обнаружение контуров объекта на изображении // Инновации в науке. 2019. № 4(92). С. 4-9.
12. Choudhary P., Dey S. FAIERDet: Fuzzy-based Adaptive Image Enhancement for Real-time Traffic Sign Detection and Recognition Under Varying Light Conditions // Expert Systems with Applications. 2023. Vol.295. P. 128795.
13. Бобырь М. В., Кулабухов С. А. Моделирование процесса управления температурным режимом в зоне резания на основе нечеткой логики // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 3. С. 76-82.
14. Бобырь М. В., Милостная Н. А. Анализ использования мягких арифметических операций в структуре нечетко-логического вывода // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. № 7(133). С. 7-15.
15. Multi-exposure image enhancement and YOLO integration for nighttime pedestrian detection / X. Dai, J. Lan, Z. Chen, B. Wang, X. Wen // Signal Processing: Image Communication. 2025. Vol. 140. P. 117421.

16. Трофименко Я. М., Виноградова Л. Н., Ершов Е. В. Алгоритмы предобработки изображений в системе идентификации лиц в видеопотоке // Вестник Череповецкого государственного университета. 2019. № 4(91). С. 21-29.
17. Танцевов Г. М., Майков К. А. Исследование алгоритмов предобработки изображения кисти руки, применимых к распознаванию жестовых символов // Cloud of Science. 2020. Т. 7, № 1. С. 61-74.
18. Исследование алгоритмов предобработки изображений для повышения эффективности распознавания медицинских снимков / П. А. Шагалова, А. Д. Ерофеева, М. М. Орлова [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. № 1(128). С. 25-32.
19. Лагунов Н. А., Мезенцева О. С. Влияние предобработки изображений на качество обучения нейронной сети для их распознавания // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2015. № 1(46). С. 51-58.
20. Deng G. A generalized gamma correction algorithm based on the SLIP model // Eur-asip Journal on Advances in Signal Processing. 2016. Vol. 2016, no. 1. P. 69.
21. Томакова Р.А., Дзюбин И.А., Брежнев А.В. Метод и алгоритм обучения сверточной нейронной сети, предназначенный для интеллектуальной системы распознавания меланомы // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 1. С. 65-83. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-65-83>
22. Рябинов А.В., Уздяев М.Ю., Ватаманюк И.В. Применение многозадачного глубокого обучения в задаче распознавания эмоций в речи // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. Т. 25, № 1. С. 82-109. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-82-109>.
23. Автоматическое распознавание частиц на цифровых изображениях / Е.С. Опарин, М.А. Дзус, Н.Н. Давыдов, К.С. Хорьков // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 1. С. 50-66. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-50-66>.
24. Абросимов В. К., Матвеева Ю. Н. Формирование синтетических данных для машинного обучения распознаванию подводных объектов // Робототехника и техническая кибернетика. 2023. Т. 11, № 4. С. 256-266.
25. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection / J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, A. Farhadi // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2015. P. 779-788.

References

1. Beklaryan A. L., Beklaryan L. A., Akopov A. S. Simulation model of an intelligent transport system of a "smart city" with adaptive traffic light control based on fuzzy clustering. *Biznes-informatika = Business Informatics*. 2023; 17(3): 70-86. (In Russ.).
2. Myasnikov V. V., Agafonov A. A., Yumaganov A. S. Deterministic predictive model of traffic light signal control in intelligent transport and geoinformation systems. *Komp'yuternaya optika = Computer Optics*. 2021; 45(6): 917-925. (In Russ.).
3. Zhankaziev S. V., Vorobyov A. I., Bachmanov M. D. Optimization of adaptive traffic light control in the framework of directive traffic flow management. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI) = Bulletin of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI)*. 2016; (4): 138-143. (In Russ.).
4. Andronov S. A. Comparison of the effectiveness of adaptive traffic light control algorithms in the AnyLogic environment. *Programmnye produkty i sistem = Software products and systems*. 2019; (1): 150-158. (In Russ.).
5. Bobyr M.V., Khrapova N. I., Lamonov M. A. Smart Traffic Light Control System Based on Fuzzy Logic. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(4): 162-176 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-162-176>.
6. Bobyr M. V., Khrapova N. I. A Two-Level Information and Analytical Control System for Intelligent Traffic Lights. *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics*. 2024; 58(S5): S269-S278.
7. Bobyr M. V., Emelyanov S. G., Khrapova N. I. Ontological model for managing waiting time for traffic light signals by road users in a pedestrian crossing zone. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(4): 124-137 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-4-124-137>.
8. Emaletdinova L. Y., Nazarov M. A. Neural network algorithm for recognizing an object in an image based on a reference contour. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh - MMTT = Mathematical methods in engineering and technology - MMTT*. 2020; 4: 137-141. (In Russ.).
9. Vazaev A.V., Noskov V. P., Rubtsov I. V., Tsarichenko S. G. Recognition of objects and types of the bearing surface according to the integrated vision system. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFU. Technical sciences*. 2016; (2): 127-139. (In Russ.).
10. Medvedev M. V., Kirpichnikov A. P. An unmanned aerial vehicle control system based on wavelet methods for detecting and recognizing objects in images. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of Kazan Technological University*. 2014; 17(19): 359-362. (In Russ.).

11. Solovyov F. S., Tarasov I. E., Petrov A. B. Pattern recognition and detection of contours of an object in an image. *Innovatsii v nauke = Innovations in science.* 2019; (4): 4-9. (In Russ.).
12. Choudhary P., Dey S. Choudhary P. FAIERDet: Fuzzy-based Adaptive Image Enhancement for Real-time Traffic Sign Detection and Recognition Under Varying Light Conditions. *Expert Systems with Applications.* 2023; 295: 128795.
13. Bobyr M. V., Kulabukhov S. A. Modeling the process of controlling the temperature regime in the cutting zone based on fuzzy logic. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin = Problems of mechanical engineering and machine reliability.* 2017; (3): 76-82. (In Russ.).
14. Bobyr M. V., Milostnaya N. A. Analysis of the use of soft arithmetic operations in the structure of fuzzy logic.logical inference. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii = Bulletin of Computer and Information Technologies.* 2015; (7): 7-15. (In Russ.).
15. Dai X., Lan J., Chen Z., Wang B., Wen X. Multi-exposure image enhancement and YOLO integration for nighttime pedestrian detection. *Signal Processing: Image Communication,* 2025; 140: 117421.
16. Trofimenko Ya. M., Vinogradova L. N., Ershov E. V. Algorithms of image preprocessing in the face identification system in the video stream. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Cherepovets State University.* 2019; (4): 21-29. (In Russ.).
17. Dancing G. M., Maikov K. A. A study of algorithms for preprocessing the image of the hand, applicable to the recognition of gesture symbols. *Cloud of Science.* 2020; 7(1): 61-74. (In Russ.).
18. Shagalova P. A., Yerofeyeva A.D., Orlova M. M., et al. Investigation of image preprocessing algorithms to improve the efficiency of recognition of medical images. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva = Proceedings of the Alekseev Russian State Technical University.* 2020; (1): 25-32. (In Russ.).
19. Lagunov N. A., Mezentseva O. S. The influence of image preprocessing on the quality of neural network learning for their recognition. *Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta = Bulletin of the North Caucasus Federal University.* 2015; (1): 51-58. (In Russ.).
20. Deng G. A generalized gamma correction algorithm based on the SLIP model. *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing.* 2016; 2016(1): 69.
21. Tomakova R.A., Dzyubin I.A., Brezhnev A.V. A Method and Algorithm for Training a Convolutional Neural Network Designed for an Intelligent Melanoma Recognition System. *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.* 2022;12(1):65-83. (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-65-83>

22. Ryabinov A. V., Uzdiaev M. Yu., Vatamaniuk I.A. Applying Multitask Deep Learning to Emotion Recognition in Speech. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(1): 82-109 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-82-109>.
23. Oparin E.S., Dzus M.A., Davydov N.N., Khorkov K.S. Automatic Particle Recognition Based on Digital Image Processing. *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*. 2024;14(1):50-66. (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-50-66>.
24. Abrosimov V. K., Matveeva Yu. N. Formation of synthetic data for machine learning to recognize underwater objects. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika = Robotics and technical cybernetics*. 2023; 11(4): 256-266. (In Russ.).
25. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2015. P. 779-788.

Информация об авторах / Information about the Authors

Милостная Наталья Анатольевна, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: nat_mil@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3779-9165>

Янгляева Наталия Игоревна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: KhrapovaNI@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7947-1427>

Natalia A. Milostnaya, Dr. of Sci. (Engineering), Senior Researcher of the Software Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: nat_mil@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3779-9165>

Natalia I. Yanglyaeva, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Lecturer of Software Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: KhrapovaNI@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7947-1427>

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.8; 519.6

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-210-221>



Подход к самообучению автоассоциативной модели нейронной сети высокого порядка

А. В. Малышев¹

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

e-mail: alta76@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Разработка максимально эффективного, в контексте современных технических средств реализации интеллектуальных систем, предназначенных, в т.ч., для решения задач распознавания образов, алгоритма самообучения двухслойной модели нейронной сети, который будет основан на наращивании числа нейронов и вариации весовых коэффициентов синаптических связей, с возможностью распространения его на многосвязную нейронную сеть высокого порядка с внутренним произведением векторов.

Методы. Для решения поставленной задачи в данной работе предложен подход к синтезу многосвязной модели нейронной сети высокого порядка с внутренним произведением векторов, а также алгоритм самообучения такой нейронной сети, предусматривающий оперативную коррекцию элементов матрицы эталонов вместо традиционной вариации весовых коэффициентов синаптических связей с целью снижения ресурсоёмкости выполняемых операций.

Результаты. Предложенный метод был реализован в виде программного приложения в привязке к самообучению нейронной сети высокого порядка на звукотипах речевых сигналов, представленных в растровом виде с предварительной их сегментацией из общего потока и преобразованием в полярных координатах с целью удобства обработки и хранения полученных образов в качестве обучающей выборки.

Заключение. Разработанный алгоритм в ходе проведения тестирования его программной реализации, за счёт исключения ресурсоёмкой операции вариации весовых коэффициентов и заменой её на непосредственную коррекцию матрицы эталонов, показал достаточно высокую эффективность, сходимость за конечное число шагов, обусловленную ограничением количества кодов первого приближения эталонных векторов, а также заметное быстродействие по сравнению с известными аналогами.

Ключевые слова: нейронная сеть; звукотип; матрица эталонов; весовые коэффициенты; вектор активации.

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

Для цитирования: Малышев А. В. Подход к самообучению автоассоциативной модели нейронной сети высокого порядка // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(3): 210-221. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-210-221>.

Поступила в редакцию 21.07.2025

Подписана в печать 28.08.2025

Опубликована 30.09.2025

An approach to self-training of a high-order autoassociative neural network model

Aleksandr V. Malyshev¹ 

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation
 e-mail: alta76@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. To develop a self-learning algorithm for a two-layer neural network model that is as efficient as possible, given the current technical implementation of intelligent systems, including those designed for solving pattern recognition problems. This algorithm will be based on increasing the number of neurons and varying the weight coefficients of synaptic connections, with the possibility of extending it to a high-order multiconnected neural network with an internal product of vectors.

Methods. To solve this problem, this paper proposes an approach to synthesizing a high-order multiconnected neural network model with an internal product of vectors, as well as a self-learning algorithm for such a neural network. This algorithm provides for the rapid correction of the elements of the reference matrix, instead of the traditional variation of the weight coefficients of synaptic connections, in order to reduce the resource intensity of the performed operations.

Results. The proposed method was implemented as a software application linked to the self-training of a high-order neural network using speech sound types represented in raster format, pre-segmented from the general stream and transformed into polar coordinates for ease of processing and storing the resulting images as a training set.

Conclusion. The developed algorithm, during software implementation testing, demonstrated relatively high efficiency by eliminating the resource-intensive operation of varying weight coefficients and replacing it with direct correction of the reference matrix. This algorithm demonstrated relatively high efficiency, convergence in a finite number of steps due to the limited number of first-approximation codes of reference vectors, and noticeable performance compared to known analogs.

Keywords: neural network; sound type; reference matrix; weighting coefficients; activation vector.

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

For citation. Malyshev A. V. An approach to self-training of a high-order autoassociative neural network model. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(3): 210-221 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-3-210-221>.

Received 21.07.2025

Accepted 28.08.2025

Published 30.09.2025

Введение

Известные алгоритмы самообучения моделей нейронных сетей с внешним произведением векторов основаны на ва-

риации весовых коэффициентов синаптических связей [1, 2]. В современных моделях нейронных сетей высокого порядка с внутренним произведением векторов, обладающих высокой информа-

ционной ёмкостью при хранении сильнокоррелированных образов, весовые коэффициенты не хранятся в памяти, а вычисляются косвенно при имитации переключения нейронной сети в результате двух последовательных умножений векторов на одну и ту же матрицу эталонных векторов [3, 4]. Математическое описание модели такой нейронной сети высокого порядка в режиме имитации переключения после снятия входного вектора активизации имеет вид:

$$C = (X^* \alpha) \| V \|, \quad (1)$$

$$Y = C^{(n)} \| V \|^\dagger,$$

$$x_i = \text{sign}(y_i + \theta_i),$$

$$i = \overline{1, N}, x_i \in \{+1, -1\},$$

где X – N -мерная строка компонент входного вектора; Y – N -мерная строка компонент вектора мембранныго потенциала; x_i – i -я компонента входного вектора; y_i – i -я компонента вектора мембранныго потенциала; α – N -мерная строка компонент вектора коэффициентов взвешивания компонент входного вектора; $X^* \alpha$ – покомпонентное произведение векторов; $\|V\|$ – прямоугольная матрица размером $N \times M$ элементов эталонных векторов, где M – число эталонных векторов; $\|V\|^\dagger$ – обозначение транспонированной матрицы; C – M -мерная строка компонент вектора степеней сходства входного взвешенного вектора ($X^* \alpha$) с каждым V_j , $j = \overline{1, M}$; $C^{(n)}$ – покомпонентное возвведение вектора C в степень n , где n – порядок модели нейронной сети; θ_i – порог i -го нейрона; N – число нейронов в модели нейронной сети.

Компонента α_i вектора взвешивания α равна:

$$\alpha_i = 1 + \frac{1}{M} - \left| \sum_{j=1}^M v_{ij} \right| / M, \quad (2)$$

$$i = \overline{1, N}, \quad j = \overline{1, M}, \quad v_{ji} \in \{+1, -1\},$$

где v_{ij} – i -я компонента j -го эталонного вектора V_j .

Так как в памяти данной модели нейронной сети высокого порядка хранятся только компоненты v_{ij} эталонных векторов V_j , $j = \overline{1, M}$, традиционный способ её обучения и самообучения путём вариации весовых коэффициентов, вычисляемых при известных эталонах по формуле:

$$\gamma_{ik} = \sum_{j=1}^M v_{ij} \alpha_k v_{jk}, \quad i, k = \overline{1, N} \quad (3)$$

приводит к большим потерям времени на прямое и обратное преобразование матрицы эталонов $\|V\|$ в матрицу $\|y\|$ весовых коэффициентов синаптических связей с промежуточным изменением γ_{ik} по алгоритму обучения [5, 6]. Кроме того, известное выражение (3) справедливо только для нейронной сети первого порядка и существенно усложняется в нейронной сети высокого порядка при $n > 1$ [7, 8].

Материалы и методы

В связи с вышеизложенным в данной работе предлагается развитие алгоритма самообучения модели нейронной сети, основанного на наращивании числа нейронов и последующей вариации весовых коэффициентов $\{\gamma_{ik}\}$, и распро-

странение его на многосвязную модель нейронной сети высокого порядка с внутренним произведением векторов [9, 10]. Предлагаемый алгоритм отличается от известных исключением ресурсоемкой операции вариации весовых коэффициентов и заменой её на непосредственную коррекцию матрицы эталонов $\|V\|$.

Используя известный критерий подобия [11, 12] как скалярное произведение нормированных векторов активизации нейронной сети и её отклика, предлагаемый алгоритм самообучения нейронной сети высокого порядка выполняется за следующие два этапа. На первом этапе в память эталонов данной нейронной сети вносятся в качестве кодов первого приближения эталонных векторов входные векторы обучающей выборки до тех пор, пока величина скалярного произведения нормированных векторов (a_{i*}) очередного вектора обучающей выборки и вектора отклика наиболее активного i^* -го нейрона не превысит установленного порога b критерия их подобия при $0,5 < b < 1$, а именно $a_{i*} > b$, т.е. до появления успешного отклика хотя бы одного i^* -го нейрона [13, 14].

На втором этапе во всех случаях, когда $a_{i*} > b$, выполняется коррекция компонент v_{ji} , накопленных в памяти кодов первого приближения эталонных векторов без дальнейшего увеличения их количества m . При этом учитывается число p_{i*} успешных откликов i^* -го наиболее активного нейрона за всё время самообучения на основе проверки двух систем неравенств:

$$a_{\vartheta j} > \frac{p_{i*}}{(1 + p_{i*})}, \quad j = \overline{1, M}$$

$$a_{ci} > \frac{p_{i*}}{(1 + p_{i*})}, \quad j = \overline{1, N},$$

где $a_{\vartheta j}$ – критерий подобия скалярного произведения j -го кода первого приближения и данного вектора обучающей выборки;

a_{ci} – критерий подобия скалярного произведения нормированных векторов i^* -го столбца и другого i -го столбца матрицы накопленных кодов первого приближения в пределах подмножества строк, удовлетворяющих первому неравенству.

Тем самым выделяются ji -е элементы матрицы $\|V\|$ эталонных векторов, подлежащие коррекции на данном шаге самообучения, а их значения заменяются значениями i -х компонент x_i данного вектора обучающей выборки.

Каждый шаг самообучения на каждом очередном векторе обучающей выборки начинается с образования вектора отклика X^o всей замкнутой модели нейронной сети (1) на данных X входного вектора. В качестве претендентов на наибольшую активность выбираются те нейроны, на выходе которых были образованы положительные компоненты вектора отклика X^o . Наиболее активный i^* -й нейрон выделяется из них путём:

– последовательного опроса разомкнутой модели нейронной сети однокомпонентными входными векторами вида:

$$X_{Ii} = (0 \dots 0 \ x_i^0 \ 0 \dots 0) \text{ при } x_i^0 > 0; \quad (4)$$

- нахождения по каждому из них выходного вектора отклика Y_i разомкнутой модели;
- выделения в их последовательности $\{Y_i\}$ одного i^* -го, наиболее близкого по скалярному произведению к данному вектору обучающей выборки:

$$a_{i^*} = \max_{\text{по } i} \{a_i\} = \max_{\text{по } i} \left\{ \frac{X}{X^\mu} \frac{Y_i}{Y_i^\mu} \right\}. \quad (5)$$

где XY_i – скалярное произведение векторов;

X^μ – длина вектора, вычисляемая по формуле

$$X^\mu = \sqrt{\sum_{i=1}^N x_i^2}.$$

(6)

Тем самым стимулируется повышение адекватности ответов наиболее активного нейрона на близкие векторы обучающей выборки, принадлежащие одному и тому же классу образов, а в ходе самообучения зарождается и подкрепляется центр активности данного класса образов, присутствующих во входной последовательности вышеозначенных векторов [15, 16]. Причём в памяти, хранящей матрицу $\|V\|$ корректируемых эталонных векторов, может быть создано большое количество центров активности сильно-коррелированных образов, которое, благодаря повышению порядка модели нейронной сети и взвешиванию компонент входного вектора, существенно превышает возможности модели Хопфилда.

Словесная формулировка одного шага алгоритма самообучения модели нейронной сети высокого порядка на

одном очередном входном векторе обучающей выборки:

1. Определяется и запоминается вектор отклика X^o замкнутой модели нейронной сети на данный входной вектор X обучающей выборки.
 2. Выделяется подмножество нейронов-претендентов на наибольшую активность по критерию: $x_i^o > 0$.
 3. Находится наиболее активный i^* -й нейрон путём последовательного опроса разомкнутой модели нейронной сети однокомпонентными входными векторами вида (4), определения по каждому из них выходного вектора Y_i и выделения в их последовательности $\{Y_i\}$ одного i^* -го, наиболее близкого к данному вектору обучающей выборки по максимуму множества скалярных произведений нормированных векторов (5, 6).
 4. Проверяется установленный порог критерия подобия: $a_{i^*} \leq b$. Если $a_{i^*} > b$, переход к п. 6.
 5. В память модели записывается данный вектор обучающей выборки X в качестве очередного эталонного вектора матрицы эталонов $\|V\|$, а затем переход к п. 12.
 6. Увеличивается на единицу число p_{i^*} успешных откликов i^* -го наиболее активного нейрона:
- $$p_{i^*} := p_{i^*} + 1.$$
7. Вычисляется вектор скалярного произведения данного вектора обучающей выборки и всех m накопленных кодов первого приближения в матрице $\|V\|$ эталонов:

$$A_{\alpha}^t = (a_{\alpha 1}, \dots, a_{\alpha j}, \dots, a_{\alpha m})^t = \left\| \frac{V_j}{V_j^\mu} \right\| \left[\begin{array}{c} X\alpha \\ (X\alpha)^\mu \end{array} \right]^t,$$

где первый множитель – это матрица $\|V\|$ накопленных к данному шагу обучения кодов первого приближения, представленная в виде столбца нормированных эталонных векторов-строк; m – число кодов первого приближения, накопленных в матрице $\|V\|$ к данному шагу обучения.

8. Выделяется подмножество строк $\{j1\}$ матрицы $\|V\|$, элементы которых целесообразно варьировать в данном шаге обучения по критерию:

$$a_{\alpha j1} > \frac{p_{i^*}}{(1 + p_{i^*})}, j1 \in \{j\}. \quad (7)$$

9. Вычисляются критерии подобия i^* -го столбца выделенного в п. 8 подмножества строк $\{j1\}$ матрицы $\|V\|$ с другими столбцами этого же подмножества строк как их скалярное произведение:

$$a_{ci} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{j1} (v_{j1i^*})^2}} \frac{1}{\sqrt{\sum_{j1} (v_{j1i})^2}} \times \\ \times (v_{1i}, \dots, v_{j1i}, \dots, v_{mi})(v_{1i^*}, \dots, v_{j1i^*}, \dots, v_{mi^*}), \\ j1 \in \{j\}, i \neq i^*, i = \overline{1, N}.$$

10. Выделяется подмножество столбцов $\{i1\}$ матрицы $\|V\|$, элементы которых целесообразно варьировать в пределах подмножества $\{j1\}$ в данном шаге обучения по критерию:

$$a_{ci1} > \frac{p_{i^*}}{(1 + p_{i^*})}, i1 \in \{i\}. \quad (8)$$

11. Корректируются $j1i1$ -е элементы матрицы $\|V\|$ путем замены их на $i1$ -е

компоненты данного вектора обучающей выборки:

$$v_{j1i1} := x_{i1}.$$

12. Вычисляется новый вектор α коэффициентов взвешивания компонент входного вектора по элементам модифицированной матрицы эталонов $\|V\|$ и замещается старый вектор α предыдущего шага обучения по формуле (2), где

– $M = m$ при переходе по п.п. 11,12;

– $M = m + 1$ при переходе по п.п. 5,12.

13. Конец шага обучения.

Результаты и их обсуждение

Фрагмент кода [17, 18] представленного алгоритма, реализованного на языке программирования Java, приведен на рис.1. Сходимость представленного алгоритма обусловлена ограничением числа m кодов первого приближения эталонных векторов, накапливаемых в памяти модели нейронной сети на первом этапе, а также постепенным уменьшением степени модификации элементов матрицы $\|V\|$ без изменения числа m . На втором этапе по мере увеличения числа p_{i^*} возрастают длины обучающих выборок, а выражение в правой части соответствующих неравенств (7, 8) при большом числе шагов обучения выглядит следующим образом:

$$p_{i^*}/(1 + p_{i^*}) \rightarrow 1.$$

При этом коррекция матрицы $\|V\|$ прекращается, так как значения критериев подобия в левой части неравенств не превышают единицы:

$$a_{\alpha j} \leq 1, a_{cj} \leq 1.$$

```

// Параметры алгоритма
private static final double B = 0.8; // Порог критерия подобия
private static final double[][] V = new double[/* количество эталонов */][/* размер
входного вектора */]; // матрица эталонов
private static final int[] p = new int[/* */]; // массив счетчиков успешных откликов
private static final double[] alpha = new double[/* */]; // коэффициенты взвешивания
private static final double[] x = new double[/* */]; // текущий входной вектор
// Метод для нормализации вектора
private static double[] normalize(double[] vec) {
    double norm = 0.0;
    for (double v : vec) {
        norm += v * v;
    }
    norm = Math.sqrt(norm);
    double[] normalized = new double[vec.length];
    for (int i = 0; i < vec.length; i++) {
        normalized[i] = vec[i] / norm;
    }
    return normalized;
}
// Метод для вычисления скалярного произведения двух векторов
private static double dotProduct(double[] v1, double[] v2) {
    double sum = 0.0;
    for (int i = 0; i < v1.length; i++) {
        sum += v1[i] * v2[i];
    }
    return sum;
}
// Основной метод шага обучения
public static void trainStep(double[] xInput) {
// 1. Определяем и запоминаем вектор отклика Xo модели на вход X
    double[] normalizedX = normalize(xInput);
    double[] Xo = new double[V.length]; // вектор отклика
    for (int i = 0; i < V.length; i++) {
        double[] normalizedV = normalize(V[i]);
        Xo[i] = dotProduct(normalizedV, normalizedX);
    }
// 2. Выделяем подмножество нейронов-претендентов с Xo > 0
    int iStar = -1;
    double maxActivation = -Double.MAX_VALUE;
    for (int i = 0; i < Xo.length; i++) {
        if (Xo[i] > 0 && Xo[i] > maxActivation) {
            maxActivation = Xo[i];
            iStar = i;
        }
    }
    if (iStar == -1) {
        return;
    }
// 3. Находим наиболее активный нейрон i* по скалярному произведению
    int selectedNeuron = -1;
    double maxScalarProduct = -Double.MAX_VALUE;
    for (int i = 0; i < V.length; i++) {
        double[] normalizedV = normalize(V[i]);
        double scalarProd = dotProduct(normalizedV, normalizedX);
        if (scalarProd > maxScalarProduct) {
            maxScalarProduct = scalarProd;
            selectedNeuron = i;
        }
    }
// 4. Проверяем критерий подобия ai* <= b
    double aiStar = maxScalarProduct; // предполагаем, что это мера подобия
    if (aiStar > B) {
        return;
    }
// 5. Запись входного вектора в матрицу эталонов ||V||
    int m = /* текущее число кодов */;
    p[iStar]++;
// 6. Увеличиваем на 1 счетчик p[i*]
    p[iStar]++;
// 7. Вычисляем вектор A_э^t ...
}

```

Рис. 1. Фрагмент кода алгоритма самообучения**Fig. 1.** Fragment of the self-learning algorithm programming code

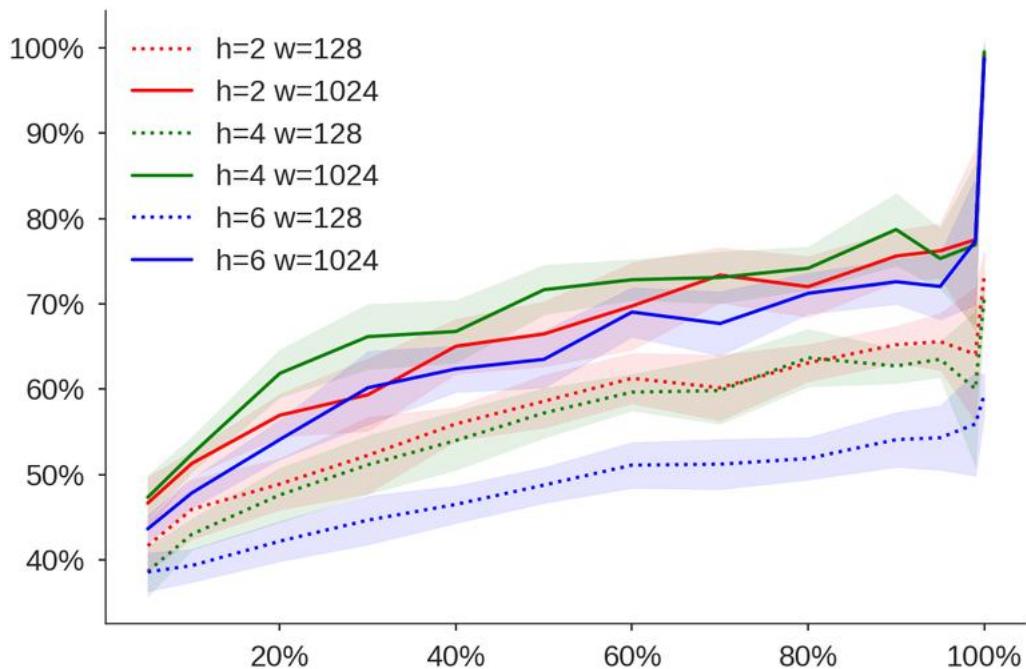


Рис. 2. Зависимость качества обучения от слоёв и объёма выборки

Fig. 2. Dependence of training quality on layers and sample size

Выводы

Сходимость проверена путём моделирования алгоритма [19, 20] на типовом ПЭВМ с процессором с максимально низкими на текущий момент характеристиками (Intel Core2 Duo E8400) при имитации обучения на звукотипах речевых сигналов, представленных в полярных координатах и в растровом формате. При относительно высоких искажениях и вариациях входного образа процесс обучения завершался за 15 шагов

на 50 входных векторах с накоплением в памяти $m=6$, принадлежащих одному классу образов (рис. 2).

Требуемая ёмкость памяти для хранения матрицы $\|V\|$ может быть уменьшена в несколько раз без снижения достоверности классификации путём повторного самообучения с использованием содержимого памяти m накопленных и откорректированных кодов первого приближения эталонных векторов в качестве обучающей выборки.

Список литературы

- Бобырь М.В., Кулабухов С.А., Милостная Н.А. Обучение нейро-нечеткой системы на основе метода разности площадей // Искусственный интеллект и принятие решений. 2016. №4. С. 15-26.
- Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: an overview // Neural networks. 2015. Vol. 61. P. 85-117.

3. Емельянов С.Г., Бобырь М.В., Анциферов А.В. Алгоритм самообучения адаптивных нейро-нечетких систем на основе мягких вычислений // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013. №8. С. 3-9.
4. Малышев А.В., Типикин А.П., Тараненко К.Ю. Самообучение автоассоциативной модели нейронной сети высокого порядка // Известия Курского государственного технического университета. 1998. №2. С. 63-68.
5. Ashwin P., Coombes S., Nicks R. Mathematical frameworks for oscillatory network dynamics in neuroscience // Journal of mathematical neuroscience. 2016. Vol. 6. P. 1-92.
6. Malyshev A., Novikova A. Neural algorithm of reconfiguration for matrix multiprocessor // International Conference «Modern trends in education and science». Tambov, 2014. P. 10-11.
7. Бобырь М.В. Обучение нейро-нечётких систем. М.: Аргамак-Медиа, 2017. 240 с.
8. Coexisting multi-stable patterns in memristor synapse-coupled Hopfield neural network with two neurons / C. Chen, J. Chen, M. Chen, B. Bao, H. Bao // Nonlinear dynamics. 2019. Vol. 95. P. 3385-3399.
9. Малышев А.В., Алексеев А.Е., Геворкян А.Ю. Распознавание и отслеживание объектов посредством инструментов нейросетевых моделей // Программная инженерия: современные тенденции развития и применения: материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции. Курск, 2024. С. 97-101.
10. Design and analysis of multiscroll memristive Hopfield neural network with adjustable memductance and application to image encryption / Q. Lai, ZH. Wan, H. Zhang, G. Chen // IEEE Transactions on neural networks and learning systems. 2023. Vol. 34. P. 7824-7837.
11. Danca M., Kuznetsov N. Hidden chaotic sets in a Hopfield neural system // Chaos, solitons & fractals. 2017. Vol. 103. P. 144-150.
12. Quantum Hopfield neural network / P. Rebentrost, T. Bromley, C. Weedbrook, S. Lloyd // Physical review. 2018. Vol. 98. P. 042308.
13. Малышев А.В., Глухов Н.К. Применение искусственного интеллекта для анализа жизненного цикла технологического проекта // Молодёжь и XXI век: материалы 13-й Международной научной конференции. Курск, 2024. С. 348-351.
14. Ong B., Sugiura K., Zettsu K. Dynamically pre-trained deep recurrent neural networks using environmental monitoring data for predicting // Neural computing & applications. 2016. Vol. 27. P. 1553-1566.
15. Malyshev A., Krylov P., Volodin O. Metaheuristic analytical instruments in optimizing the shopping center parking area: a transportation model // International journal of advanced science and technology. 2019. Vol. 28. P. 198-207.
16. Разработка интеллектуальной системы для прогнозирования рисков сердечно-сосудистых заболеваний / А.В. Малышев, Е.И. Пузырев, М.В. Прохоров, Н.Г. Нефедов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вы-

числительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 3. С. 46-61. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-46-61>

17. Дзюбин И.А., Малышев А.В. Способы оптимизации высоконагруженных приложений // Программная инженерия: современные тенденции развития и применения: материалы V Всероссийской научно-практической конференции. Курск, 2021. С. 12-20.

18. Чаплыгин А.А., Малышев А.В. Операционная система с ядром на основе виртуальной машины с уменьшенным набором команд // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, №1. С. 8-20.

19. Малышев А.В., Родин А.А., Сабуров В.Г. Проектирование системы автоматизированного перевода для мобильных устройств // Программная инженерия: современные тенденции развития и применения: материалы Всероссийской научной конференции. Курск, 2017. С. 143-147.

20. Воробьёва И.С., Псарёва А.Д., Малышев А.В. Методы семантической кластеризации текстов // Программная инженерия: современные тенденции развития и применения: материалы V Всероссийской научно-практической конференции. Курск, 2021. С. 81-84.

References

1. Bobyr M., Kulabukhov S., Milostnaya N. Training a neuro-fuzzy system based on the area difference method. *Iskusstvennyi intellect i prinyatie resheniy = Artificial Intelligence and Decision Making*. 2016; (4): 15-26. (In Russ.).
2. Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: an overview. *Neural networks*. 2015; 61: 85-117. (In Russ.).
3. Emelianov S., Bobyr M., Antsiferov A. Self-learning algorithm for adaptive neuro-fuzzy systems based on soft computing. *Informatsionno-izmeritelnye i upravlyayushie sistemy = Information, measuring and control systems*. 2013; (8): 3-9. (In Russ.).
4. Malyshev A., Tipikin A., Taranenko K. Self-training of an autoassociative model of a high-order neural network. *Izvestiya Kurskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceeding of Kursk State Technical University*. 1998; (2): 63-68. (In Russ.).
5. Ashwin P., Coombes S., Nicks R. Mathematical frameworks for oscillatory network dynamics in neuroscience. *Journal of mathematical neuroscience*. 2016; 6: 1-92.
6. Malyshev A., Novikova A. Neural algorithm of reconfiguration for matrix multiprocessor. In: *International Conference «Modern trends in education and science»*. Tambov; 2014. P. 10-11.
7. Bobyr M. Training of neuro-fuzzy systems. Moscow: Argamak-Media; 2017. 240 p. (In Russ.).

8. Chen C., Chen J., Chen M., Bao B., Bao H. Coexisting multi-stable patterns in memristor synapse-coupled Hopfield neural network with two neurons. *Nonlinear dynamics*. 2019; 95: 3385-3399.
9. Malyshev A., Alekseev A., Gevorkyan A. Recognition and tracking of objects using neural network model tools. In: *Programmnaya inzheneriya: sovremennoye tendentsii razvitiya i primeneniya: materialy VIII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Proceedings of the VIII All-Russian scientific and practical conference «Software engineering: modern trends in development and application»*. Kursk; 2024. P. 97-101. (In Russ.).
10. Lai Q., Wan ZH., Zhang H., Chen G. Design and analysis of multiscroll memristive Hopfield neural network with adjustable memductance and application to image encryption. *IEEE Transactions on neural networks and learning systems*. 2023; 34: 7824-7837.
11. Danca M., Kuznetsov N. Hidden chaotic sets in a Hopfield neural system. *Chaos, solitons & fractals*. 2017; 103: 144-150.
12. Rebentrost P., Bromley T., Weedbrook C., Lloyd S. Quantum Hopfield neural network. *Physical review*. 2018; 98: 042308.
13. Malyshev A., Glukhov N. Application of artificial intelligence for the analysis of the life cycle of a technological project. In: *Molodezh' i XXI vek: materialy 13-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii = Proceedings of the 13th International Scientific Conference «Youth and the 21st Century»*. Kursk; 2024. P. 348-351. (In Russ.).
14. Ong B., Sugiura K., Zettsu K. Dynamically pre-trained deep recurrent neural networks using environmental monitoring data for predicting. *Neural computing & applications*. 2016; 27: 1553-1566.
15. Malyshev A., Krylov P., Volodin O. Metaheuristic analytical instruments in optimizing the shopping center parking area: a transportation model. *International journal of advanced science and technology*. 2019; 28: 198-207.
16. Malyshev A.V., Puzyrev E.I., Prokhorov M.V., Nefedov N.G. The Program of the Cardiovascular Disease Risk Prediction System. *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*. 2022;12(3):46-61. (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-46-61>
17. Dzyubin I., Malyshev A. Methods for optimizing highly loaded applications. In: *Materialy V Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Programmnaya inzheneriya: sovremennoye tendentsii razvitiya i primeneniya» = Proceedings of the V All-Russian scientific and practical conference «Software engineering: modern trends in development and application»*. Kursk; 2021. P. 12-20. (In Russ.).
18. Chaplygin A., Malyshev A. An operating system with a kernel based on a virtual machine with a reduced instruction set. *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*. 2023; 29(3): 210-221. (In Russ.).

siteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering, 2020; 10(1): 8-20. (In Russ.).

19. Malyshev A., Rodin A., Saburov V. Design of an automated translation system for mobile devices. In: *Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii «Programmnaya inzheneriya: sovremennye tendentsii razvitiya i primeneniya» = Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference «Software engineering: modern trends in development and application»*. Kursk; 2017. P. 143-147. (In Russ.).

20. Vorobyova I., Psareva A., Malyshev A. Methods of semantic clustering of texts. In: *Materialy V Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Programmnaya inzheneriya: sovremennye tendentsii razvitiya i primeneniya» = Proceedings of the V All-Russian scientific and practical conference «Software engineering: modern trends in development and application»*. Kursk; 2021. P. 81-84. (In Russ.).

Информация об авторе / Information about the Author

Малышев Александр Васильевич, кандидат технических наук, доцент, завкафедрой программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: alta76@yandex.ru

Aleksandr V. Malyshev, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Software Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: alta76@yandex.ru

К сведению авторов

1. К публикации в журнале «Известия Юго-Западного государственного университета» принимаются актуальные материалы, содержащие новые результаты научных и практических исследований, соответствующие профилю журнала, не опубликованные ранее и не переданные в редакции других журналов.

2 Авторы статей должны представить в редакцию журнала:

- статью, оформленную в соответствии с правилами оформления статей, представляемых для публикации в журнале;

- разрешение на опубликование в открытой печати статьи от учреждения, в котором выполнена работа.

- сведения об авторах (фамилия, имя отчество, место работы, должность, ученая степень, звание, почтовый адрес, телефон, e-mail);

- лицензионный договор.

3. Бумажный вариант статьи подписывается всеми авторами.

4. Редакция не принимает к рассмотрению рукописи, оформленные не по правилам.

5. Публикация бесплатная.

6. Основной текст рукописи статьи (кроме аннотации и ключевых слов) набирают в текстовом редакторе MS WORD шрифтом «Times New Roman» размером 14 пт с одинарным интервалом, выравнивание по ширине. Поля с левой стороны листа, сверху и снизу – 2,5 см, с правой стороны – 2 см. Абзацный отступ – 1,5 см.

7. Схема построения публикации: УДК (индекс по универсальной десятичной классификации), фамилия и инициалы автора(ов) с указанием ученой степени, звания, места работы (полностью), электронного адреса (телефона), название (строчные), аннотация и ключевые слова, текст с рисунками и таблицами, список литературы. Авторы, название, аннотация и ключевые слова, список литературы приводятся на русском и английском языках.

Перед основным текстом печатается аннотация (200-250 слов), отражающая краткое содержание статьи.

8. При формировании текста не допускается применение стилей, а также внесение изменения в шаблон или создание собственного шаблона. Слова внутри абзаца следует разделять одним пробелом; набирать текст без принудительных переносов; не допускаются разрядки слов.

9. Для набора формул и переменных следует использовать редактор формул MathType версии 5.2 и выше с размерами: обычный – 12 пт; крупный индекс 7 пт, мелкий индекс – 5 пт; крупный символ – 18 пт; мелкий символ – 12 пт.

Необходимо учитывать, что **полоса набора – 75 мм**. Если формула имеет больший размер, ее необходимо упростить или разбить на несколько строк. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**

Все русские и греческие буквы (Ω , η , β , μ , ω , ν и др.) в формулах должны быть набраны прямым шрифтом. Обозначения тригонометрических функций (\sin , \cos , \tg и т.д.) – прямым шрифтом. Латинские буквы – прямым шрифтом.

Статья должна содержать лишь самые необходимые формулы, от промежуточных выкладок желательно отказаться.

10. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

11. Рисунки и таблицы располагаются по тексту. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Иллюстрации, встраиваемые в текст, должны быть выполнены в одном из стандартных форматов (TIFF, JPEG, PNG) с разрешением не ниже 300 dpi и публикуются в черно-белом (градации серого) варианте. Качество рисунков должно обеспечивать возможность их полиграфического воспроизведения без дополнительной обработки. **Рисунки, выполненные в MS Word, недопустимы.**

Рисунки встраиваются в текст через опцию «Вставка-Рисунок-Из файла» с обтеканием «В тексте» с выравниванием по центру страницы без абзацного отступа. Иные технологии вставки и обтекания **не допускаются**.

12. **Список литературы к статье обязательен** и должен содержать все цитируемые и упоминаемые в тексте работы (не менее 10). Пристатейные библиографические списки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». Ссылки на работы, находящиеся в печати, не допускаются. При ссылке на литературный источник в тексте приводится порядковый номер работы в квадратных скобках.

13. В материале для публикации следует использовать только общепринятые сокращения.

Все материалы направлять по адресу: <https://science.swsu.ru/>, 305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, 94. ЮЗГУ, редакционно-издательский отдел.

Тел.(4712) 22-25-26.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Изменения и дополнения к правилам оформления статей и информацию об опубликованных номерах можно посмотреть на официальном сайте журнала: <https://science.swsu.ru>.