

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия
Юго-Западного
государственного
университета

Научный журнал

Том 29 № 2 / 2025



Proceedings
of the Southwest
State University

Scientific Journal

Vol. 29 № 2 / 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);

Бхатгачарья 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);

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

Езов 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);

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

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

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

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 по лицензии 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 23.07.2025.

Дата выхода в свет 29.09.2025. Формат 60x84/8.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 25,7.

Тираж 1000 экз. Заказ 39.

16+

Proceedings of the Southwest State University



Peer-reviewed scientific journal

Published since 1997

Before 2011

“Proceedings of the Kursk State Technical University”

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

The journal publishes scientific articles 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. Bulychov, 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);

Grigori 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. Zhusubaliyev, 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 №ФЦ77-85895 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

of the Southwest State University,

50 Let Oktyabrya str. 94,

Kursk 305040, Russian Federation

Subscription and distribution:

the journal is distributed by subscription.

Subscription index 41219

in the General Catalogue “Pressa Rossii”

Publication frequency: quarterly

Free price

Original lay-out design: E. Mel'nik

16+

© Southwest State University, 2025



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

Singed to print 23.07.2025.

Release date 29.09.2025. Format 60x84/8.

Offset paper. Printer's sheets 25,7.

Circulation 1000 copies. Order 39.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Оригинальные статьи

Исследование прочности сварной конструкции «промышленный счетчик газа» при нагружении внутренним статическим давлением в программном комплексе APM FEM..... 8

Григорьев И. Ю.

СТРОИТЕЛЬСТВО

Оригинальные статьи

Совершенствование системы водяного капиллярного отопления 24

Корянов А.В., Зайцев О.Н., Бурцев А.П., Бурцев А.П.

Моделирование газовых потоков для оценки эффективности улавливания испарений от промышленных ванн 37

Марков Н.А., Угорова С.В.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Оригинальные статьи

Математическое моделирование системы автоматического регулирования численным интегрированием 55

Хандожко В. А., Федонин О. Н., Матлахов В. П., Хандожко А. В.

Метод мониторинга состояния дорожного покрытия на основе сигналов акселерометра и аппарата нечеткой логики 71

Баданис К. Е., Фирсов Н. Ю., Шамраев А. А.

Байесовский алгоритм классификации в задаче реидентификации личности..... 92

Русаков К. Д.

Формирование индивидуальной образовательной траектории в онлайн обучении на основе технологий скрытых марковских моделей 109

Бурукина И.П., Горшенин Л.Н.

Повышение скорости вейвлет-обработки изображений на основе метода Винограда с учетом децимации 130

Ляхов П. А.

Автоматизированная генерация презентаций на основе когнитивно-эстетической парадигмы.... 146

Зоткина А. А., Мартышкин А. И., Павлов А. А., Ткаченко А. В.

Автоматизация процесса прогнозирования данных 166

Иващук О. А., Иващук О. Д., Игрюнова С. В., Нестерова Е. В., Маматов А. В.

Программное обеспечение для преобразования двумерных изображений в трехмерные модели 186

Зоткина А. А.

Оценка производительности вычислительной системы 201

Петушков Г. В.

К сведению авторов 221

CONTENT

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original articles

Study of the strength of the welded structure "industrial gas meter" under loading with internal static pressure in the APM FEM software package	8
---	----------

Grigorov I. Yu.

CONSTRUCTION

Original articles

Improvement of the water capillary heating system	24
--	-----------

Koroyanov A.V., Zaitsev O.N., Burtsev A.P., Burtsev A.P.

Modeling gas flows to assess the efficiency of vapor capture from industrial tanks	37
---	-----------

Markov N. A., Ugorova S. V.

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Original articles

Mathematical modeling of automatic control system by numerical integration.....	55
--	-----------

Khandozhko V. A., Fedonin O. N., Matlakhov V. P., Khandozhko A. V.

Method of monitoring the condition of road surface based on accelerometer signals and fuzzy logic apparatus	71
--	-----------

Badanis K. Ye., Firsov N. Yu., Shamraev A. A.

Bayesian classification algorithm in the person re-identification task.....	92
--	-----------

Rusakov K. D.

Individual educational trajectory in online learning based on hidden Markov model technologies.....	109
--	------------

Burukina I. P., Gorshenin L. N.

Increasing the speed of wavelet image processing based on the Winograd method taking into account decimation	130
---	------------

Lyakhov P. A.

Automated generation of presentations based on the cognitive-aesthetic paradigm.....	146
---	------------

Zotkina A. A., Martyshkin A. I., Pavlov A. A., Tkachenko A. V.

Automation of predicting the risk of osteoporosis	166
--	------------

Ivashchuk O. A., Ivashchuk O. D., Igrunova S. V., Nesterova E. V., Mamatov A. V.

Software for converting two-dimensional images into three-dimensional models	186
---	------------

Zotkina A. A.

Computational system performance evaluation	201
--	------------

Petushkov G. V.

Information of the authors	221
---	------------

УДК 621.795.75-52

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-8-23>



Исследование прочности сварной конструкции «промышленный счетчик газа» при нагружении внутренним статическим давлением в программном комплексе APM FEM

И. Ю. Григоров ¹ ✉

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

✉ e-mail: grigorov.ighor@mail.ru

Резюме

Целью исследования является выявление зон наибольших напряжений при действии внутреннего статического давления, оценка предельных состояний конструкции, а также проверка соответствия её прочностным критериям.

Методы. В данной статье используется расчет методом конечных элементов сварной конструкции промышленного счетчика газа в программном комплексе APM FEM для КОМПАС-3D v23.0.0.8. Конструкция моделировалась в программе КОМПАС V23, сварные швы конструкции по ГОСТ 16037-80-С17-ЗП и ГОСТ 16037-80-У19-ЗП смоделированы с помощью приложения «Неразъемные соединения». В местах расположений сварных швов было применено преобразование швов в тело, для учета их при генерации сетки конечных элементов.

Результаты. На основании проведенного анализа можно утверждать, что конструкция обладает высоким запасом прочности и жёсткости в условиях как нормативных, так и критических нагрузок. Допустимые значения перемещений и коэффициентов запаса подтверждают её надёжность и работоспособность в реальных условиях эксплуатации, включая испытательные режимы. Таким образом, конструкция может быть рекомендована к изготовлению без необходимости внесения изменений в её геометрию или методику сварки.

Заключение. Проведённый численный прочностной анализ сварной конструкции корпуса промышленного газового счётчика с использованием программного комплекса APM FEM показал, что при всех уровнях нагружения, включая испытательное давление до 30 Н/мм², конструкция сохраняет прочностную и геометрическую устойчивость. Полученные значения эквивалентных напряжений и коэффициентов запаса соответствуют требованиям нормативных документов, включая ГОСТ 34233.1–2017. Локальные перемещения конструкции не превышают допустимых значений, что свидетельствует о высокой жёсткости и отсутствии рисков пластической деформации при эксплуатации.

Ключевые слова: сварная конструкция; нагрузка давлением; программный комплекс APM FEM; распределение напряжений; промышленный счетчик газа.

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

Для цитирования: Григоров И. Ю. Исследование прочности сварной конструкции «промышленный счетчик газа» при нагружении внутренним статическим давлением в программном комплексе APM FEM // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(2): 8-23. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-8-23>.

Поступила в редакцию 05.03.2025

Подписана в печать 27.05.2025

Опубликована 23.07.2025

Study of the strength of the welded structure "industrial gas meter" under loading with internal static pressure in the APM FEM software package

Igor Yu. Grigorov¹ ✉

² Southwest State University

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

✉ e-mail: grigorov.ighor@mail.ru

Abstract

Purpose of research is to identify zones of greatest stress under the action of internal static pressure, assess the limit states of the structure, and check its compliance with strength criteria.

Methods. This article uses the finite element calculation of a welded structure of an industrial gas meter in the APM FEM software package for KOMPAS-3D v23.0.0.8. The structure was modeled in the KOMPAS V23 program, the welds of the structure according to GOST 16037-80-C17-ZP and GOST 16037-80-U19-ZP were modeled using the "Permanent Joints" application. In places where welds are located, the transformation of welds into a body was applied to take them into account when generating a finite element mesh.

Results. Based on the analysis, it can be stated that the structure has a high margin of safety and rigidity under both standard and forced loads. The permissible values of displacements and safety factors confirm its reliability and operability under real operating conditions, including test modes. Thus, the structure can be recommended for manufacturing and subsequent testing without the need to make changes to its geometry or welding method.

Conclusion. The numerical strength analysis of the welded structure of an industrial gas meter housing, performed using the APM FEM module for KOMPAS-3D, confirmed the structural integrity under all pressure conditions, including test pressure up to 30 N/mm². The obtained von Mises stress values and safety factors meet the requirements of applicable regulatory standards, including GOST 34233.1–2017 and PB 03-576–03. The total displacements remain within acceptable limits, indicating high stiffness and the absence of plastic deformation risks during operation.

Keywords: welded structure; pressure load; APM FEM software package; stress distribution; industrial gas meter.

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

For citation: Grigorov I. Yu. Study of the strength of the welded structure "industrial gas meter" under loading with internal static pressure in the APM FEM software package. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(2): 8-23 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-8-23>.

Received 05.03.2025

Accepted 27.05.2025

Published 23.07.2025

Введение

В современных инженерных задачах прочностной анализ конструкций становится особенно актуальным в условиях сложной геометрии, значительных размеров и эксплуатации в экстремальных режимах. Проведение натурных и даже полунатурных испытаний в таких условиях сопряжено с существенными материальными затратами и техническими трудностями, особенно при необходимости определения предельных (разрушающих) нагрузок. Особое внимание при расчётах уделяется сварным соединениям, поскольку именно в этих зонах наиболее часто наблюдаются концентрации напряжений, способные привести к разрушению конструкции. В работах [1-3] описаны методы проведения подобных испытаний, однако малоизученным является вопрос об изменении прочностных характеристик конструкции в целом, учитывая все сварные швы.

Ультразвуковой промышленный счетчик газа предназначен для коммерческого либо технологического измерения (учета) объемов плавно меняющегося потока очищенного неагрессивного, неоднородного по химическому составу природного газа, а также воздуха, азота и других неагрессивных газов, при использовании их в промышленных установках, магистральных трубопроводах, а также в системах энергоснабжения. Счетчики мо-

гут применяться на опасных производственных объектах, в том числе в нефтеперерабатывающей, нефтехимической, химической, газовой и других отраслях промышленности.

Корпус счетчика промышленного газа выполнен из трубы 159×8 стальной бесшовной горячедеформированной. Материал – 09Г2С. Сортамент должен соответствовать ГОСТ 8732-78. Химический состав, механические свойства материала должны соответствовать ГОСТ 19281-89.

Составные части корпуса счетчика газа соединяют замкнутые по контуру сварные швы.

– Сварные швы, соединяющие фланцы и трубу 159×8 – кольцевые стыковые, положение сварки – нижнее.

– Сварные швы, соединяющие патрубки и трубу 159×8, криволинейные угловые, положение сварки – горизонтальное.

– Сварные швы, соединяющие патрубки и трубу шейки и трубу 159×8 – криволинейные угловые, положение – горизонтальное.

Конструкция корпуса промышленного газового счетчика представлена на рис. 1.

Условия работы корпусов промышленных счетчиков характеризуются наличием внутреннего статического давления, действующего длительное время при нормальной или пониженной температуре.

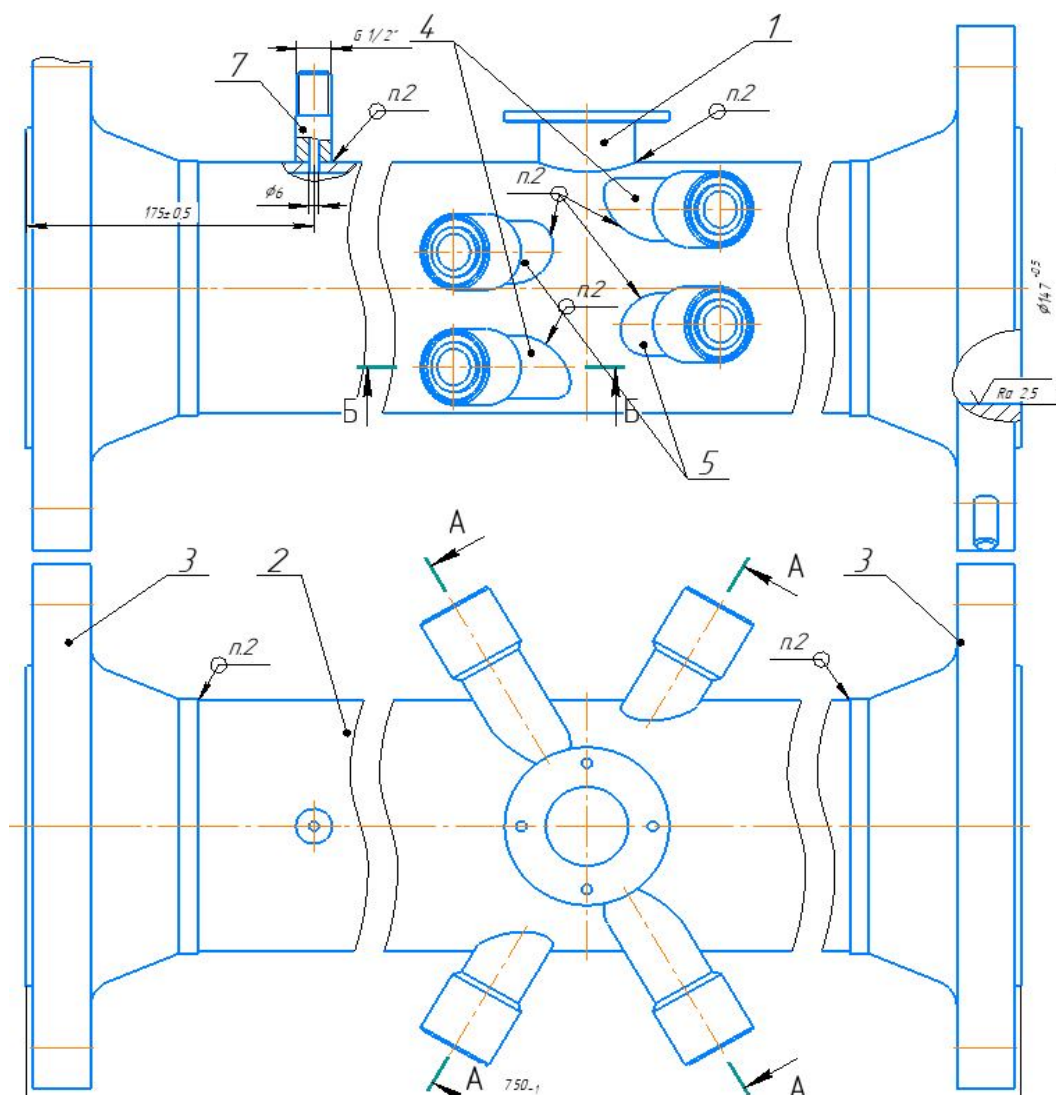


Рис. 1. Конструкция корпуса промышленного газового счетчика: 1 – шейка; 2 – труба 159x8 ГОСТ 8732-78; 3 – фланец 150-63-11-1-E-09Г2С-IV-d161 ГОСТ 12821-80; 4 – патрубки; 5 – патрубки; 7 – патрубок

Fig. 1. Industrial gas meter housing design: 1 – Neck; 2 – Pipe 159x8 GOST 8732-78; 3 – Flange 150-63-11-1-E-09G2S-IV-d161 GOST 12821-80; 4 – Branch pipes; 5 – Branch pipes; 7 – Branch pipe

Исследуемая конструкция представляет собой сложный сварной узел, состоящий из центрального цилиндра, фланцев и дополнительных соединений, выполненных с использованием сварочных технологий. Данный узел используется в условиях повышенного давления (до 150 атмосфер), что предъявляет жёсткие требования к выбору сварочных материалов,

качеству сварных соединений и форме конструкции. Подобные изделия отличаются высокой производительностью измерений и широкой универсальностью, что обуславливает значительный интерес к его применению в различных отраслях промышленности и служит основной причиной большого количества научных исследований в этой области [4–19].

Целью работы является поиск критических значений прочности конструкции при испытательном давлении от минимального до максимального рабочего и превышающего его, с использованием методов численного моделирования.

Материалы и методы

Конструкция моделировалась в программе КОМПАС V23, сварные швы конструкции по ГОСТ 16037-80-С17-3П и ГОСТ 16037-80-У19-3П смоделированы с помощью приложения «Неразъемные соединения». В местах расположений сварных швов было применено преобразова-

ние швов в тело, для учета их при генерации сетки.

Исследование внутренним статическим давлением проводилось в приложении АРМ FEM для КОМПАС-3D v23.0.0.8 с приложением различного тестового давления от 10 до 300 атм. Испытания проводились для выявления максимальных напряжений в конструкции и в сварных соединениях.

Созданная трёхмерная модель конструкции, на которую наложены граничные условия и приложены силы, соответствующие давлению испытаний показана на рис. 2.



Рис. 2. Трёхмерная модель корпуса промышленного счетчика газа

Fig. 2. 3D model of industrial gas meter housing

Закрепление модели – ограничение перемещения и вращения относительно координатных осей X, Y, Z торцевых по-

верхностей присоединительных фланцев, показано на рис. 3.



Рис. 3. Закрепление корпуса промышленного счетчика газа

Fig. 3. Fastening the housing of an industrial gas meter

Параметры сетки конечных элементов представлены в табл. 1.

Внешний вид сгенерированной сетки конечных элементов представлен на рис. 4.

В качестве материала для конструкции корпуса промышленного счетчика газа в приложении APM FEM для КОМПАС-3D v23.0.0.8 был принят материал, свойства которого приведены в табл. 2.

Таблица 1. Параметры сетки конечных элементов

Table 1. Finite element mesh parameters

Наименование параметра / Parameter Name	Значение параметра / Parameter value
Тип элементов	Твердотельные 10-узловые тетраэдры
Значения	Абсолютные
Средняя длина стороны элемента, мм	10
Минимальная длина стороны элемента, мм	2
Максимальный коэффициент разрежения на поверхности	1.2
Коэффициент разрежения в объеме	1.5
Тип сетки	Сглаженная адаптивная
Угловой шаг, градус	18

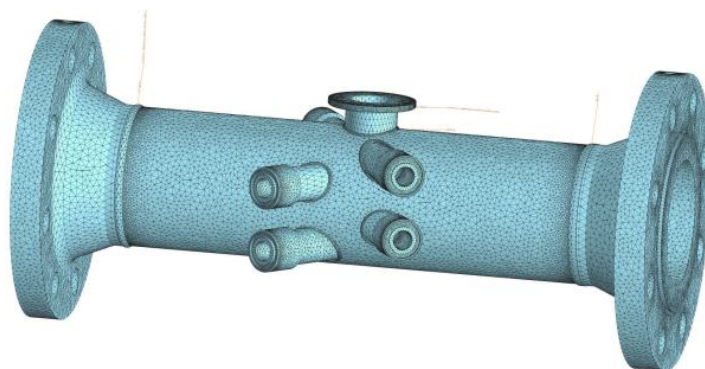


Рис. 4. Внешний вид сетки конечных элементов

Fig. 4. Appearance of the finite element mesh

Таблица 2. Свойства материала конструкции

Table 2. Properties of the construction material

Предел текучести, Н/мм ²	235
Предел прочности при растяжении, Н/мм ²	410
Модуль упругости, Н/мм ²	200000
Коэффициент Пуассона	0,3
Массовая плотность, кг/м ³	7.80000111144041e-06
Предел выносливости при растяжении, Н/мм ²	209
Предел выносливости при кручении, Н/мм ²	139

В рамках численного моделирования прочности корпуса промышленного счетчика газа при воздействии внутреннего статического давления была получена эпюра распределения эквивалентных напряжений по Мизесу (рис. 5).

Значения действующего статического давления на внутренние стенки конструкции и максимальные значения напряжения в конструкции приведены в табл. 3.

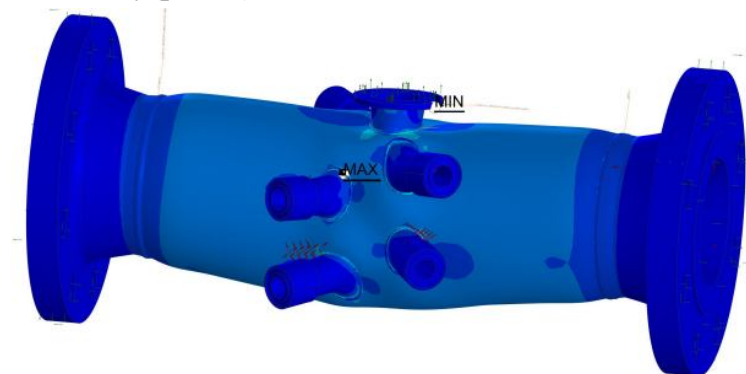


Рис. 5. Эпюра распределения напряжений в корпусе промышленного счетчика газа по Мизесу

Fig. 5. The stress distribution diagram in the housing of an industrial gas meter according to von Mises

Таблица 3. Значения заданного давления и максимальное напряжение

Table 3. Values of set pressure and maximum voltage

Давление, Н/мм ² / Pressure, N/mm ²	Эквивалентное напряжение по Мизесу, (SVM), Н/мм ² / Mises equivalent voltage, (SVM), N/mm ²
1	9.059065
5	45.298165
7	63.41781
9	81.529745
11	99.656465
13	117.765354
15	135.906858
20	181.167336
30	271.766378

Анализ полученных данных эквивалентных напряжений по Мизесу показал, что при достижении давления 30 Н/мм² напряжения достигают 271.77 Н/мм², что остаётся ниже предела прочности материала (410 Н/мм²), однако превышает предел текучести (235 Н/мм²), что указывает

на возможность возникновения остаточных деформаций. В соответствии с нормативными требованиями [20], рабочее давление не должно превышать 15 Н/мм², при котором минимальный коэффициент запаса по текучести составляет 1.73. Нагрузки выше 20 Н/мм² приводят к

недопустимым деформациям, что подтверждает необходимость ограничения давления в эксплуатации до пределов упругой зоны.

При исследовании прочности корпуса промышленного счетчика газа, под воздействием внутреннего статического

давления была получена эпюра распределения суммарного линейного перемещения узлов сетки конечных элементов (рис. 6).

Числовые показатели суммарного линейного перемещения узлов сетки конечных элементов представлены в табл. 4.

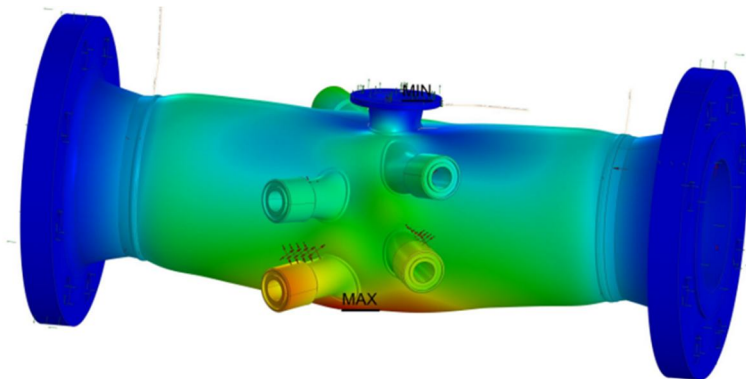


Рис. 6. Эпюра распределения суммарного линейного перемещения узлов сетки конечных элементов

Fig. 6. Distribution diagram of the total linear displacement of the nodes of the finite element mesh

Таблица 4. Значения заданного давления и суммарного линейного перемещения узлов сетки конечных элементов

Table 4. Values of the specified pressure and the total linear displacement of the finite element mesh nodes

Давление, Н/мм ² / Pressure, N/mm ²	Суммарное линейное перемещение узлов сетки конечных элементов, (USUM), мм / Total linear displacement of the nodes of the finite element grid, (USUM), mm
1	0,000238
5	0,001189
7	0,001665
9	0,002141
11	0,002617
13	0,003092
15	0,003569
20	0,004757
30	0,007136

В результате конечно-элементного анализа установлено, что максимальные суммарные линейные перемещения узлов сетки конечных элементов (USUM)

составляют 0.0071 мм при 30 Н/мм², при рабочих режимах перемещения не превышают 0.0035 мм. Допустимые перемещения для подобных конструкций,

согласно рекомендациям из [20], могут составлять до 1 мм, если они не влияют на работу фланцевых соединений. Следовательно, жёсткость конструкции можно признать высокой, а влияние деформаций – незначительным.

Наибольшие локальные смещения наблюдаются в центральной зоне конструкции, ниже пересечения сварки патрубков, однако их величина не превышает 1 мм, что подтверждает работоспособность конструкции.

Суммарное линейное перемещение узлов сетки конечных элементов конструкции при рабочих нагрузках не превышает 0.0071 мм, что значительно ниже общепринятых допусков.

На рис. 7 представлена эпюра распределения коэффициента запаса по пределу текучести.

Показатели коэффициента запаса по пределу текучести представлены в табл. 5.

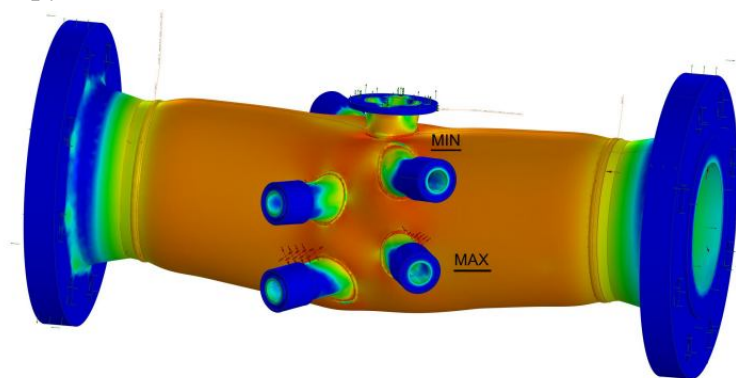


Рис. 7. Эпюра распределения коэффициента запаса по пределу текучести

Fig. 7. Distribution diagram of the safety factor for yield strength

Таблица 5. Значения заданного давления и показатели коэффициента запаса по пределу текучести

Table 5. Values of the specified pressure and indicators of the safety factor for the yield strength

Давление, Н/мм ² / Pressure, N/mm ²	Коэффициент запаса по пределу текучести, (SVM, max-10) / Yield strength reserve ratio, (SVM, max-10)
1	9.448238
5	6.412233
7	6.008732
9	5.78464
11	5.641921
13	5.543212
15	5.080692
20	3.810543
30	2.540349

Расчеты показали, что коэффициент запаса по пределу текучести (SVM) варьируется в наиболее нагруженных зонах от 9.448238 до 2.540349. Ограничение максимального значения 10.0 исключает численные аномалии в областях, близких к идеальным закреплениям.

Минимальное значение коэффициента запаса по текучести составило 2.54 при испытательном давлении 30 Н/мм² и 5.08 при рабочем давлении 15 Н/мм².

Таким образом, даже при максимально возможной нагрузке (включая

испытания) конструкция сохраняет запас по текучести выше допустимого уровня $k \geq 2$, установленного в нормативных документах. Напряжения остаются в пределах упругой зоны, пластическая деформация не развивается.

На рис. 8 представлена эпюра распределения коэффициента запаса по пределу прочности.

Числовые показатели коэффициента запаса по пределу прочности представлены в табл. 6.

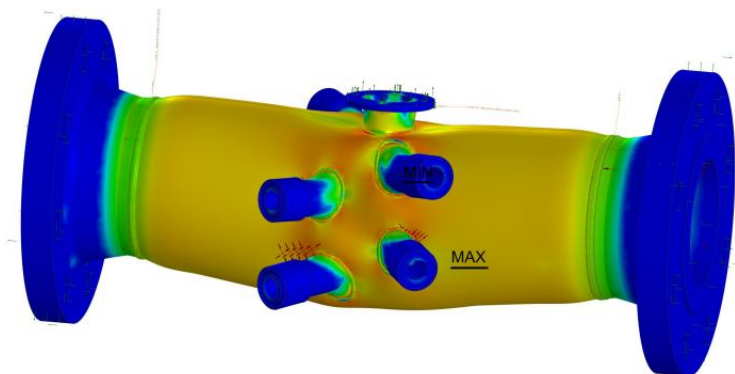


Рис. 8. Эпюра распределения коэффициента запаса по пределу прочности

Fig. 8. Distribution diagram of the safety factor for ultimate strength

Таблица 6. Значения заданного давления и коэффициент запаса по пределу прочности

Table 6. Values of the specified pressure and the safety factor for the ultimate strength

Давление, Н/мм ² / Pressure, N/mm ²	Коэффициент запаса по пределу прочности, (SVM, max-10) / Coefficient of margin of ultimate strength, (SVM, max-10)
1	9.782032
5	7.463895
7	6.759915
9	6.368947
11	6.119947
13	5.947731
15	5.821225
20	5.616059
30	4.432099

Анализ показал, что коэффициент запаса по пределу прочности (SVM) варьируется в наиболее нагруженных зонах от 9.782032 до 4.432099. Допустимым считается значение запаса не менее 1.5 для расчётов на прочность при эксплуатации и не менее 1.0 при кратковременных испытаниях [20]. Следовательно, конструкция обладает высокой стойкостью к разрушению, в том числе в условиях нештатных перегрузок.

Результаты и их обсуждение

На основе численного моделирования напряжённо-деформированного состояния сварной конструкции корпуса промышленного газового счётчика при воздействии внутреннего статического давления получены количественные и качественные оценки прочностных характеристик изделия.

В диапазоне испытательных давлений от 1 до 30 Н/мм² проанализированы эквивалентные напряжения по Мизесу, суммарные линейные перемещения узлов сетки конечных элементов, а также коэффициенты запаса по пределу текучести и прочности. Согласно полученным данным, при максимальном давлении 30 Н/мм² эквивалентные напряжения достигают 271.77 Н/мм², что остаётся ниже предела прочности материала (410 Н/мм²), при этом коэффициент запаса по текучести составляет 2.54, а по прочности – 4.43. Эти значения свидетельствуют о наличии достаточного резерва надёжности даже в условиях перегрузки.

Суммарные линейные перемещения узлов сетки конечных элементов конструкции находятся в пределах от 0.0002 мм – при минимальной нагрузке до 0.0071 мм при максимальной. Эти показатели значительно ниже допустимых значений, регламентированных нормативным документом¹, что подтверждает высокую жёсткость конструкции и её способность сохранять геометрическую устойчивость в рабочих и предельных режимах. Наибольшие деформации выявлены в зоне пересечения патрубков, однако их значение не превышает установленных нормативных ограничений.

Эпюры коэффициентов запаса, полученные в ходе моделирования, указывают на локализацию наибольших нагрузок вблизи сварных соединений патрубков и фланцев. Тем не менее, ни одно из значений коэффициента не опускается ниже минимально допустимых нормативных уровней ($k \geq 2$ для условий эксплуатации, $k \geq 1$ для кратковременных испытаний).

Результаты моделирования находятся в соответствии с опубликованными данными по оценке прочности сварных соединений аналогичных конструкций в работах [1–3, 11–13], что подтверждает корректность принятых методических подходов и выбор программного обеспечения для инженерного анализа. Высокая сходимость резуль-

¹ ГОСТ 34233.1–2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2018. 42 с.

татов с нормативными критериями прочности позволяет рассматривать предложенную конструкцию как технологически зрелую и пригодную для промышленной реализации без необходимости дополнительных корректировок.

Выводы

Результаты проведенного численного анализа прочности сварной конструкции корпуса промышленного газового счётчика в программной среде АРМ FEM для КОМПАС-3D v23.0.0.8 позволяют сделать обоснованные выводы о её надёжности и устойчивости к внутренним статическим нагрузкам. Полученные данные свидетельствуют о том, что конструкция сохраняет прочностную и геометрическую стабильность при воздействии как нормативного, так и испытательного давления до 30 Н/мм², демонстрируя при этом высокие значения коэффициентов запаса по пределу текучести и прочности – в диапазоне 2.54–9.44 и 4.43–9.78 соответственно.

Максимальные значения эквивалентных напряжений и суммарных переме-

щений узлов сетки конечных элементов, рассчитанные в наиболее нагруженных зонах конструкции, не превышают допустимых пределов, установленных актуальным нормативно-техническим документом¹. Минимальное линейное перемещение узлов сетки конечных элементов конструкции составляет порядка 0.0071 мм при максимальной нагрузке, что подтверждает её высокую жёсткость и отсутствие склонности к развитию пластических деформаций.

Особое внимание в работе уделено моделированию сварных соединений, поскольку именно они, часто являются потенциальными зонами концентрации напряжений. Результаты анализа подтвердили корректность геометрических и конструктивных решений, обеспечивающих равномерное распределение напряжений.

Учитывая вышеизложенное, сварную конструкцию корпуса промышленного газового счётчика можно считать устойчивой к рабочим нагрузкам в условиях внутреннего статического давления.

Список литературы

1. Котельников А.А., Григоров И.Ю., Гречухин А.Н. Математическое моделирование в сварочном производстве. Курск, 2024.
2. Котельников А.А., Натаров А.С. Исследование распределения напряжений, возникающих при нагружении, в сварных соединениях методом конечных элементов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2019. Т.23, № 4. С. 19–30.

¹ ГОСТ 34233.1–2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2018. 42 с.

3. Котельников А. А., Абышев К. И., Алпеева Е. В. Применение метода конечных элементов в расчётах сварных конструкций. Курск, 2014. 125 с. EDN: SDMWBD
4. Анищенко Г. В. Расширение функциональных возможностей счетчика газа ТРСГ-ИРГА // СФЕРА. Нефтегаз. 2019. №6. С. 66–67.
5. Импульсный корреляционный расходомер газа с накладными датчиками / А.Д. Мансфельд, Г.П. Волков, Р.В. Беляев, А.Г. Санин, Д.В. Мороскин // Акустический журнал. 2023. Т. 69, №3. С. 374–385. <https://doi.org/10.31857/S0320791922700034>.
6. Анализ технико-экономических аспектов диагностики и ремонта газопроводов / И.И. Велиюлин, В.И. Городниченко, В.А. Александров, В.П. Сытов, А.С. Лопатин // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2022. Т. 6, № 132. С. 94–98. [https://doi.org/10.33285/1999-6934-2022-6\(132\)-94-98](https://doi.org/10.33285/1999-6934-2022-6(132)-94-98)
7. Исследования опасности вмятин и гофров на магистральных газопроводах / И.И. Велиюлин, В.И. Городниченко, М.Ю. Митрохин, В.А. Александров, В.П. Сытов, А.С. Лопатин // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2023. №5(137). С. 66–69. [https://doi.org/10.33285/1999-6934-2023-5\(137\)-66-69](https://doi.org/10.33285/1999-6934-2023-5(137)-66-69)
8. Поповцев В., Хальясмаа А., Патраков Ю. Численное моделирование взаимодействия дуги отключения с потоком элегаза в автокомпрессионном дугогасительном устройстве элегазового выключателя 110 кВ // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2023. Т. 23, № 2. С. 30–45. <https://doi.org/10.14529/power230203>
9. Загидулин Р.В., Бакиев Т.А., Бакиев А.Т. К распознаванию стресс-коррозионных трещин в металле по сигналу вихретоковых преобразователей // Контроль. Диагностика. 2022. Т. 25, № 2. С. 22–31. <https://doi.org/10.14489/td.2022.02.pp.024-033td-j.ru>
10. Расчет характеристик выбросов внутреннего давления в магистральных газопроводах / Д. Намгаладзе, Т. Кизирия, Л. Шатакишвили, Т. Гванидзе // World Science. 2021. № 1(62). https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30012021/7408
11. Design and Analysis of Pressure Vessel According to Internal Design Pressure and Temperature Using FEM / L. Heng, J.H. Park, R. Wang, M.S. Kim, G.E. Yang, S.D. Mun // Advances in Engineering Research. 2017. Vol. 132. P. 375–380. <https://doi.org/10.2991/icmmse-17.2017.75>
12. Acar M.A., Gönenli C., Selek M.B. Finite Element Analysis of the Pressure Vessels with Various Materials and Thicknesses // International Journal of Scientific Research and Management. 2024; 12(09): 1452–1459. <https://doi.org/10.18535/ijstrm/v12i09.ec05>
13. Design and Static Structural Analysis of Pressure Vessel using Finite Element Technique / P.M. Rao, T.J.P. Kumar, P.G. Krishnaiah, K.A. Francy, K.V. Reddy // International Journal of Disaster Recovery and Business Continuity. 2021; 12(1): 123–130.
14. Jin S., Li Z., Lan T., et al. Nonlinear Finite Element Analysis of Prestressed Concrete Containment Vessel under Severe Accident Loads // KSCE Journal of Civil Engineering. 2020; 24: 816–825. <https://doi.org/10.1007/s12205-020-0603-3>

15. Finite Element Analysis of Potential Liner Failures During Operation in Spherical Pressure Vessel / R. Pramod, N.S. Shanmugam, C.K. Krishnadasan, K. Sankaranarayanan // *Advances in Computational Methods in Manufacturing*. 2019: 1073–1087. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9072-3_90
16. A simulation analysis method for strength and fatigue design of prestressed wound ultra-high pressure vessels / L. Che, P. Wang, L. Ma, Y. Feng, J. Zhao, X. Li // *Advances in Mechanical Engineering*. 2023; 15(1): 1–15. <https://doi.org/10.1177/16878132231209640>
17. Shirwa F.M. Finite Element Analysis of Pressure Vessels Subjected to Uniform Internal Pressure Using Ansys Software // *International Journal of Research and Innovation in Applied Science*. 2022; 7(9): 45–50.
18. Vardhan H., Sztipanovits J. Deep Learning-based Finite Element Analysis (FEA) surrogate for sub-sea pressure vessel // *arXiv preprint*. 2022. <https://arxiv.org/abs/2206.03322>
19. Warrior N. A., Durrant J. C. The Application of Finite Element Modelling to Pressure Vessel Design Codes // *NAFEMS Publication*. 2000. https://www.nafems.org/publications/resource_center/r0071/

References

1. Kotelnikov A.A., Grigorov I.Yu., Grechukhin A.N. Mathematical modeling in weld-ing production. Kursk; 2024. (In Russ.).
2. Kotelnikov A.A., Natarov A.S. Study of the distribution of stresses arising under loading in welded joints using the finite element method. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2019; 23(4):19–30. (In Russ.).
3. Kotelnikov A. A., Abyshev K. I., Alpeeva E. V. Application of the finite element method in calculations of welded structures. Kursk; 2014. 125 p. (In Russ.). EDN: SDMWBD
4. Anishchenko G. V. Expansion of the functional capabilities of the TRSG-IRGA gas meter. *SFERA. Neftegaz = SPHERE. Oil and Gas*. 2019; (6): 66–67. (In Russ.).
5. Mansfeld A.D., Volkov G.P., Belyaev R.V., Sanin A.G., Moroskin D.V. Pulse correlation gas flowmeter with clamp-on sensors. *Akusticheskii zhurnal = Acoustic journal*. 2023; 69(3): 374–385. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0320791922700034>
6. Veliyulin I.I., Gorodnichenko V.I., Aleksandrov V.A., Sytov V.P., Lopatin A.S. Analysis of technical and economic aspects of diagnostics and repair of gas pipelines. *Obo-rudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa = Equipment and technologies for the oil and gas complex*. 2022; (6): 94–98. (In Russ.). [https://doi.org/10.33285/1999-6934-2022-6\(132\)-94-98](https://doi.org/10.33285/1999-6934-2022-6(132)-94-98)
7. Veliyulin I.I., Gorodnichenko V.I., Mitrokhin M.Yu., Aleksandrov V.A., Sytov V.P., Lopatin A.S. Research of the danger of dents and corrugations on main gas pipelines. *Obo-*

rudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa = Equipment and technologies for the oil and gas complex. 2023; (5): 66–69. (In Russ.). [https://doi.org/10.33285/1999-6934-2023-5\(137\)-66-69](https://doi.org/10.33285/1999-6934-2023-5(137)-66-69)

8. Popovtsev V., Khalyasmaa A., Patrakov Yu. Numerical modeling of the interaction of the tripping arc with the SF6 gas flow in the autocompression arc extinguishing device of a 110 kV SF6 circuit breaker. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika = Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2023; 23(2): 30–45. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/power230203>

9. Zagidulin R.V., Bakiev T.A., Bakiev A.T. On the recognition of stress-corrosion cracks in metal by the signal of eddy current transducers. *Kontrol'. Diagnostika = Control. Diagnostics*. 2022; 25(2): 22–31. (In Russ.). <https://doi.org/10.14489/td.2022.02.pp.024-033td-j.ru>

10. Namgaladze D., Kiziria T., Shatakishvili L., Gvanidze T. Calculation of the characteristics of internal pressure emissions in main gas pipeline. *World Science*. 2021; (1). (In Russ.). https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30012021/7408

11. Heng L., Park J.H., Wang R., Kim M.S., Yang G.E., Mun S.D. Design and Analysis of Pressure Vessel According to Internal Design Pressure and Temperature Using FEM. *Advances in Engineering Research*. 2017; 132: 375–380. <https://doi.org/10.2991/icmmse-17.2017.75>

12. Acar M.A., Gönenli C., Selek M.B. Finite Element Analysis of the Pressure Vessels with Various Materials and Thicknesses. *International Journal of Scientific Research and Management*. 2024; 12(09): 1452–1459. <https://doi.org/10.18535/ijssrm/v12i09.ec05>

13. Rao P.M., Kumar T.J.P., Krishnaiah P.G., Francy K.A., Reddy K.V. Design and Static Structural Analysis of Pressure Vessel using Finite Element Technique. *International Journal of Disaster Recovery and Business Continuity*. 2021; 12(1): 123–130.

14. Jin S., Li Z., Lan T., et al. Nonlinear Finite Element Analysis of Prestressed Concrete Containment Vessel under Severe Accident Loads. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2020; 24: 816–825. <https://doi.org/10.1007/s12205-020-0603-3>

15. Pramod R., Shanmugam N.S., Krishnadasan C.K., Sankaranarayanan K. Finite Element Analysis of Potential Liner Failures During Operation in Spherical Pressure Vessel. *Advances in Computational Methods in Manufacturing*. 2019: 1073–1087. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9072-3_90

16. Che L., Wang P., Ma L., Feng Y., Zhao J., Li X. A simulation analysis method for strength and fatigue design of prestressed wound ultra-high pressure vessels. *Advances in Mechanical Engineering*. 2023; 15(1): 1–15. <https://doi.org/10.1177/16878132231209640>

17. Shirwa F.M. Finite Element Analysis of Pressure Vessels Subjected to Uniform Internal Pressure Using Ansys Software. *International Journal of Research and Innovation in Applied Science*. 2022; 7(9): 45–50.

18. Vardhan H., Sztipanovits J. Deep Learning-based Finite Element Analysis (FEA) surrogate for sub-sea pressure vessel. *arXiv preprint*. 2022. Available at: <https://arxiv.org/abs/2206.03322>

19. Warrior N.A., Durrant J.C. The Application of Finite Element Modelling to Pressure Vessel Design Codes. *NAFEMS Publication*. 2000. https://www.nafems.org/publications/resource_center/r0071/

Информация об авторе / Information about the Author

Григоров Игорь Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: grigorov.ighor@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6207-8194>

Igor Yu. Grigorov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Mechanical Engineering Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: grigorov.ighor@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2003-960X>

УДК 697.441

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-24-36>



Совершенствование системы водяного капиллярного отопления

А.В. Короянов¹, О.Н. Зайцев¹, А.П. Бурцев¹ ✉, 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 представлены результаты исследования системы водяного отопления на основе стеновых блоков с капиллярными трубками. Эта технология представляет собой систему, в которой теплоноситель (вода) циркулирует через множество капиллярных трубок, которые равномерно встроены в строительные блоки или панели стен и потолков. Такие системы уже используются не только для обогрева, но и для охлаждения помещений, создания комфортного микроклимата. Был проведен анализ исследований подобных систем отопления. Основное преимущество таких систем – их энергоэффективность. Капиллярные системы могут позволить снизить общее потребление систем отопления и, соответственно, эксплуатационные расходы. Однако на данный момент внедрение и использование блоков с капиллярными трубками требует дополнительных исследований и разработок, особенно в части универсализации технологических решений, снижении стоимости материалов и упрощения монтажа. Для получения теоретических результатов была построена модель капиллярной системы, встроенной в стену. Система была разделена на несколько секций, что должно снизить потери давления. Проверена гипотеза о том, что капиллярные системы отопления позволяют обеспечить равномерное распределение тепла при относительно низкой температуре теплоносителя. В работе представлены результаты теплового расчета: график изменения температуры теплоносителя при движении по системе, график изменения давления в системе, картины изменения температуры на поверхности стены. Проведен анализ полученных данных и сделаны выводы об эффективности и целесообразности использования подобных систем. Данная работа может быть использована для дальнейшего исследования систем капиллярного водяного отопления.

Методы. Для построения модели стенового блока и проведения теплового расчета была использована программа SolidWorks и встроенный инструмент FlowSimulation.

Результаты. Проведенное исследование позволило получить зависимости изменения температуры и давления в капиллярной системе, а также картины изменения температуры на поверхности стены.

Заключение. Результаты исследования показали, что система отопления на основе капиллярных трубок позволяет обеспечить равномерный нагрев поверхности стены, что в свою очередь позволит равномерно прогреть воздух в помещении. Такой результат достигается при низкой температуре теплоносителя. Кроме того, предложенное авторами разделение системы на отдельные секции позволяет снизить потери давления.

Ключевые слова: стеновой блок; система отопления; капиллярные трубки; отопление; микроклимат; энергоэффективность; теплоноситель.

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

Для цитирования: Коаксиальное локальное вытяжное устройство / А.В. Короянов, О.Н. Зайцев, А.П. Бурцев, А.П. Бурцев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(2): 24-36. <https://doi.org/10.21869/-2223-1560-2025-29-2-24-36>.

Поступила в редакцию 21.02.2025

Подписана в печать 16.04.2025

Опубликована 23.07.2025

Improvement of the water capillary heating system

Alexey V. Koroyanov ¹, Oleg N. Zaitsev ¹, Alexey P. Burtsev ¹ ✉,
Alexander P. Burtsev ¹

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 presents the results of a study of a water heating system based on wall units with capillary tubes. This technology is a system in which a heat carrier (water) circulates through multiple capillary tubes that are uniformly embedded in building blocks or panels of walls and ceilings. Such systems are already used not only for heating, but also for cooling rooms, creating a comfortable microclimate. An analysis of studies of similar heating systems was carried out. The main advantage of such systems is their energy efficiency. Capillary systems can reduce the overall consumption of heating systems and, consequently, operating costs. However, at the moment, the introduction and use of units with capillary tubes requires additional research and development, especially in terms of universalizing technological solutions, reducing the cost of materials and simplifying installation. To obtain theoretical results, a model of a capillary system embedded in a wall was constructed. The system has been divided into several sections, which should reduce pressure losses. The hypothesis that capillary heating systems can ensure uniform heat distribution at a relatively low temperature of the coolant has been tested. The paper presents the results of a thermal calculation: a graph of changes in the temperature of the coolant when moving through the system, a graph of changes in pressure in the system, and patterns of temperature changes on the wall surface. The analysis of the data obtained was carried out and conclusions were drawn about the effectiveness and expediency of using such systems. This work can be used for further research of capillary water heating systems.

Methods. To build a wall block model and perform thermal calculations, the SolidWorks program and the built-in FlowSimulation tool were used.

Results. The study made it possible to obtain the dependences of temperature and pressure changes in the capillary system, as well as the pattern of temperature changes on the wall surface.

Conclusion. The results of the study showed that the heating system based on capillary tubes allows for uniform heating of the wall surface, which in turn will allow for uniform heating of the indoor air. This result is achieved at a low temperature of the coolant. In addition, the separation of the system into separate sections proposed by the authors makes it possible to reduce pressure losses.

Keywords: wall unit; heating system; capillary tubes; heating; microclimate; energy efficiency; heat carrier.

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

For citation: Koroyanov A. V., Zaitsev O. N., Burtsev A. P., Burtsev A. P. Improvement of the water capillary heating system. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(2): 24-36 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-24-36>.

Received 21.02.2025

Accepted 16.04.2025

Published 23.07.2025

Введение

Современному человеку для качественной жизни и работы требуется комфортный микроклимат в помещении. На данный момент основным инженерным решением в РФ является радиаторное отопление¹ [1-3]. Но данный вид отопления имеет ряд недостатков, включая неравномерное распределение тепла и высокие эксплуатационные расходы. Очевидна необходимость инноваций в сфере строительства и систем отопления. В связи с этим, одним из перспективных направлений в совершенствовании систем отопления являются системы капиллярных труб [4, 5].

Капиллярные маты уже применяются для организации системы отопления в различных помещениях. Отечественные авторы проводят исследования, направленные на изучение эффективности применения капиллярных систем водяного отопления [6-9]. Такие системы уже применяются за рубежом [10-14]. Кроме того, капиллярные систе-

мы могут быть использованы не только для обогрева, но и для охлаждения помещений [15-17]. Существуют методы расчета теплопередачи капиллярных систем водяного отопления [18, 19]. Но данный вид отопления требует дополнительных исследований, направленных на повышение его энергоэффективности. Также необходима разработка типовых решений для снижения стоимости монтажа и обслуживания таких систем.

Материалы и методы

В статье рассмотрен процесс работы стенового блока с капиллярными трубками, выбрана наиболее рациональная конструкция системы капиллярных труб и параметры теплоносителя.

Основные конструкции существующих капиллярных систем отопления представлены на рис. 1.

В качестве основы для создания модели системы капиллярных труб была выбрана первая из представленных на рис. 1. Модель позволяет на стадии проектирования получить представление о работе системы, внести изменения в конструкцию для получения максимально эффективного решения.

¹ Бурцев А. П. Комплексная утилизация теплоты сбросных газов и вентиляционных выбросов в многослойном пластинчатом рекуператоре: дис. ... канд. техн. наук. Курск, 2023. 202 с.

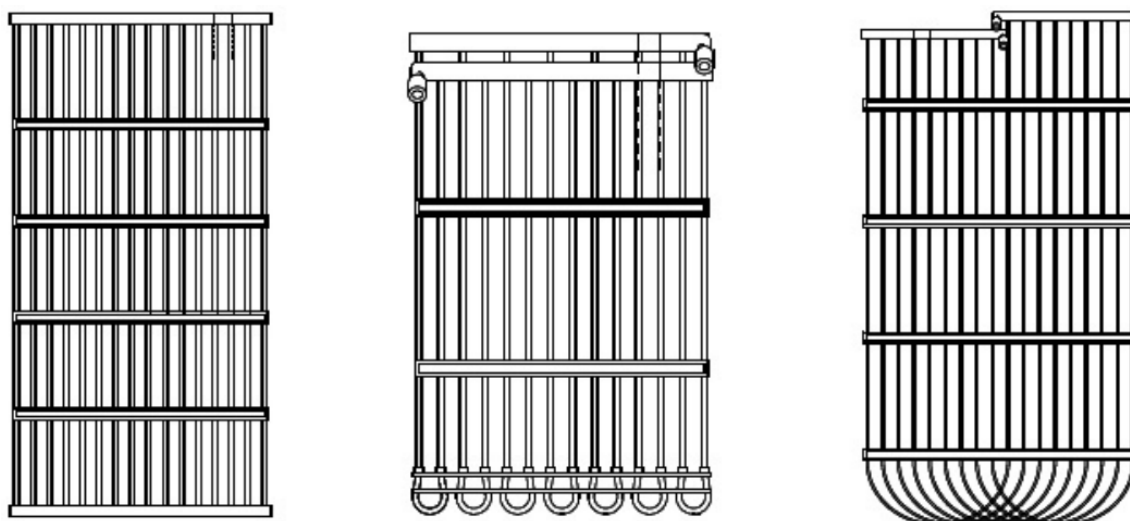


Рис. 1. Типовые конструкции стеновых блоков с капиллярными трубками

Fig. 1. Typical designs of wall blocks with capillary tubes

В данной работе модель стенового блока выполнена в среде SolidWorks. Графики и картины на поверхности стены были получены с помощью встроенного вычислительного инструмента Flow Simulation.

Результаты и их обсуждение

Была построена модель системы капиллярных трубок, представленная на рис. 2. Данная система состоит из пяти

секций капилляров, каждая из которых включает в себя 30 капиллярных трубок длиной 2 метра. Расстояние между капиллярами – 15 мм. Секции между собой соединены двумя коллекторами. В качестве материала данной системы выбран полипропилен.

Внешний диаметр капиллярных трубок составляет 4,3 мм, толщина стенок – 0,8 мм. Внешний диаметр коллекторов – 20 мм, толщина стенок – 2 мм.

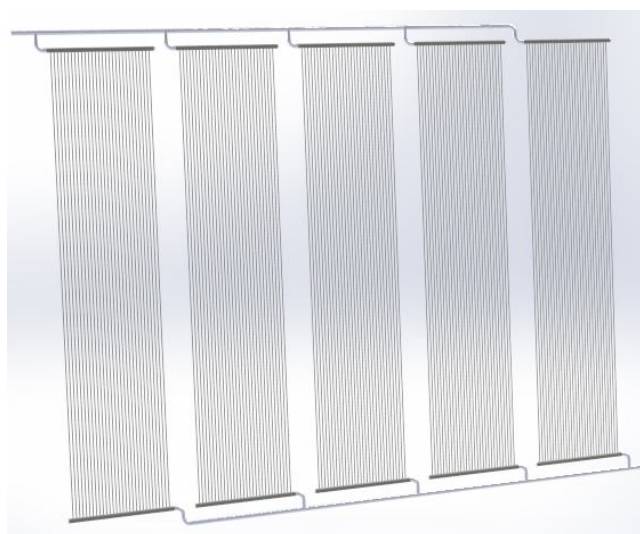


Рис. 2. Система капиллярных трубок

Fig. 2. Capillary tube system

Далее с помощью инструмента Flow Simulation был произведен тепловой расчет полученной системы. В качестве граничных условий для расчета были заданы следующие:

- температура теплоносителя (воды) на входе: $+35^{\circ}\text{C}$;
- объемный расход теплоносителя (воды) на входе: 50 л/ч;

– статическое давление на выходе: 3 атм.

Рассмотрим результаты расчетов.

Разбиение капиллярных трубок на секции должно снизить потери давления в системе.

Полученная конструкция была помещена в модель стены. На рис. 3 представлена полученная сборка в разрезе.

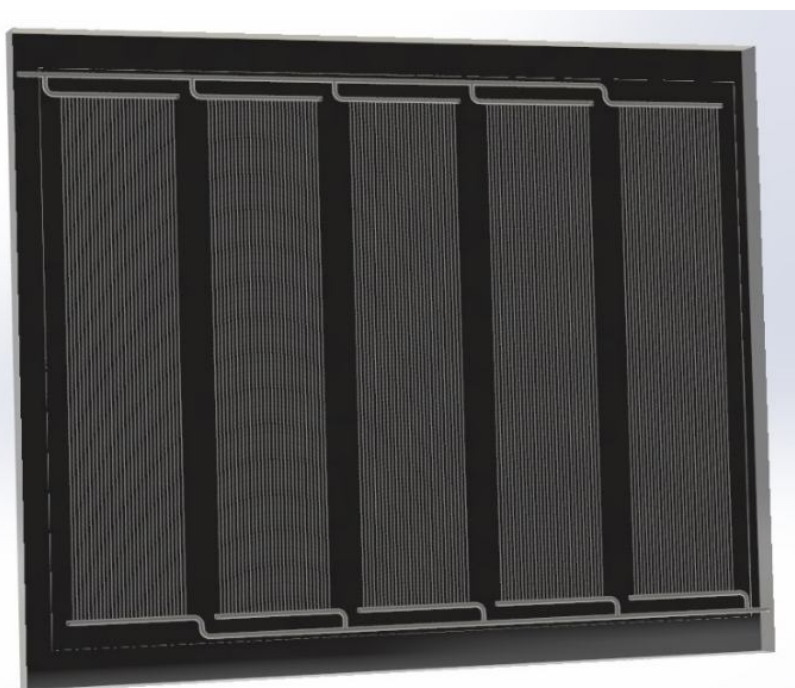


Рис. 3. Стеновой блок с системой капиллярных трубок (разрез)

Fig. 3. Wall block with a capillary tube system (section)

На рис. 4-7 представлены картины на поверхности стены (изолинии) на разных этапах заполнения системы теплоносителем и ее нагрева. Результаты показывают, что средняя температура поверхности стены составляет 27°C . Разница между наиболее и наименее нагретыми зонами составляет не более 2°C . Полученные результаты подтверждают тезис о том, что капиллярные системы отопления

позволяют обеспечить равномерный нагрев поверхности.

На рис. 8 изображен график изменения давления в системе.

На рис. 9 представлен график изменения температуры теплоносителя при движении по системе.

Из графика можно сделать вывод, что разница температуры теплоносителя на входе и выходе составляет примерно $2,5^{\circ}\text{C}$.

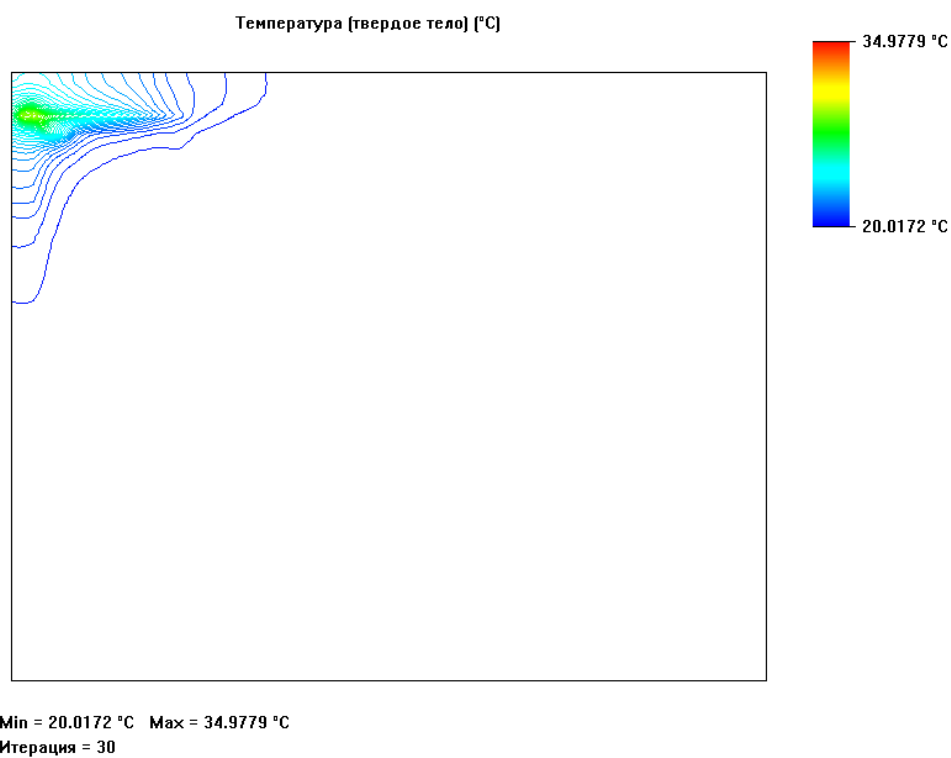


Рис. 4. Температура на поверхности стены

Fig. 4. Temperature on the wall surface

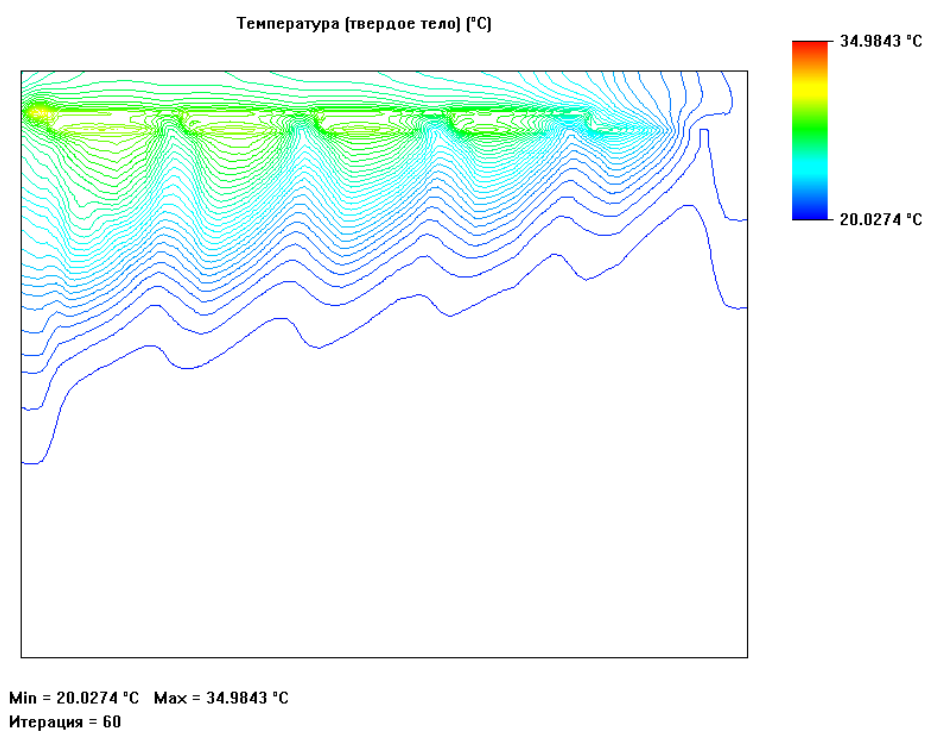


Рис. 5. Температура на поверхности стены

Fig. 5. Temperature on the wall surface

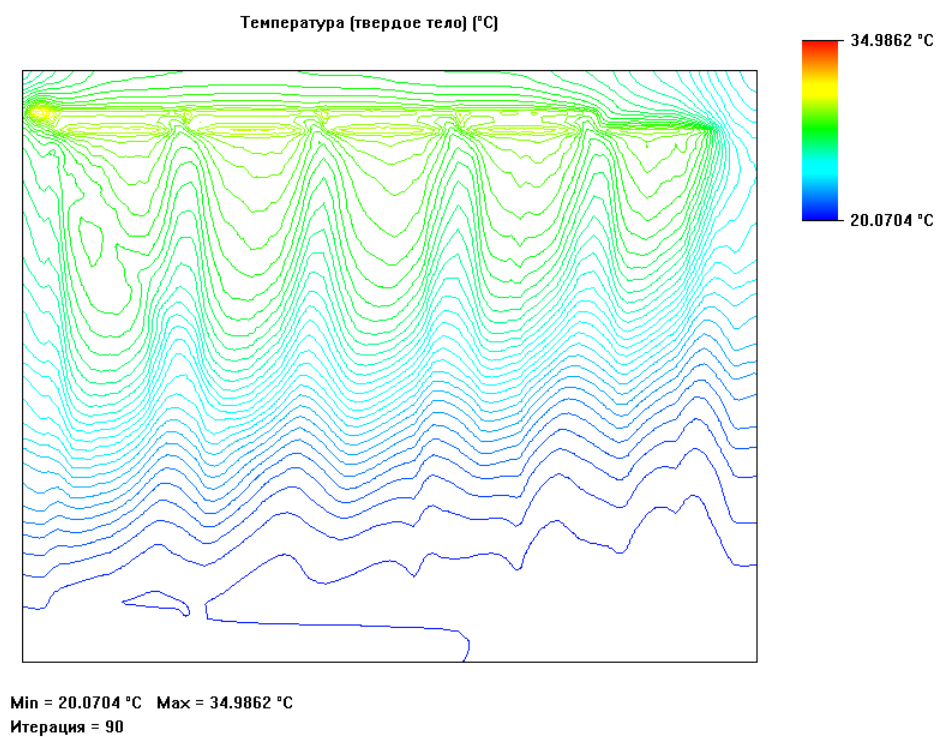


Рис. 6. Температура на поверхности стены

Fig. 6. Temperature on the wall surface

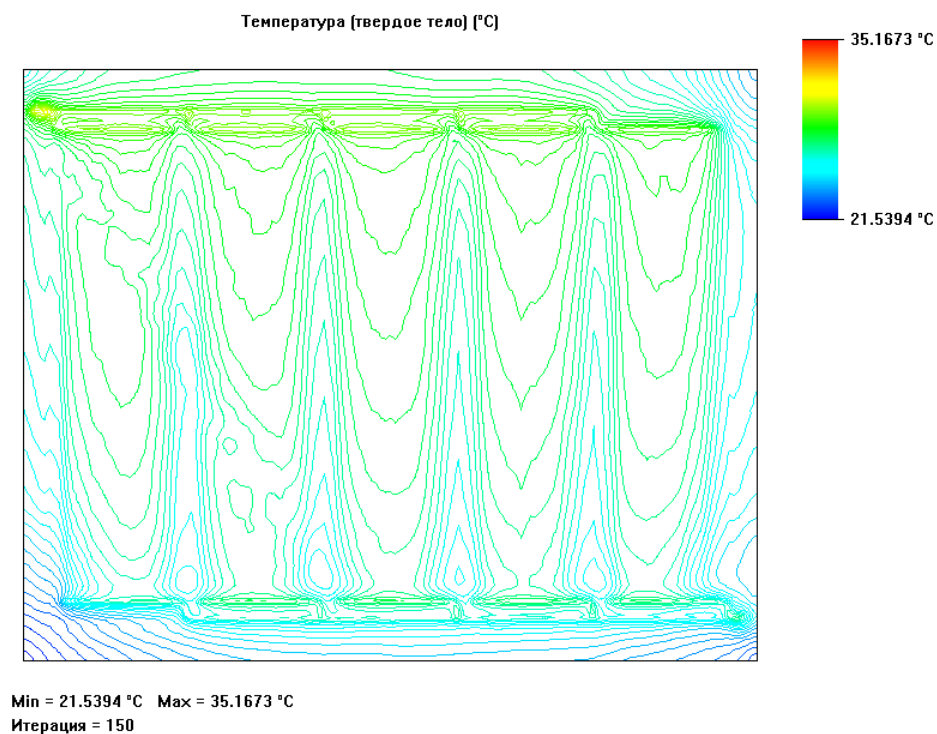


Рис. 7. Температура на поверхности стены

Fig. 7. Temperature on the wall surface

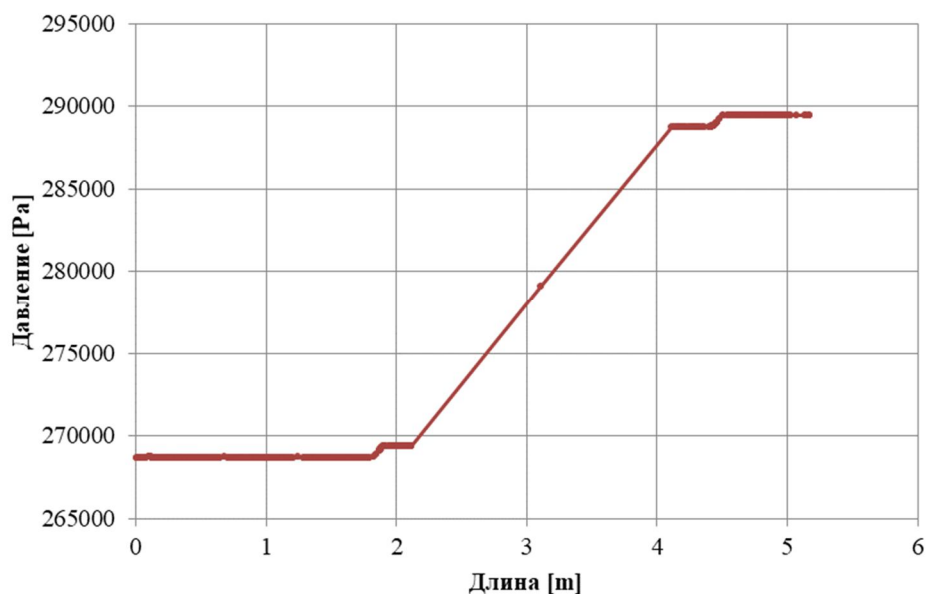


Рис. 8. График изменения давления

Fig. 8 Pressure change graph

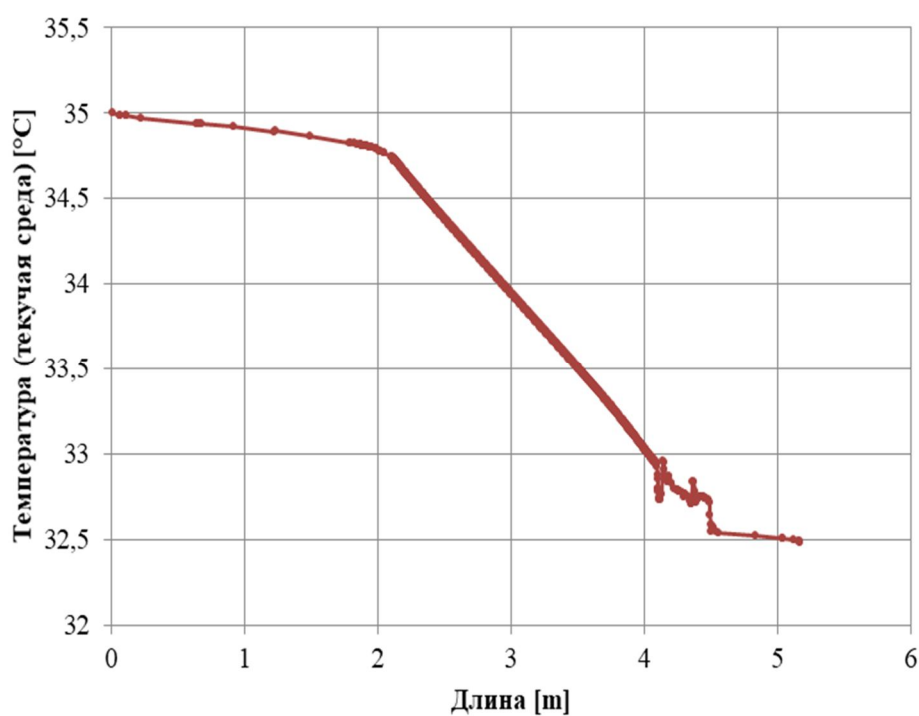


Рис. 9. График изменения температуры

Fig. 9. Temperature change graph

Выводы

В ходе исследования была разработана модель стенового блока с капилляр-

ными трубками и произведен ее тепловой расчет.

Результаты подтверждают тезис о том, что подобные конструкции позво-

ляют создавать низкотемпературные системы отопления. Обеспечивается равномерный прогрев поверхности, в которую встроены капиллярные трубки, что позволяет создавать комфортный тепло-

вой баланс в помещении и более точно регулировать температуру.

Данный вид систем отопления является перспективным и требует дальнейших исследований для повышения его эффективности.

Список литературы

1. Ландырев С.С. Распределение температуры в помещениях различной высоты с радиаторной системой отопления в различных районах РФ // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2022. № 12(768). С. 38-48.
2. Дадашева К.А., Пенявский В.В. Сравнение технико-экономических показателей систем настенного и радиаторного отопления // Избранные доклады 66-й Университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых, Томск, 21–25 сентября 2020 г. Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2020. С. 511-512.
3. Жилина К. В., Тютюнов Д. Н., Бурцев А. П. Один из вариантов управления системой теплоснабжения зданий и сооружений с применением методов математического анализа // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №2. С. 56-70. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-56-70>
4. Исследование аэродинамических параметров воздухораспределителей при взаимодействии круглых несоосных струй / О.Н. Зайцев, Н.Е. Семичева, А.П. Бурцев, Е.О. Зайцева // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №3. С. 119-130. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-119-130>.
5. Корепанов А.С., Шавкунов М.Л., Гаврилов Р.И. Исследование низкотемпературных систем обогрева помещений // Развитие производства и роль агроинженерной науки в современном мире: материалы Международной научно-практической конференции, Ижевск, 16–17 декабря 2021 г. Ижевск: Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, 2021. С. 305-309.
6. Основные проблемы применения низкотемпературных систем / Д.И. Вишневский, С.Д. Володин, Н.А. Гончарова, Р.В. Дубоенко // Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности: материалы IX Всероссийской (с международным участием) научно-технической конференции молодых исследователей, Волгоград, 18–23 апреля 2022 г. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2022. С. 273-275.
7. Захаров Н.И., Афонина Г. Н. Исследование теплообмена в помещении при использовании капиллярных матов в качестве отопительной системы // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тезисы докладов, Москва, 12–13 марта 2020 г. М.:

Общество с ограниченной ответственностью "Центр полиграфических услуг" РАДУГА", 2020. С. 659.

8. Исследование работы потолочно-капиллярной системы отопления / А.В. Шишкин, С.А. Зенин, П.В. Мешалова, Н.А. Белехова // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тезисы докладов Двадцать восьмой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Москва, 17–19 марта 2022 г. М.: Общество с ограниченной ответственностью "Центр полиграфических услуг "РАДУГА", 2022. С. 546.

9. Жгун Ю.В. Опыт применения капиллярных матов в Германии для повышения энергетической эффективности и обеспечения необходимого микроклимата зданий // Студенческий вестник. 2020. № 3-5(101). С. 59-61.

10. Широков В.А., Исанова А.В., Авдеева Н.Ю. Энергоэффективные системы обеспечения микроклимата зданий на основе использования холодных потолков // Студент и наука. 2023. № 1(24). С. 113-117.

11. Комплексный анализ функционирования системы теплоснабжения зданий путем применения математических методов и алгоритмов регулирования тепловых потоков / А. П. Бурцев, А. П. Бурцев, В. Е. Пахомов, М. В. Мурзина // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2024. № 10(1082). С. 57-59.

12. Исследование моделей и структурных схем автоматизации управления системой теплоснабжения здания / А. П. Бурцев, А. П. Бурцев, В. Е. Пахомов, М. В. Мурзина // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2024. № 10(1082). С. 51-53.

13. Попова А.Ю., Попов С.А. Особенности системы кондиционирования холодный потолок // Образование. Наука. Производство: сборник докладов XV Международного молодежного форума, Белгород, 23–24 октября 2023 г. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. С. 155-157.

14. Жуликов А.А., Мартынов В.В. Принцип работы и виды монтажа холодных потолков // Интернаука. 2022. № 47-4(270). С. 9-11.

15. Трошкин К.А., Драбкина Е.В. Система «холодные потолки» для кондиционирования частного дома // Поколение будущего: сборник избранных статей Международной студенческой научной конференции, Санкт-Петербург, 30 сентября 2021 г. СПб.: Гуманитарный национальный исследовательский институт «НАЦРАЗВИТИЕ», 2021. С. 74-79.

16. One of the Options for Using an Integrated Air Heater in Heat Supply Systems / A. Burtsev, D. Tyutyunov, A. Burtsev, P. Akulshina // Modern Problems in Construction: Selected Papers from MPC 2022. Kursk: Springer Nature Switzerland AG, 2024. P. 183-191.

17. Разработка методики для расчета теплопередачи потолочных водяных капиллярных систем низкотемпературного отопления / А.В. Шишкин, П.В. Мешалова, Ю.В. Яворовский, Е.В. Жигулина // Энергетические системы. 2022. № 2. С. 29-40.

18. Integrated Heat Recovery of Waste Gases and Ventilation Emissions in a Multilayer Plate Heat Exchanger / A. Burtsev, V. Yezhov, N. Semicheva [et al.] // Modern Problems in

Construction: Selected Papers from MPC 2022. Kursk: Springer Nature Switzerland AG, 2024. P. 1-8.

19. Использование комплексного многослойного пластинчатого рекуператора для утилизации теплоты вентиляционных выбросов / А. П. Бурцев, В. С. Ежов, Н. Е. Семичева, Н. С. Перепелица // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. 2023. № 4(54). С. 54-58.

References

1. Landyrev S.S. Temperature distribution in rooms of various heights with a radiator heating system in various regions of the Russian Federation. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo = News of higher educational institutions. Construction*. 2022; (12): 38-48 (In Russ.).

2. Dadasheva K.A., Penyavsky V.V. Comparison of technical and economic indicators of wall-mounted and radiator heating systems. In: *Izbrannye doklady 66-i Universitetskoj nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov i molodykh uchennykh = Selected reports of the 66th University Scientific and Technical Conference of Students and Young Scientists*, Tomsk: Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering; 2020. P. 511-512. (In Russ.).

3. Zhilina K. V., Tyutyunov D. N., Burtsev A. P. One of the options for managing the heat supply system of buildings and structures using mathematical analysis methods. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(2): 56-70 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-56-70>.

4. Zaitsev O.N., Semicheva N.E., Burtsev A.P., Zaitseva E.O. Study of aerodynamic parameters of air distributors during interaction of round non-coaxial jets. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(3): 119-130 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-119-130>.

5. Korepanov A.S., Shavkunov M.L., Gavrilov R.I. Research of low-temperature room heating systems. In: *Razvitie proizvodstva i rol' agroinzhenernoi nauki v sovremennom mire. Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Production development and the role of agroengineering science in the modern world. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Izhevsk: Izhevskaya gosudarstvennaya sel'skokhozyaistvennaya akademiya; 2021. P. 305-309. (In Russ.).

6. Vishnevsky D.I., Volodin S.D., Goncharova N.A., Duboenko R.V. The main problems of using low-temperature systems. In: *Aktual'nye problemy stroitel'stva, ZhKKh i tekhnosfernoi bezopasnosti. Materialy IX Vserossiiskoi (s mezhdunarodnym uchastiem) nauchno-tekhnicheskoi konferentsii molodykh issledovatelei = Actual problems of construction, housing and communal services and technosphere safety. Proceedings of the IX All-Russian (with international participation) Scientific and Technical Conference of young researchers*. Volgograd: Volgograd State Technical University; 2022. P. 273-275. (In Russ.).

7. Zakharov N.I., Afonina G. N. Investigation of heat exchange in a room using capillary mats as a heating system. In: *Radioelektronika, elektrotekhnika i energetika. Tezisy dokladov* = *Radio electronics, electrical engineering and power engineering. Abstracts of reports*, Moscow: Center of printing services "RADUGA"; 2020. P. 659. (In Russ.).

8. Shishkin A.V., Zenin S.A., Meshalova P.V., Belekova N.A. Investigation of the ceiling-capillary heating system. In: *Radioelektronika, elektrotekhnika i energetika. Tezisy dokladov Dvadsat' vos'moi mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov i aspirantov* = *Radioelectronics, electrical engineering and power engineering. Abstracts of the Twenty-eighth International Scientific and Technical Conference of Students and post-graduates*. Moscow: Center of printing services "RADUGA"; 2022. P. 546. (In Russ.).

9. Zhgun Yu.V. The experience of using capillary mats in Germany to increase energy efficiency and ensure the necessary microclimate of buildings. *Studencheskii vestnik* = *Student Bulletin*. 2020; (3-5): 59-61. (In Russ.).

10. Shirokov V.A., Isanova A.V., Avdeeva N.Yu. Energy-efficient systems for providing microclimate of buildings based on the use of cold ceilings. *Student i nauka* = *Student and Science*. 2023; (1): 113-117. (In Russ.).

11. Burtsev A. P., Burtsev A. P., Pakhomov V. E., Murzina M. V. Comprehensive analysis of the functioning of the building heat supply system by applying mathematical methods and algorithms for regulating heat flows. *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki* = *BST: Bulletin of Construction Machinery*. 2024; (10): 57-59. (In Russ.).

12. Burtsev A. P., Burtsev A. P., Pakhomov V. E., Murzina M. V. Research of models and structural schemes of automation of building heat supply system control. *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki* = *BST: Bulletin of construction machinery*. 2024; (10): 51-53. (In Russ.).

13. Popova A.Yu., Popov S.A. Features of the cold ceiling air conditioning system. In: *Obrazovanie. Nauka. Proizvodstvo. Sbornik dokladov XV Mezhdunarodnogo molodezhnogo foruma* = *Education. Science. Production. Collection of reports of the XV International Youth Forum*. Belgorod: Belgorodskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet im. V.G. Shukhova; 2023. P. 155-157 (In Russ.).

14. Zhulikov A.A., Martynov V.V. The principle of operation and types of installation of cold ceilings. *Internauka*. 2022; (47-4): 9-11. (In Russ.).

15. Troshkin K.A., Drabkina E.V. The "cold ceilings" system for air conditioning in a private house. In: *Pokolenie budushchego: sbornik izbrannykh statei Mezhdunarodnoi studencheskoi nauchnoi konferentsii* = *Generation of the future. Collection of selected articles of the International Student Scientific Conference*. St. Petersburg; 2021. P. 74-79. (In Russ.).

16. Burtsev A., Tyutyunov D., Burtsev A., Akulshina P. One of the Options for Using an Integrated Air Heater in Heat Supply Systems. *Modern Problems in Construction : Selected Papers from MPC 2022*. Kursk; 2024. P. 183-191.

17. Shishkin A.V., Meshalova P.V., Yavorovsky Yu.V., Zhigulina E.V. Development of a methodology for calculating heat transfer of ceiling water capillary low-temperature heating systems. *Energeticheskie sistem = Energy systems*. 2022; (2): 29-40. (In Russ.).

18. Burtsev A., Yezhov V., Semicheva N., et al. Integrated Heat Recovery of Waste Gases and Ventilation Emissions in a Multilayer Plate Heat Exchanger. *Modern Problems in Construction: Selected Papers from MPC 2022*. Kursk; 2024. P. 1-8.

19. Burtsev A. P., Yezhov V. S., Semicheva N. E., Perepelitsa N. S. The use of an integrated multilayer plate heat exchanger for the utilization of heat from ventilation emissions. *Nauchnyi zhurnal. Inzhenernye sistemy i sooruzheniya = Scientific Journal. Engineering systems and structures*. 2023; (4): 54-58. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Короянов Алексей Викторович, аспирант кафедры инфраструктурных энергетических систем, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: koroyanov.lescha46@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2104-6725>

Alexey V. Koroyanov, Post-Graduate Student of Infrastructural Energy Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: koroyanov.lescha46@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2104-6725>

Зайцев Олег Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры инфраструктурных энергетических систем, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: zon071941@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9084-9355>, ScopusID: 57198778856

Oleg N. Zaitsev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Infrastructure Energy Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: zon071941@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9084-9355>, ScopusID: 57198778856

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

Бурцев Александр Петрович, аспирант кафедры инфраструктурных энергетических систем, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: burtsev-999@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2158-2244>, ScopusID: 58321162900

Alexander P. Burtsev, Post-Graduate Student of Infrastructural Energy Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: burtsev-999@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2158-2244>, ScopusID: 58321162900

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.942

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-37-54>

Моделирование газовых потоков для оценки эффективности улавливания испарений от промышленных ванн

Н.А. Марков ¹ ✉, С.В. Угорова ¹

¹ Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых,
ул. Горького, д. 87, г. Владимир 600000, Российская Федерация

✉ e-mail: mnikita.markovm@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Оценка эффективности и оптимизация работы разработанного местного вентиляционного устройства с использованием современных методов моделирования текучих сред.

Методы. В работе рассмотрены методы моделирования сложной технической системы – промышленной ванны, с отдельными функциональными узлами для улавливания вредных испаряющихся веществ и их прижатия к поверхности раствора – двухбортowego отсоса и системы наддува соответственно. Для каждой подсистемы, которые не могут быть описаны единым математическим аппаратом, применялись методы комплексного потенциала потоков газа и компьютерного моделирования с последующим сравнением и поиском оптимальных результатов.

Результаты. Найдена максимальная высота улавливания вредных веществ над поверхностью раствора ванны, условие для которой учитывает отношение количества воздуха, испаряемого от раствора ванны, и общее количество воздуха, удаляемого бортовым отсосом. Для построенной модели вытяжного устройства от ванны для проведения технологических операций с металлами по разработанной полезной модели было проведено исследование движения воздушных потоков и проанализирована эффективность разработанного вытяжного бортового отсоса с помощью компьютерного моделирования.

Заключение. Исследование показало, что эффективность сложной системы местной вытяжной вентиляции с наддувом, определяемой распространением вредных веществ в рабочей зоне, возможно оценить и улучшить, используя методы моделирования, которые позволяют изменить конструкцию бортовых отсосов, рассчитать и подобрать параметры элементов, установить и проанализировать принцип работы модели устройства в целом, влияющий на эффективность удаления вредных веществ.

Ключевые слова: улавливание вредных веществ; двухбортowe отсосы с наддувом; местная вентиляция; математическое моделирование; компьютерное моделирование; промышленные ванны.

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

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0004, госзадание ВлГУ).

Для цитирования: Марков Н.А., Угорова С.В. Моделирование газовых потоков для оценки эффективности улавливания испарений от промышленных ванн. 2025; 29(2): 37-54. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-37-54>.

Поступила в редакцию 29.04.2025

Подписана в печать 05.06.2025

Опубликована 23.07.2025

© Марков Н.А., Угорова С.В., 2025

Modeling gas flows to assess the efficiency of vapor capture from industrial tanks

Nikita A. Markov ¹✉, Svetlana V. Ugorova ¹

¹ Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs
87, Gor'kogo str., Vladimir 600000, Russian Federation

✉ e-mail: mnikita.markovm@gmail.com

Abstract

Purpose of research. Evaluation of the effectiveness and optimization of the developed local ventilation device using modern fluid modeling methods.

Methods. The study considers methods for modeling a complex technical system – an industrial bath, with separate functional units for trapping harmful evaporating substances and pressing them to the surface of the solution – a double-side suction and a boost system, respectively. For each subsystem, which cannot be described by a single mathematical apparatus, methods of complex potential of gas flows and computer modeling were used, followed by comparison and search for optimal results.

Results. The maximum height of trapping harmful substances above the surface of the bath solution is found, the condition for which takes into account the ratio of the amount of air evaporated from the bath solution and the total amount of air removed by the on-board suction. For the constructed model of an exhaust device from a bath for carrying out technological operations with metals, according to the developed utility model, a study of the movement of air flows was conducted and the effectiveness of the developed exhaust on-board suction was analyzed using computer modeling.

Conclusion. The study showed that the effectiveness of a complex supercharged local exhaust ventilation system, determined by the spread of harmful substances in the work area, can be assessed and improved using modeling methods that allow you to change the design of on-board suction systems, calculate and select the parameters of the elements, establish and analyze the principle of operation of the device model as a whole, affecting the effectiveness of removal of harmful substances.

Keywords: harmful substance capture; pressurized double-sided slot exhausts; local exhaust ventilation; mathematical modeling; computational modeling; industrial tanks.

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

Funding. The research was carried out within the state assignment in the field of scientific activity of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme FZUN-2024-0004, state assignment of the VISU).

For citation: Markov N. A., Ugorova S. V. Modeling gas flows to assess the efficiency of vapor capture from industrial tanks // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(2): 37-54 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-37-54>.

Received 29.04.2025

Accepted 05.06.2025

Published 23.07.2025

Введение

В настоящее время бортовые отсосы являются важным элементом систем вен-

тиляции и очистки воздуха на предприятиях и широко применяются в различных отраслях промышленности и проведении лабораторных и иных экспериментов.

Они предназначены для удаления вредных веществ, пыли, дыма, аэрозолей, металлической стружки при металлообработке и других загрязнений из рабочей зоны, обеспечивая тем самым безопасные и комфортные условия труда для персонала¹ [1].

Бортовые отсосы относятся к вытяжным устройствам технологических и аспирационных газов и могут быть различных типов и конструкций, в зависимости от конкретных условий их применения [2, 3, 4, 5, 6, 7]. Такие устройства весьма разнообразны и в основном зависят от технологии процесса, доступа к агрегатам, например, ваннам для травления металла, и степени их автоматизации² [8, 9, 10].

Расположение воздухоприемной щели и тип бортового отсоса зависит от технологического процесса, площади улавливания вредных веществ, степени их улавливания. В некоторых случаях для более эффективного улавливания вредных испарений и снижения расхода удаляемого воздуха вытяжным отсосом предусматривают «передувку» воздуха, которая представляет собой настилающийся

сверху воздушный поток, который прижимает вредные выделения или испарений при технологических процессах. Для гальванических и травильных ванн применяются специальные опрокинутые одно- и двухбортовые отсосы без и с передувкой воздуха.

Исследование направлено на оценку эффективности и оптимизацию работы разработанного местного вентиляционного устройства с использованием современных методов моделирования текучих сред. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить основные параметры и характеристики промышленной ванны, вытяжного устройства;
- построить модель, используя технический результат разработанной конструкции, для проведения математического расчета;
- определить основные параметры текучей среды рассчитанных с помощью моделирования;
- оценить и проанализировать эффективность работы устройства с заданными параметрами модели и сравнить их с расчетными;
- определить параметры конструкции устройства до получения требуемых значений и эффективности работы полезной модели.

Материалы и методы

Для проведения компьютерного моделирования использовался программный комплекс SolidWorks (SW) с разделом вычисления текучих сред FlowSim-

¹ Расчет бортовых отсосов из технологических ванн травления металлов и сплавов: метод. указания к практическим и лаб. занятиям для студентов спец. 1103, 1105, 1203, 1208 всех форм образования. Ч.3 / В.А. Ульянов [и др.]. Нижний Новгород, 2007. 12 с.

² Патент № 135087 Российская Федерация, МПК F24F 7/06 (2006.01). Устройство для удаления вредных выделений / Угорова С. В., Садов В. С., Наумова Л.А., Боровицкий А.А. № 2013125816/12: заявлено 04.06.2013: опубликовано 27.11.2013. Бюл. № 33 8 с.

ulation (FS) (серийный номер: 9710 0250 0354 3538 JGWC T8H8, сетевая лицензия: 25735), основанное на методе конечных объемов.

Внесение изменений в конструкцию устройства бортового отсоса для оптимизации его работы осуществлялось с помощью сравнения показателей текучей среды и анализа полученных результатов процесса моделирования.

Теоретический расчет параметров конструкции устройства для удаления паров при использовании технологических ванн проводился по методике расчета местных вытяжных бортовых отсосов [11, 12, 13].

Для построения модели бортового отсоса необходимы такие параметры конструкции, как размеры промышленной ванны, длина, диаметр и количество насадков для передувки, показатели скорости всасывания на входе в устройство и объемный расход передувки и удаляемого воздуха.

Задаются предварительные рекомендуемые значения, необходимые для определения этих параметров [14]: расстояние щелевого насадка от ванны принимается 1,5 м; ширина (высота) щели отсоса по конструктивным и технологическим соображениям принимается не менее 50 мм; размеры промышленной ванны – 2100x1000 мм; расстояние от раствора до кромки ванны при опрокинутом бортовом отсосе – 150 мм; диаметр насадка принимается 50 мм.

Длина насадка H определяется по следующей формуле:

$$H = d_x / 4 = 0,19 \text{ м}, \quad (1)$$

где d_x – диаметр струи на расстоянии $x = B = 1,5$ м, определяется по формуле

$$d_x = d_0 \left(6,8 \frac{ax}{d_0} + 1 \right) = 0,764 \text{ м}, \quad (2)$$

где $a = 0,07$ – коэффициент турбулентности для круглого отверстия;

$d_0 = 0,05$ м – диаметр насадка.

Количество отверстий n для выхода воздуха определяется по формуле

$$n = x / d_x = 2,87 \text{ шт.} \quad (3)$$

Количество подаваемого воздуха L_0 определяется по следующей формуле:

$$L_0 = \frac{430F(\Delta t^{0,25} H)^{\frac{1}{3}}}{4,36 \left(\frac{ax}{d_0} + 0,145 \right) - n} = 161,5 \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (4)$$

Скорость воздуха на выходе из насадка v_0 определяется по формуле

$$v_0 = \frac{4L_0}{\pi d_0^2} = 22,86 \text{ м/с}. \quad (5)$$

Количество воздуха L_x , удаляемого отсосом:

$$L_x = 4,36 \cdot 0,0307 \left(\frac{ax}{d_0} + 0,145 \right) = 1581,2 \text{ м}^3 / \text{ч}. \quad (6)$$

Скорость воздуха, удаляемого отсосом v_x :

$$v_x = \frac{4L_x}{\pi d_x^2} = 0,96 \text{ м/с}. \quad (7)$$

Также были рассчитаны параметры конструкции перфорированного воздухораспределителя для подачи *низкоскоростного настилающегося* потока воздуха исходя из условия их равномерного распределения: диаметр отверстий

перфорации 6 мм, их количество 180 шт. и расстояние между ними 20 мм.

Для построения компьютерной модели (рис. 1,а) была использована разработанная полезная модель (рис. 1,б), принцип работы которого описан в Патенте № 135087¹ [15], отличием от типовых конструкций двухбортного отсоса с передувкой которой является дополнительный воздуховод для наддува воздуха, установленный на заданном расстоянии, перфорированный воздухо-рас-пределитель и щелевые воздухо-распределители.

Используя параметры теоретического расчета, построена компьютерная модель промышленной ванны и конструкции бортового отсоса.

Для проведения расчета и задания параметров текучей среды конструкция у ванны была дополнена вытяжными воздуховодами от бортов (рис. 2,а), имеющих наклонную сходящуюся поверхность (рис. 2,б).

Подаваемый воздух для передувки предусмотрен от приточного отверстия диаметром 100 мм, распределенного с помощью трех воздуховодов (рис. 3,а), сходящихся в крестовине, на двух крайних (диаметр 100 мм) установлены щелевые отверстия, создающие воздушную завесу, препятствующую попаданию вредных веществ в рабочую зону персонала, а на

центральной (диаметр 80 мм) установлен перфорированный воздухораспределитель (рис. 3,б).

Математическое моделирование технологического процесса при использовании промышленных ванн проводилось по математическому аппарату [16, 17].

Максимальное расстояние испаренных вредных веществ от поверхности раствора (рис. 4) находится в точке с координатами $(x_0; y_0)$, слагаемыми которого является расстояние H и ΔH (высота улавливания).

Траектория движения испаренных вредных веществ состоит из потока аэрозоля с расходом V_n (вдоль оси y), и общего расхода воздуха, удаляемого бортовым отсосом V_0 (вдоль оси x).

Для предотвращения попадания вредных веществ в рабочую зону персонала из ванны необходимо, чтобы выполнялось условие $V_0 / V_n > 1$.

Для определения V_0 / V_n используем комплексным потенциалом рассматриваемых потоков. В вертикальном направлении комплексный потенциал по координате $z = x + iy$, где $i = \sqrt{-1}$ равен:

$$\omega_1 = -i \frac{V_n}{b} z. \quad (8)$$

По отношению к щели борта горизонтальный поток образуется двумя симметричными плоскими струями, имеющими комплексные потенциалы:

$$\omega_2 = \frac{V_0}{2\pi} \ln \left[\sin \frac{\pi}{b} (z - iH) \right], \quad (9)$$

$$\omega_3 = \frac{V_0}{2\pi} \ln \left[\sin \frac{\pi}{b} (z + iH) \right]. \quad (10)$$

¹ Патент № 135087 Российская Федерация, МПК F24F 7/06 (2006.01). Устройство для удаления вредных выделений / Угорова С. В., Садов В. С., Наумова Л.А., Боровицкий А.А. № 2013125816/12: заявлено 04.06.2013: опубликовано 27.11.2013. Бюл. № 33 8 с.

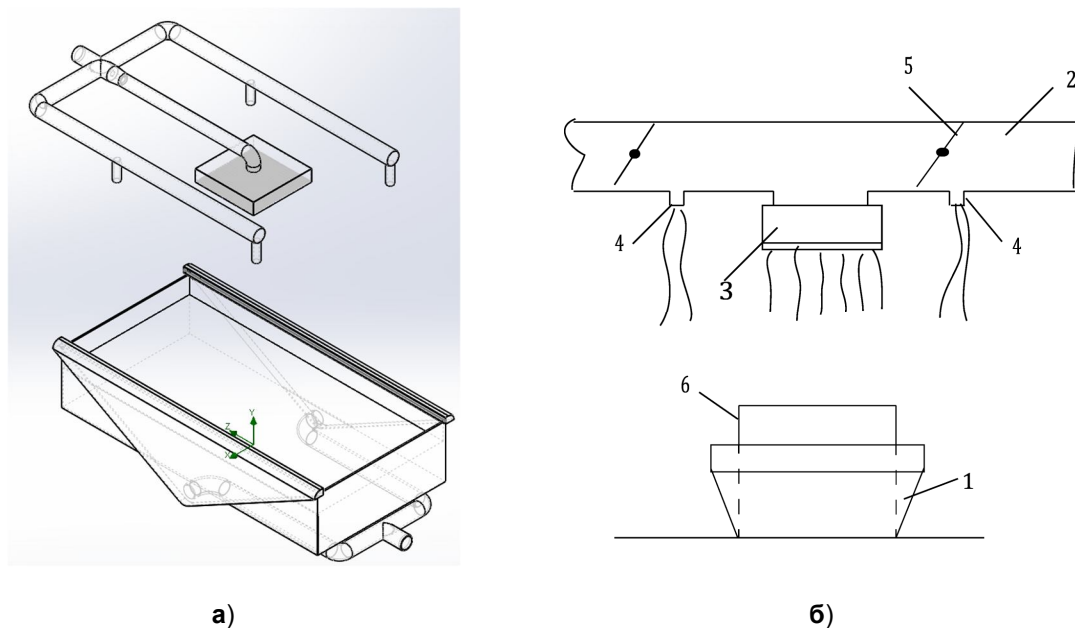


Рис. 1. Построенная в SW (а) и полезная (б) модель: 1 – двухбортовой местный отсос; 2 – воздуховод; 3 – перфорированный воздухораспределитель; 4 – щелевые воздухораспределители; 5 – воздушная заслонка; 6 – промышленная ванна

Fig. 1. The model built in SW (a) and utility model (б): 1 – two-side local suction; 2 – air duct, 3 – perforated air distributor; 4 – slit air distributors; 5 – air damper; 6 – industrial bath

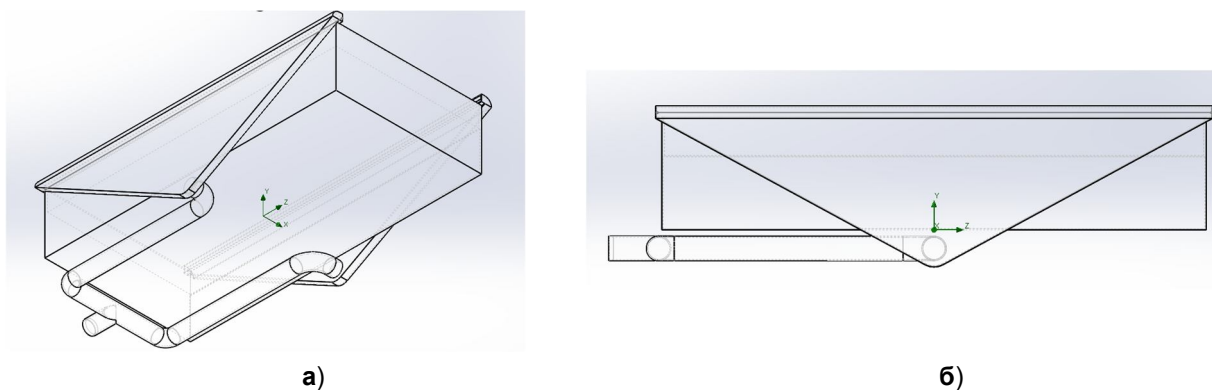


Рис. 2. Конструкция бортового отсоса у ванны

Fig. 2. The design of the on-board suction at the tub

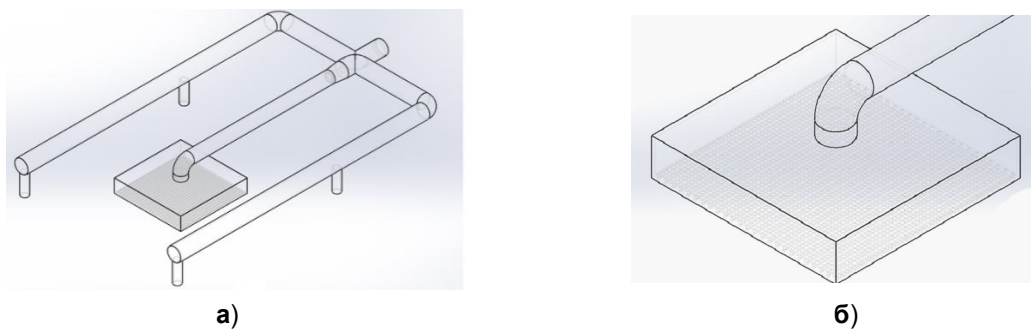


Рис. 3. Элементы системы вентиляции, подающей приточный воздух на передувку

Fig. 3. Elements of the ventilation system supplying supply air to the purge

В данном случае частицы аэрозоля поднимаются над зеркалом ванны и, при допущении об одинаковости условий течения у каждого из бортов, разделяются на два симметричных потока. Следовательно, комплексный потенциал течения газа принимается потенциальным, а рациональное удаление аэрозоля обеспечивается при $V_0 / V_n > 1$.

Комплексный потенциал ω такого течения:

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = \\ &= -i \frac{V_n}{b} z - \frac{V_0}{2\pi} \ln \left[\sin \frac{\pi}{b} (z - iH) \right] + \\ &+ \frac{V_0}{2\pi} \ln \left[\sin \frac{\pi}{b} (z + iH) \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

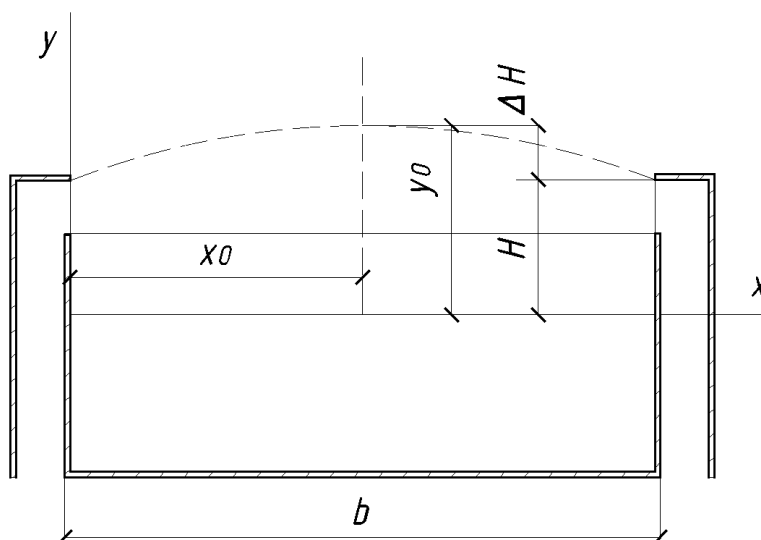


Рис. 4. Расчетная схема двухбортового отсоса

Fig. 4. Calculation scheme of the double-side suction

Первая производная по координате:

$$\frac{\partial \omega}{\partial z} = -i \frac{V_n}{b} - \frac{V_0}{b} \left[\cot \frac{\pi}{b} (z - iH) + \cot \frac{\pi}{b} (z + iH) \right]. \quad (12)$$

Тогда комплексная скорость газа:

$$\begin{aligned} v_x + iv_y &= -i \frac{V_n}{b} - \frac{V_0}{2b} \frac{\sin \left[\frac{2\pi}{b} z \right]}{\sin \left[(z - iH) \frac{\pi}{b} \right] \sin \left[(z + iH) \frac{\pi}{b} \right]} = -i \frac{V_n}{b} - \frac{V_0}{2b} \frac{+ \sin \left(\frac{2\pi}{b} x \right) \cosh \left(\frac{2\pi}{b} y \right) + \\ &+ i \cos \left(\frac{2\pi}{b} x \right) \sinh \left(\frac{2\pi}{b} y \right)}{\cosh \left(\frac{2\pi}{b} H \right) - \cos \left(\frac{2\pi}{b} x \right) \cosh \left(\frac{2\pi}{b} y \right) + \\ &+ i \sin \left(\frac{2\pi}{b} x \right) \sinh \left(\frac{2\pi}{b} y \right)}. \end{aligned} \quad (13)$$

Используя (13), вычислим проекцию скорости на ось ординат:

$$v_y = \frac{V_n}{b} + \frac{V_0}{2b} \frac{\cos\left(\frac{2\pi}{b}x\right)\sinh\left(\frac{2\pi}{b}y\right)\cosh\left(\frac{2\pi}{b}H\right) - \cos^2\left(\frac{2\pi}{b}x\right)\sinh\left(\frac{2\pi}{b}y\right)\cosh\left(\frac{2\pi}{b}y\right) + \sin^2\left(\frac{2\pi}{b}y\right)\sinh\left(\frac{2\pi}{b}y\right)\cosh\left(\frac{2\pi}{b}y\right)}{\left\{\cosh\left(\frac{2\pi}{b}H\right) - \cos\left(\frac{2\pi}{b}x\right)\cosh\left(\frac{2\pi}{b}y\right)\right\}^2 + \left\{\sin\left(\frac{2\pi}{b}x\right)\sinh\left(\frac{2\pi}{b}y\right)\right\}^2}. \quad (14)$$

В точке максимума линии тока, имеющей координаты $x_0 = b/2$ и $y_0 = H + \Delta H$, проекция скорости на ось ординаты $v_y = 0$. Поэтому из выражения (14) можно записать:

$$V_0 - V_n = \frac{\left\{\sinh\left[2\pi\frac{(H+\Delta H)}{b}\right]\right\}}{\left\{\cosh\left[2\pi\frac{H}{b}\right] + \cosh\left[2\pi\frac{(H+\Delta H)}{b}\right]\right\}}. \quad (15)$$

Или для отношения расходов потоков:

$$\frac{V_0}{V_n} = \frac{\left\{\cosh\left[2\pi\frac{H}{b}\right] + \cosh\left[2\pi\frac{(H+\Delta H)}{b}\right]\right\}}{\left\{\sinh\left[2\pi\frac{(H+\Delta H)}{b}\right]\right\}}. \quad (16)$$

Результаты и их обсуждение

При проведении математического моделирования с рекомендуемыми расстояниями раствора от кромки ванны 150 мм и ширины щели бортового отсоса не менее 50 мм, определена максимальная высота улавливания ΔH и построен график (рис. 5) следующей функции:

$$f = \frac{\cosh\left[2\pi\left(x + \frac{1}{5}\right)\right] + \cosh\left[\frac{2\pi}{5}\right]}{\sinh\left[2\pi\left(x + \frac{1}{5}\right)\right]} > 1. \quad (17)$$

При условии отношения количества выделений к объему удаляемого воздуха через бортовой отсос больше единицы максимальная высота, при которой

бортовой отсос будет улавливать испарения из ванны, составляет 0,0383 м или 38,3 мм.

Для построенной модели (рис. 1,а) в разделе вычисления гидрогазодинамики FlowSimulation, используя значения количества подаваемого и удаляемого воздуха от устройства бортового отсоса, были заданы следующие граничные условия:

I рода – для параметров отсасываемого воздуха (объемный расход на выходе $L = 1581,2 \text{ м}^3/\text{ч}$), для подачи воздуха на передувку (объемный расход на входе $L = 161,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ для параметров окружающего воздуха (температура $T = 20^\circ\text{C}$, давление $P = 101330 \text{ Па}$); II рода – условие градиента бесконечности на границах расчетной области по давлению, температуре и скорости.

Установленное физическое время 60 секунд, количество разбитых ячеек по текучей среде 96 224, твердой среде – 23 819, итераций – 120.

При анализе результатов компьютерного моделирования в SWFS построенной конструкции с заданными размерами и параметрами симуляции было отмечено, что в центральном воздуховоде скорость движения подающего воздуха сравнительно выше, чем в крайних, что связано с необходимостью увязки потерь давления в них после разветвления потока.

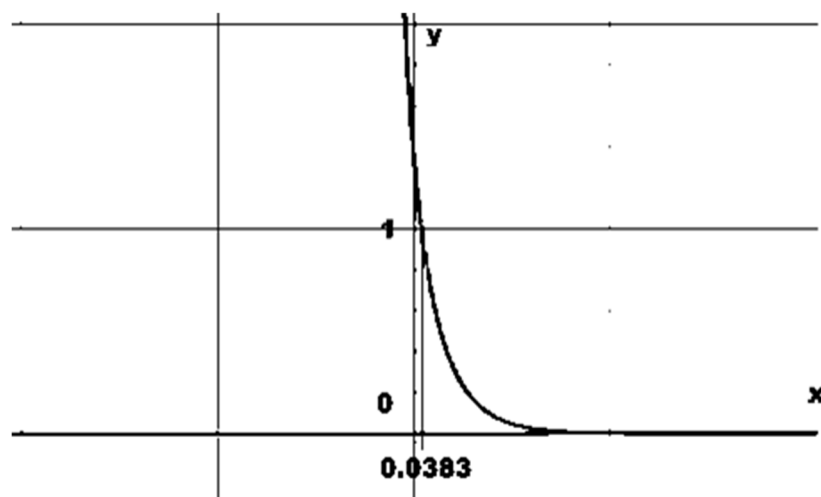


Рис. 5. График функции относительно максимальной высоты улавливания ΔH

Fig. 5. Graph of the function relative to the maximum trapping height ΔH

Из этого следует, что весь скоростной поток воздуха через центральный воздуховод не успевает снизить скорость в перфорированном воздухораспределителе и продолжает движение вдоль оси движения, тем самым не только снижая эффективность передувки, но и принцип работы устройства в целом.

Для увязки потерь центрального и крайних воздуховодов было предусмотрено установка дросселирующего клапана (рис. 6), по принципу работы схожем с шибером в системах вентиляции, изменяемого свое положение в зависимости от разности потерь.

Для расчета диаметра отверстия дросселя по методике расчета [18] по формуле (18) был подобран диаметр внутреннего проходного сечения, равный 35 мм.

$$d = \frac{4\pi Q v^2}{\mu \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}} = 0,035 \text{ м}, \quad (18)$$

где Q – требуемый увязочный расход;

v – скорость потока воздуха;

μ – коэффициент, учитывающий устройство и тип дросселя;

ΔP – разность потерь давления;

ρ – плотность протекающей среды.

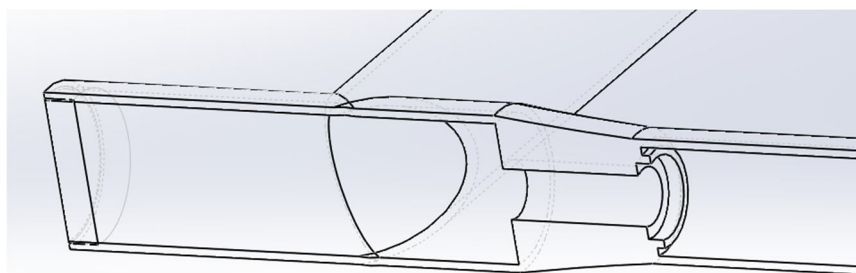


Рис. 6. Дроссельный клапан в сечении центрального воздуховода

Fig. 6. Throttle valve in the section of the central duct

После изменений конструкции вентиляции для подачи воздуха на переувку, был проведен вторичный расчет. При анализе полученных результатов, представленных на рис. 7, видно, что после установки дроссельного клапана местные потери давления в центральном воздуховоде увеличились, что поспособствовало увязке центрального и крайних воздухопроводов между собой для равномерного распределения скоростей и объемного расхода воздуха соответственно.

Средняя скорость движения воздуха в центральном воздуховоде составила 4,2 м/с, а в крайних – 3,6, что связано не только с установкой дросселя, но и заведомо уменьшенном диаметре центрального воздуховода, составляющий 80 мм.

После увязки воздухопроводов было проанализировано полученное распределение скоростей в продольном сечении на расстоянии 5 мм от отверстий бортового отсоса к центру ванны (рис. 8) и построен график по всей длине щели (рис. 9).

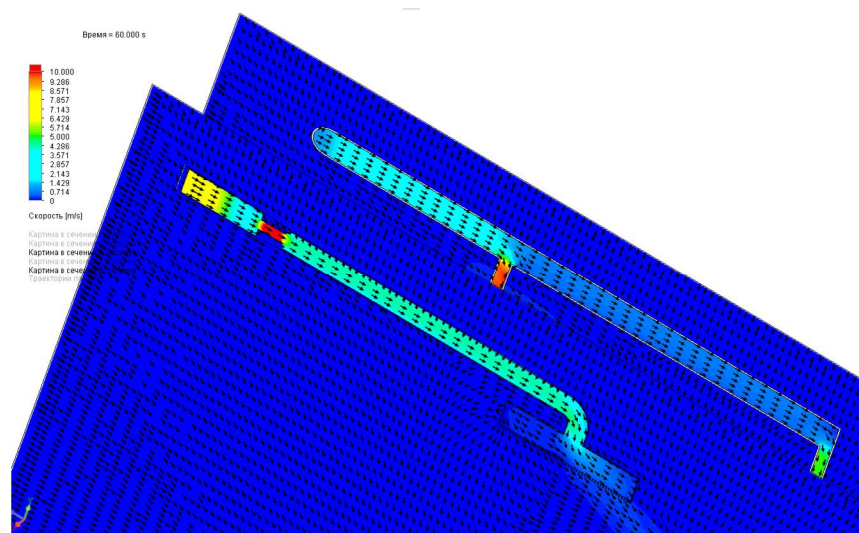


Рис. 7. Распределение скорости воздуха в сечении центрального и крайних воздухопроводов

Fig. 7. Distribution of air velocity in the section of the central and extreme ducts

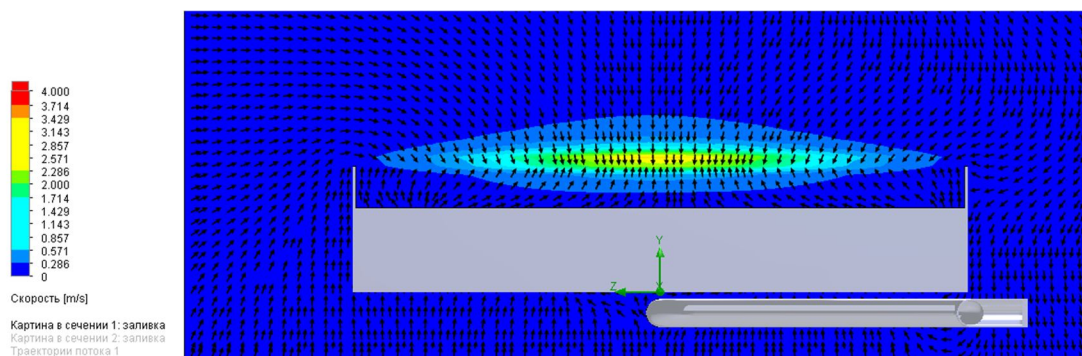


Рис. 8. Распределение скорости воздуха в сечении всасывающих отверстий бортов

Fig. 8. Distribution of air velocity in the section of the suction ports of the sides

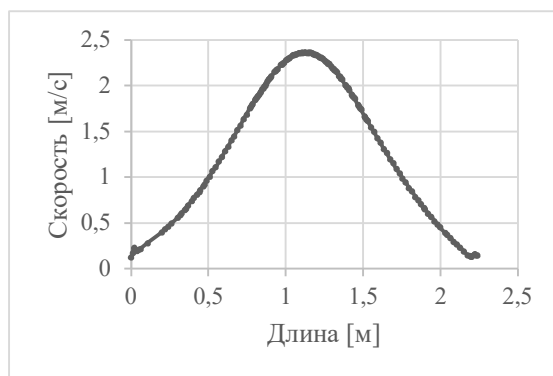


Рис. 9. График распределения скорости воздуха в центре всасывающих отверстий бортов

Fig. 9. Graph of the air velocity distribution in the center of the suction ports of the sides

Распределение скорости на входе в отверстия у края ванны малы по сравнению со скоростью в центре (рис. 9), что связано с одним установленным отсасывающим воздуховодом бортового отсоса.

Для равномерности необходимо предусмотреть равномерно распределенный всасывающий воздуховод по всей длине, а также прямоугольный вид конструкции борта, либо компенсировать неравномер-

ность установкой дополнительных расще-чек внутри его полости.

На рис. 10 представлена скорость движения воздуха в сечении крайнего воздуховода, где стоит отметить ее низкие значения в воздуховоде к дальнему насадку.

Так как часть расхода воздуха выходит из первой насадки, дальнейшее движение воздуха, а именно ее скорость, не компенсируется диаметром воздуховода.

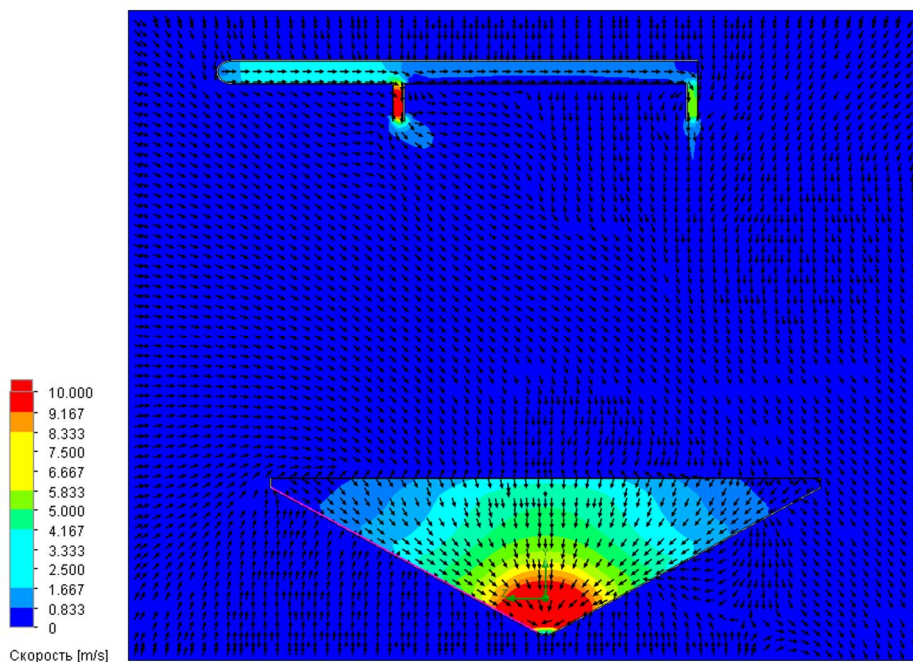


Рис. 10. Распределение скорости воздуха в крайних воздуховодах

Fig. 10. Distribution of air velocity in the outermost ducts

Для этого рассчитаем диаметр воздуховода для сохранения скорости движения воздуха к дальнему насадку через формулу сохранения расхода:

$$Q_0 = \frac{Q_0}{2} + v_0 \frac{\pi d_2^2}{4}. \quad (19)$$

Отсюда получим, что диаметр воздуховода после первой насадки по движению воздуха должен быть равен 70,7 мм.

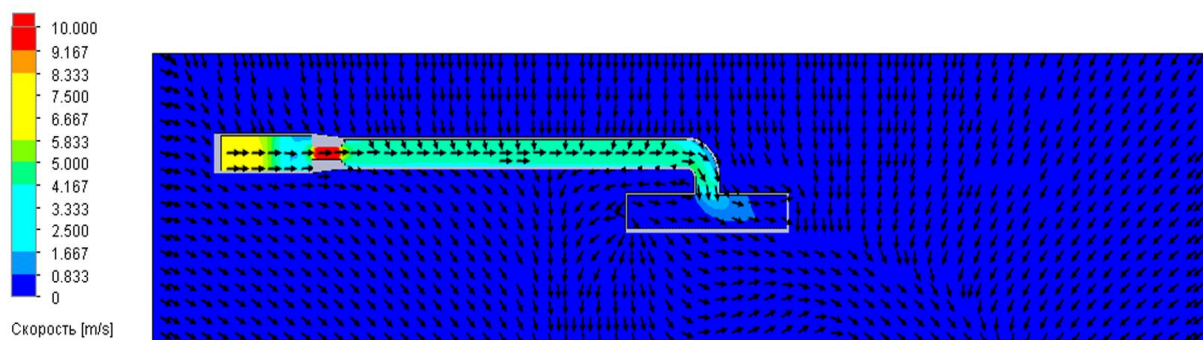


Рис. 11. Распределение скорости воздуха в центральном воздуховоде

Fig. 11. Distribution of air velocity in the central duct

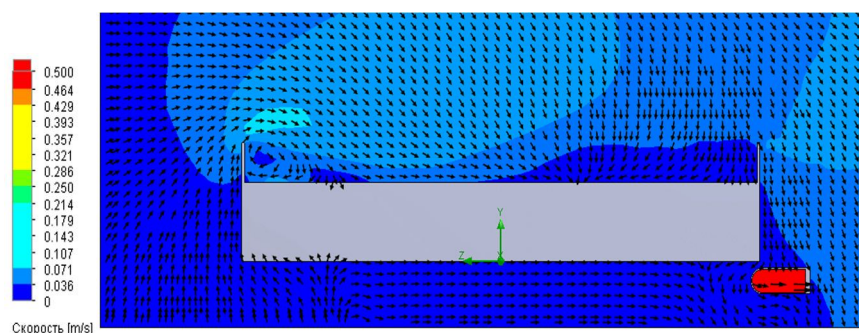


Рис. 12. Распределение скорости воздуха в продольном разрезе

Fig. 12. Distribution of air velocity in the longitudinal section

Однако рассматривая рис. 12 видно, что низкоскоростной поток струи *равномерно распределяется* по всей площади ванны, *прижимая* возможные испарения.

При этом график скорости вдоль оси Y (рис. 13) показывает, что у поверхности раствора ванны низкоскоростной поток воздуха сохраняет скорость и его скорость резко возрастает у щелевого всасывающего отверстия, что отмечено ранее.

При выборе диаметра воздуховода из номенклатурного ряда, стоит подобрать воздуховод диаметром 80 мм.

Увязка воздуховодов (рис. 11) многократно снизила выход воздуха из перфорированного воздуховода, но не изменила направление его движения, которое смещено по движению подающего воздуха.

На выходе из насадок (рис. 14) скорость воздуха равна 6 м/с, что отличается от расчетной в связи с тем, что общий расход подаваемого воздуха распределяется на 5 воздухораспределителей (один с перфорацией и четыре насадки). Подставляя расход воздуха в расчетную формулу, получим, что скорость воздуха на выходе должна быть равна 4,57 м/с. Это связано с неравномерным рас-

пределением расходов в воздуховодах, что на практике невозможно устранить из-за ограниченности ряда диаметров.

Из рис. 15 можно сделать вывод о том, что вектора скоростей показывают настиление низкоскоростного потока воздуха из центрального воздухораспределителя, отсекаание воздуха помещения и

границ ванны, всасывание воздуха через бортовые отверстия устройства.

Анализируя результаты можно утверждать, что проведенное исследование посредством моделирования показывает возможность улучшения конструкции устройств для определения эффективности работы моделей.

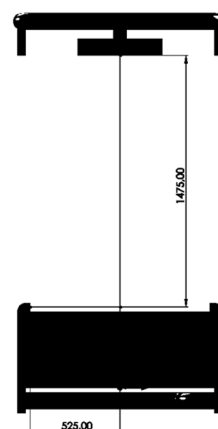
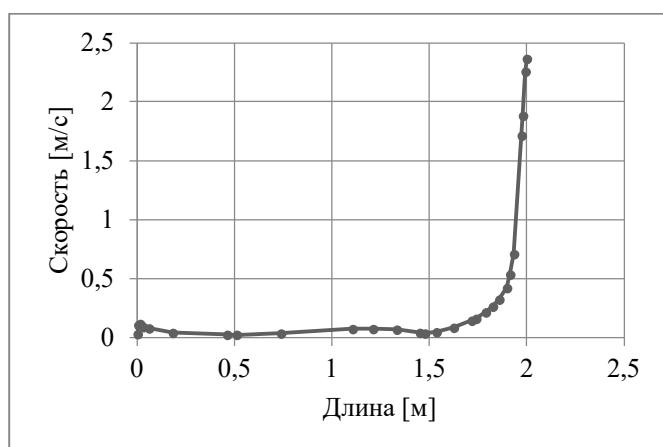


Рис. 13. График скорости по траектории «перфорированный воздухораспределитель-плоскость раствора» вдоль оси Y

Fig. 13. Velocity graph along the "perforated air distributor-mortar plane" trajectory along the Y axis

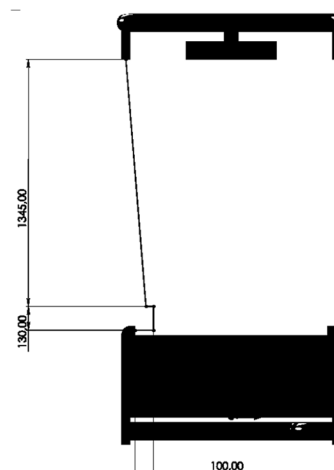
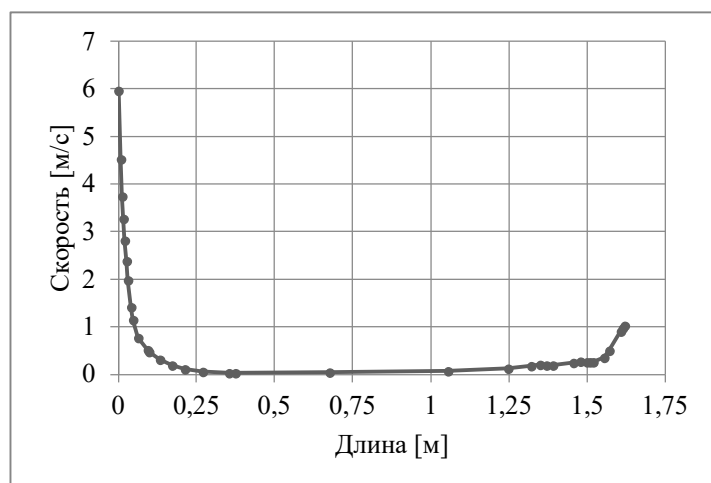


Рис. 14. График скорости воздушных потоков по траектории «насадка-поверхность раствора»

Fig. 14. Graph of air flow velocity along the "nozzle-solution surface" trajectory

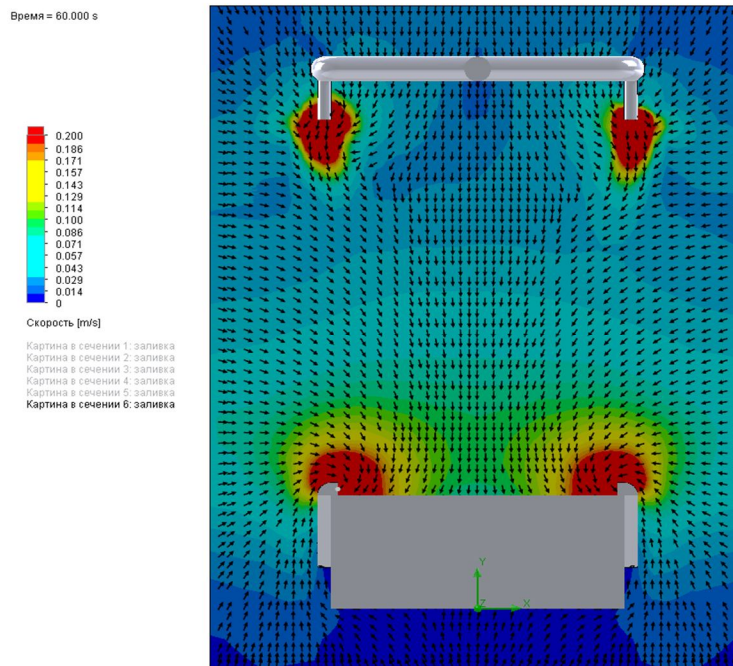


Рис. 15. Распределение скорости в сечении насадок и бортового отсоса местной приточно-вытяжной системы вентиляции

Fig. 15. Speed distribution in the cross section of the nozzles and on-board suction of the local supply and exhaust ventilation system

Выводы

По результатам проведения моделирования и изменений конструкции устройства можно сделать следующие выводы:

- необходимо предусмотреть вытяжные воздуховоды от симметрично расположенных бортов местного отсоса по длинной стороне технологической ванны;
- необходимо заранее предусмотреть вид и конструкцию бортов, так как при установленном одном отверстии в центральной части удаляемый поток воздуха будет неравномерно распределяться по длине отсасывающей щели;
- подбор диаметров подающих воздуховодов для увязки расхода воздуха, подаваемого на все виды воздухораспределителей; в предложенной модели и с

данными диаметрами воздуховодов, их увязка осуществляется с помощью дроссельного клапана, установленного после разветвления (крестовины) на центральном воздуховоде, диаметр проходного отверстия которого 35 мм;

– максимальная высота улавливания вредных испарений вытяжным устройством в центре ванны над поверхностью раствора равно 38,3 мм;

– увязка воздуховодов влияет на принцип и эффективность работы устройства бортового отсоса, нарушая равномерность распределения скоростей на определенных воздухораспределителях;

– принцип действия бортового отсоса по используемой полезной модели, исходя из проведенного исследования, полностью оправдан: комплексное использование простого типа устройства с подачей воздуха на передувку снижает требу-

емый вытяжной расход, а также позволяет создать прижимающий поток воздуха сверху, что предотвращает попадание испарений вредных веществ за кромки ванны в рабочую зону персонала;

– правильный подбор диаметров воздухопроводов на всех участках и их увязка обеспечит равномерность расхода подачи воздуха из воздухораспределителей;

– изменяя параметры моделирования можно подобрать вентиляторы для удаления воздуха от промышленной ванны и подачи подпирającego сверху воздуха, что снизит энергозатраты и позволит подобрать нужную конструкцию местного отсоса исходя из технологического процесса.

Список литературы

1. Совершенствование конструкции местного отсоса в системах вытяжной вентиляции гальванического цеха / Б. П. Новосельцев, Д. В. Лобанов, И. И. Звенигородский, С. А. Сафонов // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2022. № 4(23). С. 52-60.
2. Fan J.-N., Yang Y., Wang Y. Emission and local ventilation control of droplets generated by condensation and bubble-bursting during pickling // Sustainable Cities and Society. 2022. №76. 103491. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103491>
3. Shaptala V. V. Modeling of convective vapor-air flows near onboard Suction from open-surface reservoirs // Refractories and Industrial Ceramics. 2020. №60. P. 636-641.
4. Зингер Е. Ю. Проблема загрязнения атмосферного воздуха в гальваническом производстве и пути ее решения // Безопасность городской среды. Омск, 2022. С. 3-8.
5. Максимкова А. А. Обзор конструкций местных отсосов открытого типа с расходом // Безопасный и комфортный город. Орел, 2023. С. 585-593.
6. Нагорная А. Н., Сорокина Н. Г., Кузьменко А. Д. Энергосберегающие решения при реализации проектных решений по вентиляции гальванического производства // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. №23(3). С. 57-62.
7. Разработка конструкции установки химического никелирования, функционирующей в составе гальванической линии / А. Б. Борисенко, В. В. Храмцов, В. А. Немтинов, А. В. Крылов, М. А. Матрохин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2021. №27 (2). С. 275-284.
8. Zeng L., Liu G., Gao J. A circulating ventilation system to concentrate pollutants and reduce exhaust volumes: Case studies with experiments and numerical simulation for the rubber refining process // Journal of Building Engineering. 2021. №35. 101984. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101984>
9. Математическое моделирование течения вблизи экранированного бортового отсоса / О.А. Аверкова, Д.Н. Крутикова, И.Н. Логачев, К.И. Логачев, В.А. Уваров //

Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2016. №9. С. 96-102.

10. Сотников А. Г., Боровицкий А. А. Систематизация и обобщение характеристик местных вытяжных устройств-основа инженерной методики проектирования эффективных систем промышленной вентиляции // Magazine of Civil Engineering. 2012. Т.32, №. 6. С. 54-59.

11. Богословский В.Н. Внутренние санитарно-технические устройства. Вентиляция и кондиционирование воздуха. М.: Стройиздат, 1992. 319 с.

12. Гремчук В. А. Обзор методик расчёта потребного воздухообмена для бортовых отсосов в гальванических цехах // Молодой ученый. 2024. № 13 (512). С. 24-26.

13. Шиляев М.И., Хромова Е.М., Дорошенко Ю.Н. Типовые примеры расчета систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2012. 288 с.

14. Сакова Н. В., Барская П. Ю. Обеспечение безопасности воздушной среды на предприятии // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем. СПб., 2023. С. 209-213.

15. Чиняев И. Р. Методика расчёта характеристик запорно-регулирующих задвижек // Вестник Курганской ГСХА. 2012. №. 2. С. 71-73.

16. Conroy L. M., Trevelyan P. M. J., Ingham D. B. An analytical, numerical, and experimental comparison of the fluid velocity in the vicinity of an open tank with one and two lateral exhaust slot hoods and a uniform crossdraft // Annals of occupational hygiene. 2000. № 44. №. 6. P. 407–419.

17. Versteeg H.K., Malalasekera M. An Introduction to CFD Finite Volume Method. An Introduction to CFD Finite Volume Method. 2007. P. 267.

18. Шарифуллин В. М. Сравнительный анализ методик расчета бортовых отсосов // Научный журнал. 2018. №. 3(23). С. 11-13.

References

1. Novoseltsev B.P., Lobanov D.V., Zvenigorodsky I.I., Safonov S.A. Improvement of local exhaust hood design for galvanic shop ventilation. *Zhilishchnoe khozyaistvo i kommunal'naya infrastruktura = Housing and Communal Infrastructure*. 2022; (4): 52-60. (In Russ.)

2. Fan J.-N., Yang Y., Wang Y., et al. Emission and local ventilation control of droplets generated by condensation and bubble-bursting during pickling. *Sustainable Cities and Society*. 2022; 76: 103491. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103491>

3. Shaptala V.V. Modeling of convective vapor-air flows near onboard suction from open-surface reservoirs. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2020; 60: 636-641.5.

4. Zinger E.Y. The problem of atmospheric air pollution in galvanic production and ways to solve it. In: *Bezopasnost' gorodskoi sredy = Safety of Urban Environment*. Omsk, 2022. P. 3-8. (In Russ.)
5. Maksimkova A.A. Review of open-type local exhaust hood designs with flared openings. In: *Bezopasnyi i komfortnyi gorod = Safe and Comfortable City*. Orel, 2023. P. 585-593. (In Russ.)
6. Nagornaya A.N., Sorokina N.G., Kuzmenko A.D. Energy-saving solutions for ventilation system design in galvanic production. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura = Bulletin of the South Ural State University*. 2023; (23): 57-62 (In Russ.).
7. Borisenko A.B., Khramtsov V.V., Nemtinov V.A., Krylov A.V., Matrokhin M.A. Development of an electroless nickel plating unit for galvanic production lines. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Tambov State Technical University*. 2021; (27): 275-284. (In Russ.)
8. Zeng L., Liu G., Gao J., et al. A circulating ventilation system to concentrate pollutants and reduce exhaust volumes: Case studies with experiments and numerical simulation for the rubber refining process. *Journal of Building Engineering*. 2021; 35: 101984. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101984>
9. Averkova O.A., Krutikova D.N., Logachev I.N. Mathematical modeling of flow near a shielded onboard exhaust. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova = Vestnik of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2016; (9): 96-102. (In Russ.).
10. Sotnikov A.G., Borovitsky A.A. Classification of local exhaust devices as the basis for engineering design of industrial ventilation systems. *Magazine of Civil Engineering*. 2012; (6): 54-59. (In Russ.)
11. Bogoslovsky V.N. Internal sanitary equipment. Ventilation and air conditioning. Moscow: Stroyizdat; 1992. P. 319 (In Russ.).
12. Gremchuk V.A. Review of methods for calculating required air exchange for onboard exhausts in galvanic shops. *Molodoi uchenyi = Young scientist*. 2024; (13): 24-26. (In Russ.)
13. Shilyaev M.I., Khromova E.M., Doroshenko Yu. N. Standard examples of HVAC system calculations. Tomsk: Izd-vo Tom. gos. arkhit.-stroit. un-ta; 2012. P. 288. (In Russ.)
14. Sakova N.V., Barskaya P.Yu. Ensuring air safety in industrial facilities. In: *Modelirovanie i situatsionnoe upravlenie kachestvom slozhnykh sistem = Modeling and Situational Quality Management of Complex Systems*. St. Petersburg, 2023. P. 209-213. (In Russ.)
15. Chinyaev I.R. Calculation method for control valve characteristics. *Vestnik Kurganskoi GSKhA = Bulletin of Kurgan State Agricultural Academy*. 2012; (2): 71-73. (In Russ.)

16. Conroy L.M., Trevelyan P.M.J., Ingham D.B. An analytical, numerical, and experimental comparison of the fluid velocity in the vicinity of an open tank with one and two lateral exhaust slot hoods and a uniform crossdraft. *Annals of Occupational Hygiene*. 2000; 44(6): 407-419.
17. Versteeg H.K., Malalasekera M. An Introduction to CFD Finite Volume Method: An Introduction to CFD Finite Volume Method, 2007, pp. 267.
18. Sharifullin V.M. Comparative analysis of onboard exhaust calculation methods. *Nauchnyi zhurnal = Scientific Journal*. 2018; (3): 11-13. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Марков Никита Алексеевич, ассистент кафедры ТГВиГ, Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, г. Владимир, Российская Федерация, e-mail: mnikita.markovm@gmail.com, г. Владимир, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-5180-7352>

Nikita A. Markov, Assistant of the Heat and Gas Supply, Ventilation, and Hydraulics Department, Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs, e-mail: mnikita.markovm@gmail.com, Vladimir, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-5180-7352>

Угорова Светлана Вениаминовна, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой ТГВиГ, Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, г. Владимир, Российская Федерация, e-mail: ughorova@mail.ru

Svetlana V. Ugorova, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Heat and Gas Supply, Ventilation and Hydraulics Department, Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs, Vladimir, Russian Federation, e-mail: ughorova@mail.ru

УДК 681.51

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-55-70>



Математическое моделирование системы автоматического регулирования численным интегрированием

В. А. Хандожко ¹ ✉, О. Н. Федонин ¹, В. П. Матлахов ¹, А. В. Хандожко ¹

¹ Брянский государственный технический университет
б-р 50 лет Октября, д.7, г. Брянск 241035, Российская Федерация

✉ e-mail: vichandozhko@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Целью работы является исследование математической модели системы автоматического регулирования (САР), состоящей из регулятора и объекта управления для исполнения на микропроцессорной системе с поддержкой операционной системы реального времени. В качестве изменяемых параметров приняты структура САР, коэффициенты передачи передаточных функций звеньев, постоянные времени и транспортные задержки. Выходные данные представлены в виде переходных процессов. Задачей является сравнение аналитического и численных методов для программной реализации математической модели САР с применением программируемого логического контроллера (ПЛК) в составе испытательного стенда с микропроцессорным электроприводом. Задачей является сравнение аналитического и численных методов для программной реализации математической модели САР с применением программируемого логического контроллера (ПЛК) в составе испытательного стенда с микропроцессорным электроприводом.

Методы. Использованы метод системного анализа, теория автоматического управления, численные методы дифференцирования и интегрирования, дифференциальные и разностные уравнения.

Результаты. Практические рекомендации для выбора ПЛК при решении задач моделирования объектов и систем управления исходя из инерционности входящих в контур регулирования звеньев. В качестве критерия оценки используется относительная погрешность (интегральная, для САР в целом) и выполнение требования устойчивости цифровой модели.

Заключение. Исследования показали, что для канонических САР с объектами 1-го и 2-го порядка и транспортной задержкой с определенными критериями, такими как устойчивость цифровой модели и относительная погрешность (интегральная), существует связь между инерционностью моделируемых звеньев САР и производительностью ПЛК. Для практического подтверждения полученных результатов требуются дополнительные исследования.

Ключевые слова: математическая модель; система автоматического регулирования; ПИД-регулятор; ПЛК; САР.

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

Для цитирования: Математическое моделирование системы автоматического регулирования численным интегрированием / В. А. Хандожко, О. Н. Федонин, В. П. Матлахов, А. В. Хандожко // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(2): 55-70. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-55-70>.

Поступила в редакцию 23.04.2025

Подписана в печать 17.06.2025

Опубликована 23.07.2025

Mathematical modeling of automatic control system by numerical integration

Viktor A. Khandozhko ¹ ✉, Oleg N. Fedonin ¹, Vitaly P. Matlakhov ¹,
Alexander V. Khandozhko ¹

¹ Bryansk State Technical University
50 Let Oktyabrya Ave., 7, Bryansk 241035, Russian Federation

✉ e-mail: vichandozhko@gmail.com

Abstract

Purpose of research. The aim of the work is to study the mathematical model of the automatic control system (ACS), consisting of a regulator and a control object for execution on a microprocessor system with support for a real-time operating system. The structure of the ACS, the coefficients of transfer of the transfer functions of the links, time constants and transport delays are adopted as variable parameters. The output data are presented in the form of transient processes. The task is to compare the analytical and numerical methods for software implementation of the mathematical model of the ACS using a programmable logical controller (PLC) as part of a test bench with a microprocessor electric drive. The objective is to compare analytical and numerical methods for software implementation of a mathematical model of automatic control system using a programmable logic controller (PLC) as part of a test bench with a microprocessor electric drive.

Methods. The methods of system analysis, automatic control theory, numerical methods of differentiation and integration, differential and difference equations were used.

Results. Practical recommendations for choosing a PLC when solving problems of modeling objects and control systems based on the inertia of the links included in the control loop. The relative error (integral, for the ACS as a whole) and the fulfillment of the requirement for the stability of the digital model are used as an evaluation criterion.

Conclusion. The studies have shown that for canonical ACS with 1st and 2nd order objects and transport delay with certain criteria, such as digital model stability and relative error (integral), there is a connection between the speed of the simulated ACS links and the PLC performance. Additional studies are required for practical confirmation of the obtained results.

Keywords: mathematical model; automatic control system; PID controller; PLC; ACS.

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

For citation: Khandozhko V. A., Fedonin O. N., Matlakhov V. P., Khandozhko A. V. Mathematical modeling of automatic control system by numerical integration. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(2): 55-70 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-55-70>.

Received 23.04.2025

Accepted 17.06.2025

Published 23.07.2025

Введение

Для описания работы САР в динамике используют неоднородные дифференциальные уравнения вида:

$$\begin{aligned} y^{(n)}(t) + a_{n-1}y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1y'(t) + a_0y(t) = \\ = b_m f^{(m)}(t) + b_{m-1}f^{(m-1)}(t) + \dots + b_1f'(t) + b_0f(t) + \\ + g_k u^{(k)}(t) + g_{k-1}u^{(k-1)}(t) + \dots + g_1u'(t) + \\ + g_0u(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $y(t)$, $y'(t)$, ..., $y^{(n)}(t)$ – неизвестная функция времени и ее производные;

$f(t)$, $f'(t)$, ..., $f^{(m)}(t)$ – функция внешнего возмущения от времени и ее производные;

$u(t)$, $u'(t)$, ..., $u^{(k)}(t)$ – функция задающего воздействия от времени и ее производные;

$a_0, a_1, \dots, a_{n-1}, b_0, b_1, \dots, b_{m-1},$
 $g_0, g_1, \dots, g_{k-1}$ – коэффициенты.

Для линейных систем управления эти уравнения имеют постоянные коэффициенты [1].

Для исследования поведения САР широко используют операторный метод представления (преобразование Лапласа):

$$\begin{aligned} L\{f(t)\} = F(s) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt, \\ L^{-1}\{F(s)\} = f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} F(s) e^{st} ds. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь s – комплексная переменная:
 $s = c + j\omega$.

Уравнение (1), записанное относительно изображения по Лапласу, имеет вид

$$\begin{aligned} (a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_n)Y(s) = \\ (b_0s^m + b_1s^{m-1} + \dots + b_m)X(s), \end{aligned} \quad (3)$$

иначе

$$\begin{aligned} Y(s) = \frac{b_0s^m + b_1s^{m-1} + \dots + b_m}{a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_n} X(s) = \\ = W(s)X(s). \end{aligned} \quad (4)$$

$$W(s) = \frac{b_0s^m + b_1s^{m-1} + \dots + b_m}{a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_n}. \quad (5)$$

Передаточная функция $W(s)$ широко используется при анализе структурных схем. Функциональная схема САР приведена на рис.1 [2].

В микропроцессорных регуляторах используется дискретная форма представления передаточной функции. Математическое обеспечение для расчета $y(t)$ можно реализовать как с применением численного решения дифференциального уравнения (1), так и с помощью разностных уравнений [3, 4].

К методам численного решения дифференциальных уравнений относятся метод Эйлера, Рунге-Кутты и Адамса [5]. Современные проблемно-ориентированные программные продукты имеют универсальные решатели на базе этих методов. Для решения в реальном масштабе времени необходим наиболее быстрый метод. Сравнивая известные методы по точности и трудоемкости вычислений, предпочтение следует отдать методу Эйлера (явная схема). Согласно этому методу расчетная формула имеет вид

$$\begin{aligned} y_{i+1} &= y_i + h \cdot f(x_i, y_i), \\ x_{i+1} &= x_i + h, \quad i=0, 1, \dots, n. \end{aligned} \quad (6)$$

Как известно, устойчивость явного метода Эйлера ниже, чем у неявного.

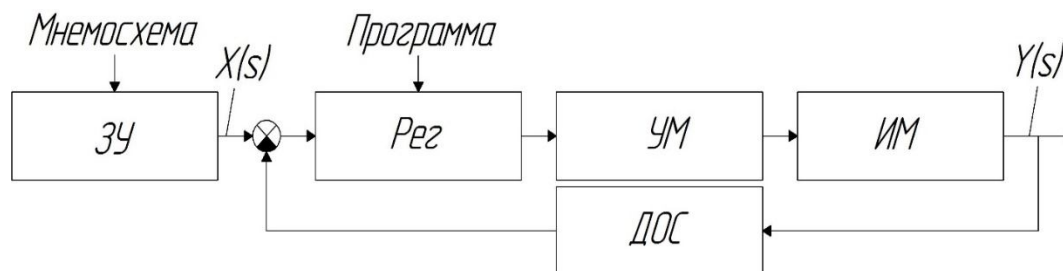


Рис.1. Функциональная схема САР: **ЗУ** – задающее устройство для управления уставками параметров технологического процесса (APM оператора со SCADA/панель оператора); **X(s)** – уставка; **Рег** – регулятор (микропроцессорный/ ПЛК); **УМ** – усилитель мощности (магнитный пускатель/ сервопривод); **ИМ** – исполнительный механизм (шпиндель/ заслонка); **ДОС** – датчик обратной связи (давление/ температура); **Y(s)** – технологический параметр

Fig.1. Functional diagram of the SAR: **ЗУ** – setting device for controlling process parameter settings (operator workstation with SCADA/operator panel); **X(s)** – setting; **Рег** – regulator (microprocessor/PLC); **УМ** – power amplifier (magnetic starter/servo drive); **ИМ** – actuator (spindle/damper); **ДОС** – feedback sensor (pressure/temperature); **Y(s)** – process parameter

При использовании неявного метода решение становится нелинейным, что приводит к увеличению трудоемкости вычислений. Устойчивость явного метода Эйлера обеспечивается рациональным подбором шага интегрирования h .

Второй подход формализации решения уравнений (1) основан на переходе от преобразования Лапласа к z -преобразованию:

$$z = e^{sT} = 1 + \frac{sT}{1!} + \frac{s^2 T^2}{2!} + \frac{s^3 T^3}{3!} + \dots \quad (7)$$

В зависимости от схемы известны три формы дискретизации: метод левых прямоугольников, метод прямоугольников и метод трапеций. Соответствующие им замены в передаточных функциях имеют вид:

а) метод левых прямоугольников

$$s = \frac{z-1}{T}, \quad (8)$$

б) метод прямоугольников

$$s = \frac{z-1}{zT}, \quad (9)$$

в) метод трапеций

$$s = \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1}. \quad (10)$$

Материалы и методы

Модель САР

В реальных физических системах широко используются численные методы идентификации объектов управления, при этом распространенными являются модель первого и второго порядков [6].

Модель первого порядка (тепломассопереноса) имеет задержку τ и описывается уравнением вида

$$y(t) = \begin{cases} K_{oy} \left[1 - \exp\left(-\frac{t-\tau}{T}\right) \right] & \text{при } t \geq \tau, \\ 0 & \text{при } t < \tau. \end{cases} \quad (11)$$

В операторной форме модель имеет вид [7]

$$W(s) = \frac{K_{oy}}{Ts+1} e^{-s\tau}. \quad (12)$$

При идентификации параметров модели определяют коэффициент передачи объекта управления K_{oy} , постоянную времени T и транспортную задержку τ .

Если модель первого порядка неадекватно описывает объект управления и в нем явно просматривается еще одна не-

зависимая инерционность, то используют модель второго порядка. Она описывается уравнением вида [8]:

$$y(t) = \begin{cases} K_{oy} \left[1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} \exp\left(-\frac{t-\tau}{T_1}\right) - \frac{T_2}{T_2 - T_1} \exp\left(-\frac{t-\tau}{T_2}\right) \right] & \text{при } t \geq \tau, T_1 \neq T_2 \\ K_{oy} \left[1 - \left(1 + \frac{t}{T_1}\right) \exp\left(-\frac{t-\tau}{T_1}\right) \right] & \text{при } t \geq \tau, T_1 = T_2 \\ 0 & \text{при } t < \tau. \end{cases} \quad (13)$$

В операторной форме модель имеет вид [9]

$$W(s) = \frac{K_{oy}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} e^{-s\tau}. \quad (14)$$

В отличие от модели первого порядка она имеет не одну, а две инерционности T_1 и T_2 .

Модель регулятора обычно строится по схеме П/ПИ/ПИД в зависимости от критериев оптимизации САР [10]. ПИД-регулятор является общим случаем, П- и ПИ-регуляторы можно рассматривать как его частные случаи, когда интегральный и дифференциальный коэффициенты передачи равны нулю [11].

Уравнение, описывающее работу ПИД-регулятора, имеет вид:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_{\text{инт}}} \int_0^{T_{\text{инт}}} e(t) dt + T_{\text{диф}} \frac{de(t)}{dt}, \quad (15)$$

где K_p – пропорциональный коэффициент передачи; $T_{\text{инт}}$ – постоянная интегрирования; $T_{\text{диф}}$ – время предварения.

Передаточная функция имеет вид

$$R(s) = K_p + \frac{1}{T_{\text{инт}} s} + T_{\text{диф}} s. \quad (16)$$

При программной реализации ПИД-регуляторов есть свои особенности. Так, идеальное дифференцирующее звено заменяют на реальное с постоянной времени фильтра T_f , причем обычно $T_f \ll T_d$.

Для физической реализации ПИД-регулятора обычно вводят нелинейности типа «насыщение» и «мертвая зона» [12-14].

В графическом виде динамическая модель САР имеет вид (рис.2).

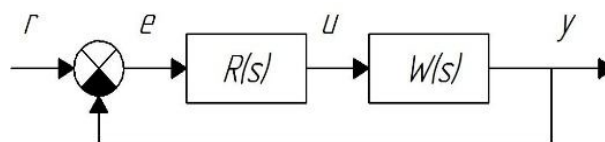


Рис. 2. Структурная схема САР

Fig. 2. Structural diagram of the SAR

Численная модель (метод Эйлера).

Инерционное звено описывается дифференциальным уравнением вида

$$T_{\text{из}} \cdot \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_{\text{из}} \cdot x(t). \quad (17)$$

Выполнив замену вида

$$\frac{dy(t)}{dt} \approx \frac{\Delta y(t)}{\Delta t} = \frac{y(t) - y(t - \Delta t)}{\Delta t}, \quad (18)$$

получим выражение

$$T_{\text{из}} \cdot \frac{y(t) - y(t - \Delta t)}{\Delta t} + y(t) = K_{\text{из}} \cdot x(t). \quad (19)$$

В выражениях (18) и (19) общепринятое обозначение Δt соответствует шагу интегрирования h в уравнении (6).

Выразив функцию $y(t)$ из (19), получим

$$y(t) = \frac{T_{\text{из}}}{T_{\text{из}} + \Delta t} \cdot y(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{T_{\text{из}} + \Delta t} \cdot K_{\text{из}} \cdot x(t). \quad (20)$$

Звено запаздывания описывается уравнением вида

$$y(t)=K_{\text{зап}} \cdot x(t-\tau). \quad (21)$$

Интегральная компонента ПИД-регулятора описывается уравнением вида

$$y(t)=\frac{1}{T_{\text{инт}}} \cdot \int_0^t x(t)dt. \quad (22)$$

Выполнив замену вида (18), получим

$$y(t)=y(t-\Delta t)+\frac{x(t)}{T_{\text{инт}}} \cdot \Delta t. \quad (23)$$

Дифференциальная компонента ПИД-регулятора описывается уравнением вида

$$T_{\text{ф}} \cdot \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = T_{\text{диф}} \cdot \frac{dx(t)}{dt}. \quad (24)$$

Выполнив замену вида (18), получим

$$y(t)=\frac{1}{T_{\text{ф}}+\Delta t} \cdot T_{\text{ф}} \cdot y(t-\Delta t) + T_{\text{диф}} \cdot (x(t)-x(t-\Delta t)). \quad (25)$$

Ввиду высшего порядка малости $T_{\text{ф}} \ll T_{\text{диф}}$ постоянная фильтра вносит незначительную погрешность в расчет, обеспечивая при этом физическую реализуемость производной и помехоустойчивость [15-17].

С учетом вышеперечисленного в обозначениях (рис.2) система уравнений для дискретного описания динамики САР с объектом первого порядка имеет вид

$$\begin{cases} e(t)=r(t)-y(t), \\ u(t)=K_{\text{п}}e(t)+\left(u(t-\Delta t)+\frac{e(t)}{T_{\text{инт}}} \cdot \Delta t\right)+ \\ +\left(\frac{1}{T_{\text{ф}}+\Delta t} \cdot \left(T_{\text{ф}} \cdot u(t-\Delta t)+T_{\text{диф}} \cdot (e(t)-e(t-\Delta t))\right)\right), \\ u_1(t)=\frac{T_{\text{из}}}{T_{\text{из}}+\Delta t} \cdot u_1(t-\Delta t)+\frac{\Delta t}{T_{\text{из}}+\Delta t} \cdot K_{\text{из}} \cdot u(t), \\ y(t)=K_{\text{зап}} \cdot u_1(t-\tau). \end{cases} \quad (26)$$

В системе (26) выражение $u_1(t)$ соответствует выходу инерционного звена и входу звена запаздывания.

Для объекта второго порядка система уравнений для дискретного описания динамики САР имеет вид:

$$\begin{cases} e(t)=r(t)-y(t), \\ u(t)=K_{\text{п}}e(t)+\left(u(t-\Delta t)+\frac{e(t)}{T_{\text{инт}}} \cdot \Delta t\right)+ \\ +\left(\frac{1}{T_{\text{ф}}+\Delta t} \cdot \left(T_{\text{ф}} \cdot u(t-\Delta t)+T_{\text{диф}} \cdot (e(t)-e(t-\Delta t))\right)\right), \\ u_1(t)=\frac{T_{\text{из1}}}{T_{\text{из1}}+\Delta t} \cdot u_1(t-\Delta t)+\frac{\Delta t}{T_{\text{из1}}+\Delta t} \cdot K_{\text{из1}} \cdot u(t), \\ u_2(t)=\frac{T_{\text{из2}}}{T_{\text{из2}}+\Delta t} \cdot u_2(t-\Delta t)+\frac{\Delta t}{T_{\text{из2}}+\Delta t} \cdot K_{\text{из2}} \cdot u_1(t), \\ y(t)=K_{\text{зап}} \cdot u_2(t-\tau). \end{cases} \quad (27)$$

В системе (27) выражение $u_1(t)$ соответствует выходу первого инерционного звена и входу второго инерционного звена. Выражение $u_2(t)$ соответствует выходу второго инерционного звена и

входу звена запаздывания. Индексы 1 и 2 в обозначениях коэффициентов передачи и постоянных времени соответствуют первому и второму инерционным звеньям соответственно.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим численное моделирование системы уравнений (26) и (27).

Параметры моделирования для системы с объектами 1-го и 2-го порядка приведены в табл.1.

Таблица 1. Исходные параметры**Table 1.** Initial parameters

Наименование /Name	Обозначение / Designation	Значение / Value	Размерность / Dimension
Характеристики системы с объектом 1-го порядка / Characteristics of a system with a 1st order object			
Коэффициент передачи / Transfer coefficient	K_I	1	—
Постоянная времени / Time constant	T_I	0,5	с
Транспортная задержка / Transport delay	τ	0,3	с
Характеристики системы с объектом 2-го порядка / Characteristics of a system with a 2nd order object			
Коэффициент передачи 1-го звена / Gear ratio of the 1st link	K_I	2,5	—
Постоянная времени 1-го звена / Time constant of the 1st link	T_I	0,3	с
Коэффициент передачи 2-го звена / 2nd link gear ratio	K_2	1,2	—
Постоянная времени 2-го звена / Time constant of the 2nd link	T_2	0,7	с
Транспортная задержка / Transport delay	τ	0,2	с

При выборе параметров объекта управления внимание уделялось в основном постоянным времени. Как будет показано ниже, относительно малые значения постоянных времени выбраны не случайно, а исходя из быстродействия ПЛК.

В качестве регуляторов рассматривались П-, ПИ- и ПИД-регуляторы. Их настройка выполнена по методу Циглера-Никольса [4, 18, 19, 20]. Результаты настройки приведены в табл. 2.

При выборе шага интегрирования использована теорема Котельникова, когда

критерием эквивалентности является требование устойчивости цифровой модели. Так, для системы с объектом 1-го порядка выбран максимальный шаг 0,15 с, так как он является кратным транспортной задержке 0,3 с. Транспортная задержка – это минимальная постоянная времени объекта ($\tau=0,3 < T_I=0,5$). Для системы 2-го порядка при транспортной задержке 0,2 с выбран максимальный шаг 0,1 с. Транспортная задержка в данном случае – это также минимальная постоянная времени объекта ($\tau=0,2 < T_I=0,3 < T_2=0,7$).

Таблица 2. Параметры регуляторов**Table 2.** Regulator parameters

Тип регулятора /Regulator type	K_p	K_i	K_d
Система с объектом 1-го порядка /System with 1st order object			
Пропорциональный / Proportional	1,67	-	-
Пропорционально-интегральный / Proportional-integral	1,5	1,67	-
Пропорционально-интегро- дифференциальный / Proportional-integro-differential	2	3,33	0,3
Система с объектом 2-го порядка / System with 2nd order object			
Пропорциональный / Proportional	0,15	-	-
Пропорционально-интегральный / Proportional-integral	0,69	1,14	-
Пропорционально-интегро- дифференциальный / Proportional-integro-differential	0,92	2,29	0,09

Невязка метода Эйлера определяется формулой

$$\psi_n = y(x_{n+1}) - y(x_n) - hf(x_n, y(x_n)). \quad (28)$$

В исследовании оценена суммарная относительная погрешность для получения практических рекомендаций при выборе характеристик ПЛК исходя из заданной погрешности моделирования. Качество регулирования, как и его параметры, в работе не рассматриваются. Рассматривается лишь отклонение численного решения от аналитического.

Результат моделирования САР с объектом 1-го порядка с П-регулятором показан на рис. 3.

Результат моделирования САР с объектом 1-го порядка с ПИ-регулятором показан на рис. 4.

Результат моделирования САР с объектом 1-го порядка с ПИД-регулятором показан на рис.5.

Результат моделирования САР с объектом 2-го порядка с П-регулятором показан на рис. 6.

Результат моделирования САР с объектом 2-го порядка с ПИ-регулятором показан на рис. 7.

Результат моделирования САР с объектом 2-го порядка с ПИД-регулятором показан на рис. 8.

Относительные погрешности моделирования приведены в табл. 3.

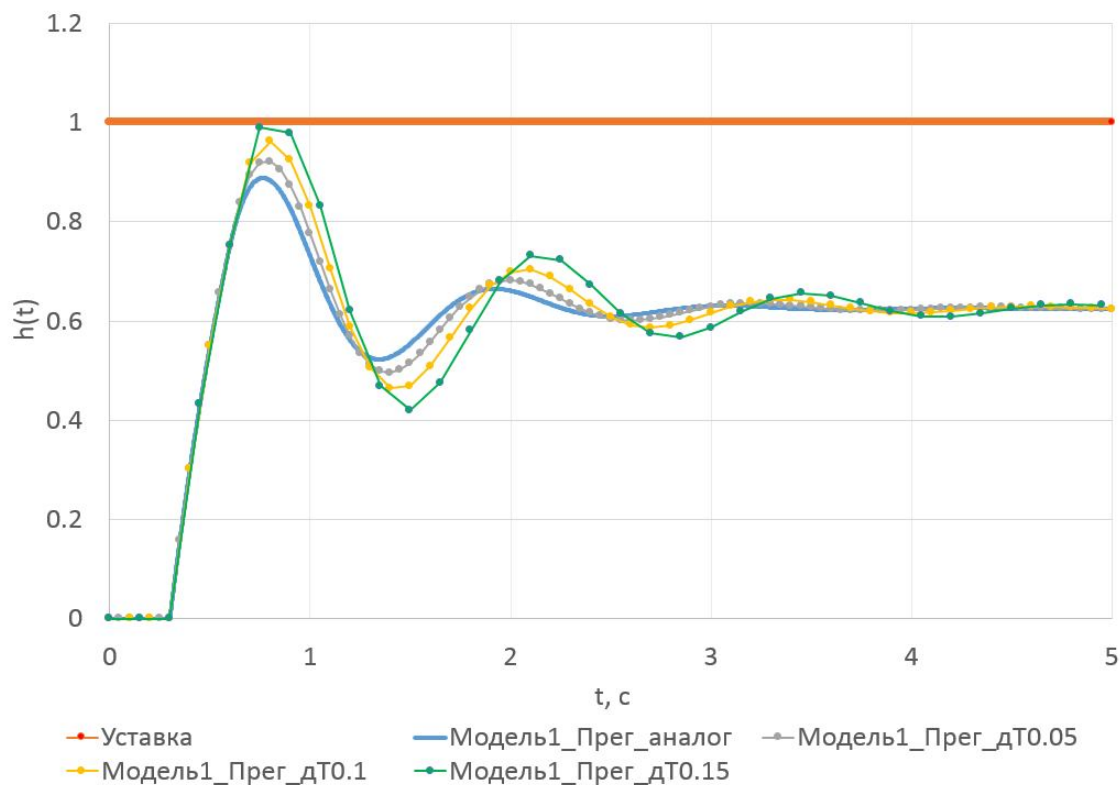


Рис. 3. Переходные характеристики САР с объектом 1-го порядка и П-регулятором

Fig. 3. Transient characteristics of the automatic control system with a 1st order object and a P-controller

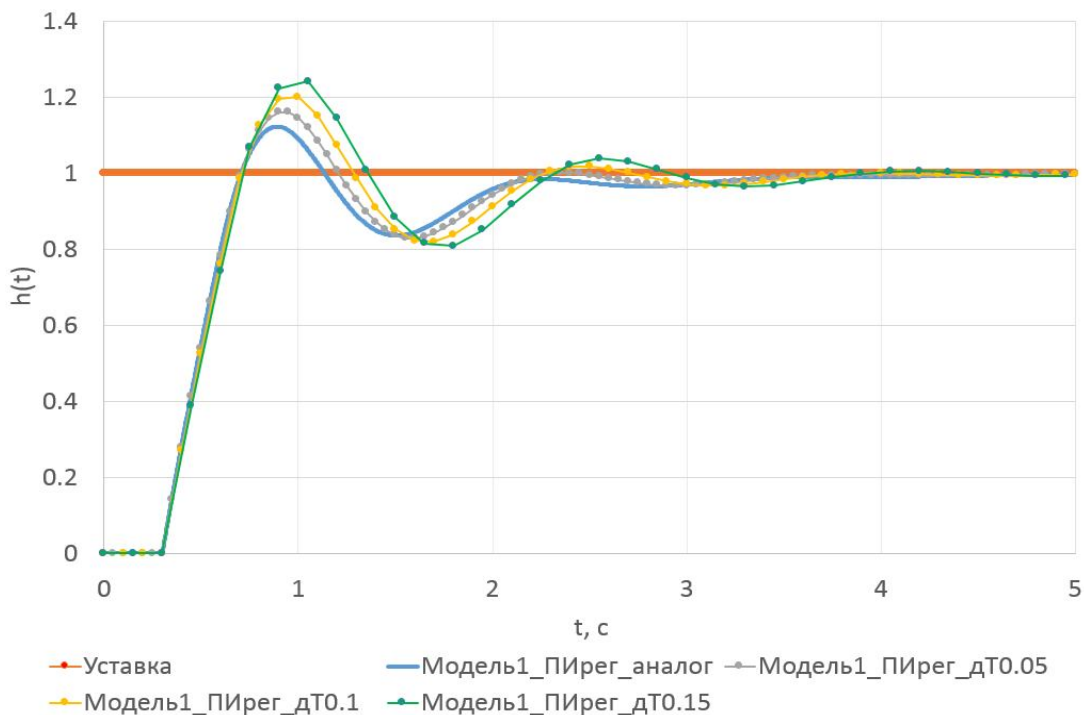


Рис. 4. Переходные характеристики САР с объектом 1-го порядка и ПИ-регулятором

Fig. 4. Transient characteristics of the automatic control system with a 1st order object and a PI-controller

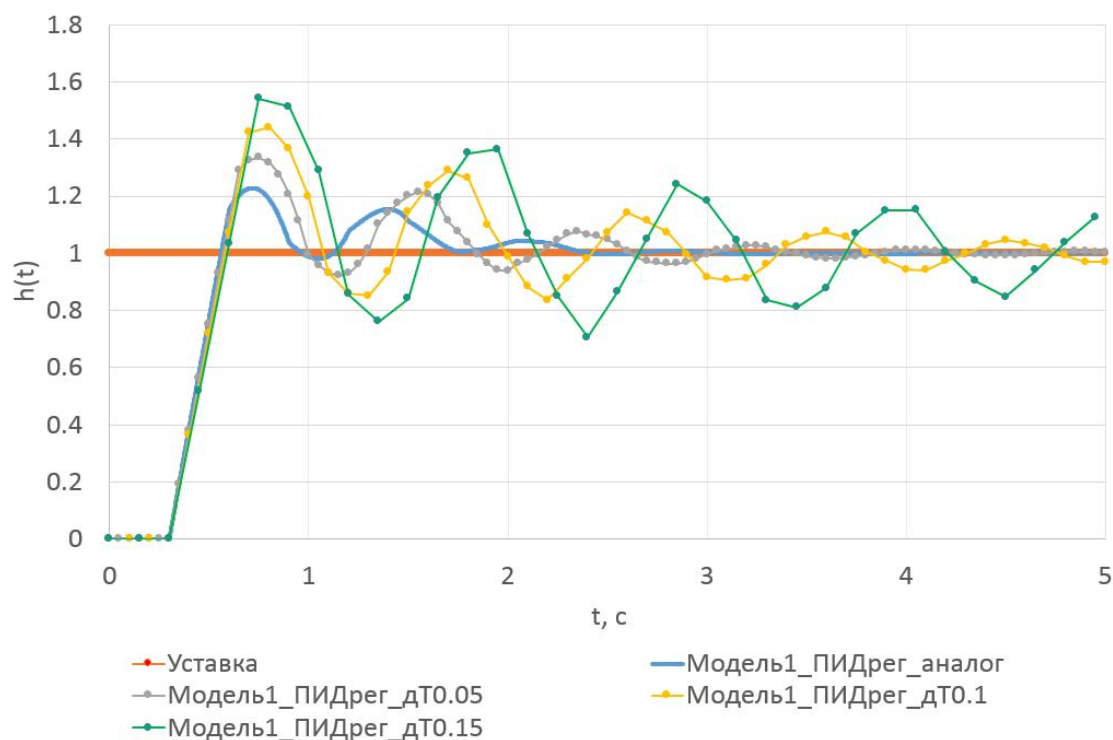


Рис. 5. Переходные характеристики САУ с объектом 1-го порядка и ПИД-регулятором

Fig. 5. Transient characteristics of the automatic control system with a 1st order object and a PID-controller

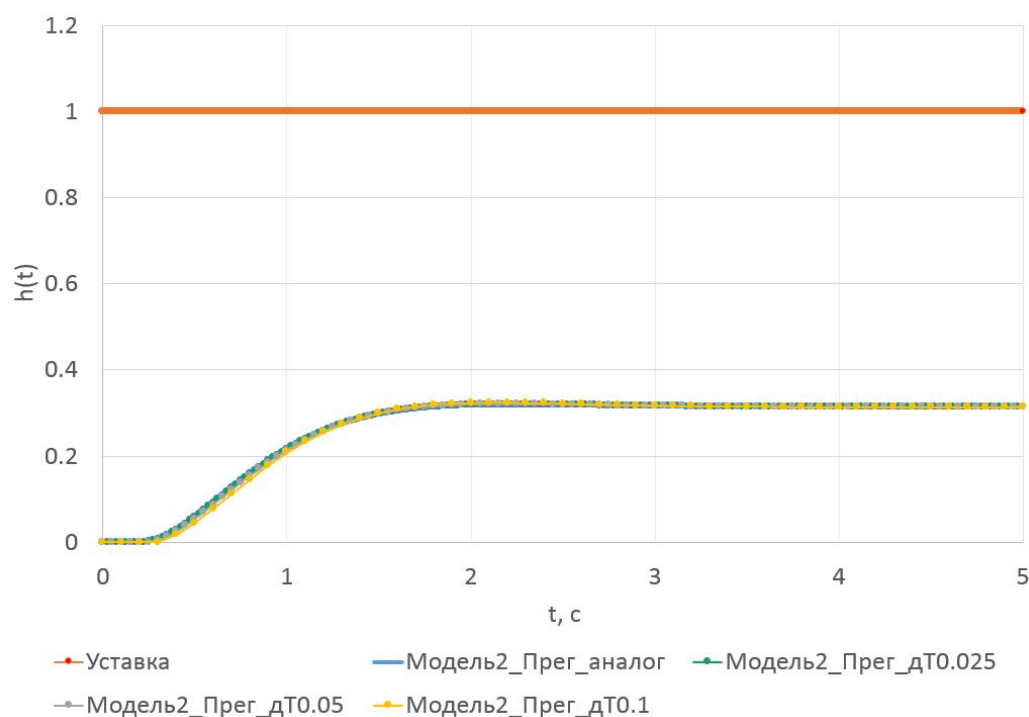


Рис. 6. Переходные характеристики САУ с объектом 2-го порядка и П-регулятором

Fig. 6. Transient characteristics of the automatic control system with a 2st order object and a P-controller

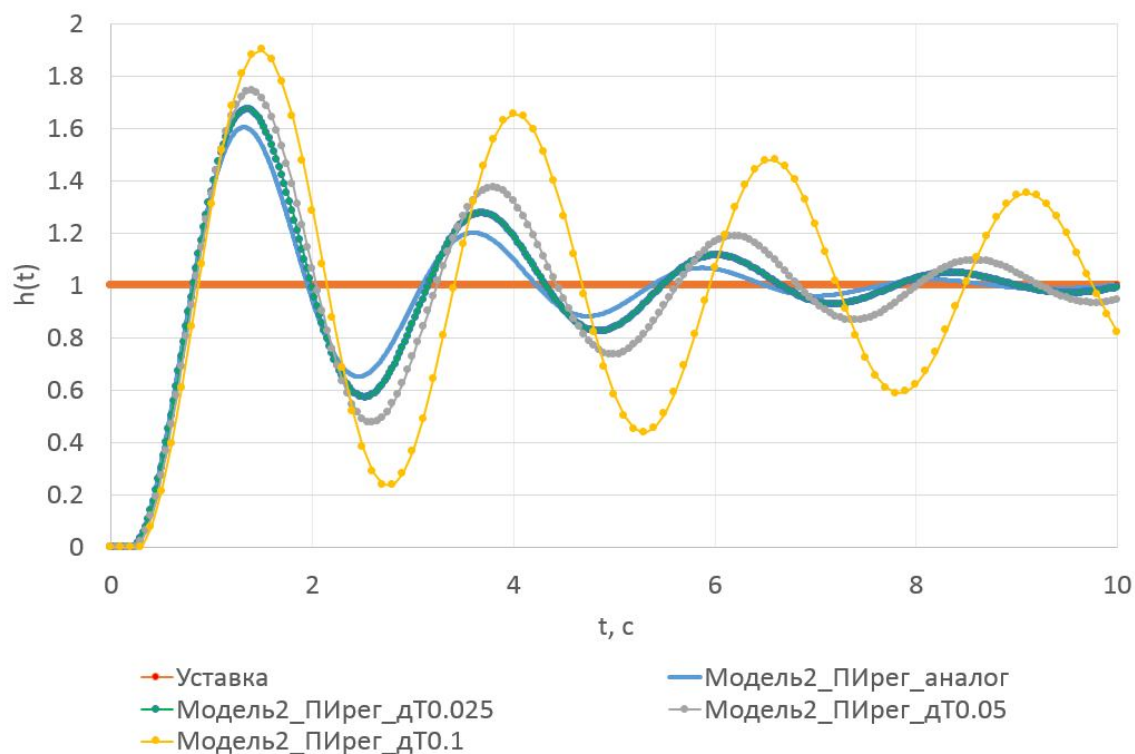


Рис. 7. Переходные характеристики САР с объектом 2-го порядка и ПИ-регулятором

Fig. 7. Transient characteristics of the automatic control system with a 2st order object and a PI-controller

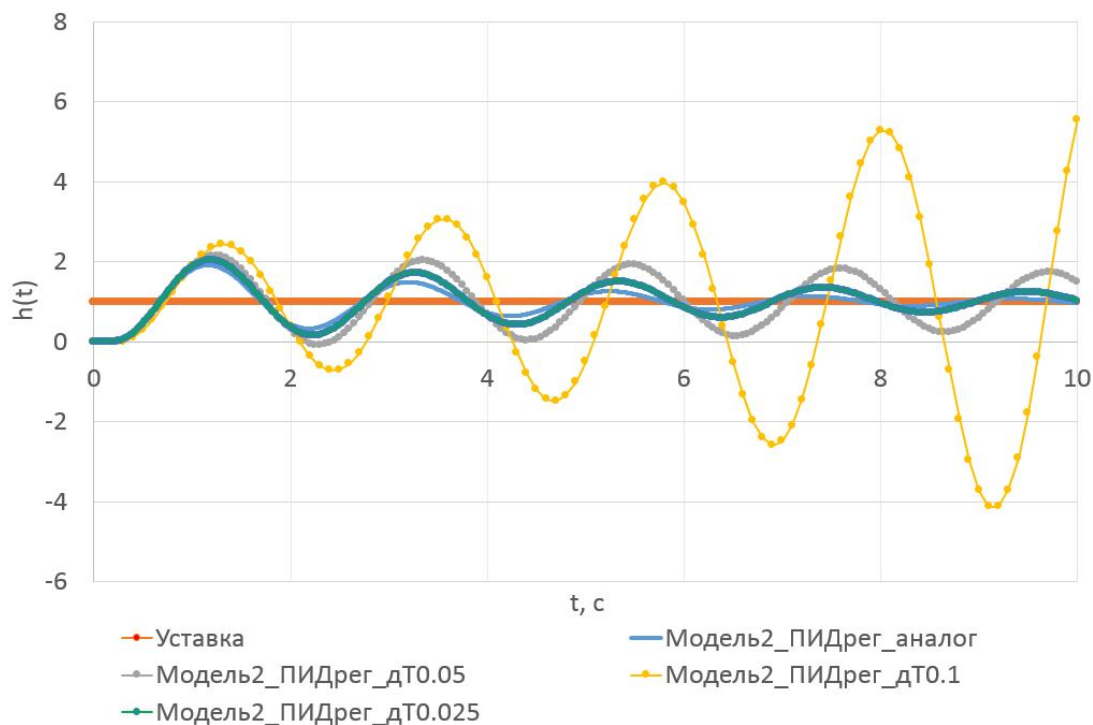


Рис. 8. Переходные характеристики САР с объектом 2-го порядка и ПИД-регулятором

Fig. 8. Transient characteristics of the automatic control system with a 2st order object and a PID-controller

Таблица 3. Результаты моделирования

Table 3. Simulation results

Система с объектом 1-го порядка / System with 1st order object			
Шаг интегрирования, с / Integration step, s	$h_1=0,05$	$h_2=0,1$	$h_3=0,15$
П-регулятор / P-regulator	7,3	15,8	24,4
ПИ-регулятор / PI-regulator	6	13,1	20,4
ПИД-регулятор - PID-regulator	16	31,8	45,6
Система с объектом 2-го порядка / System with 2nd order object			
Шаг интегрирования, с / Integration step, s	$h_1=0,025$	$h_2=0,05$	$h_3=0,1$
П-регулятор / P-regulator	22,8	47,5	45,8
ПИ-регулятор / PI-regulator	14,4	31,7	69,8
ПИД-регулятор / PID-regulator	55,7	123,7	-

Выводы

Результаты моделирования показывают, что для уверенного моделирования САР с объектом 1-го порядка при шаге интегрирования $h_1=0,05$ с относительная интегральная погрешность не превышает 10% для П- и ПИ-регуляторов. Если допуск можно увеличить до 20%, то удовлетворительные результаты могут быть получены ПИД-регулятора ($h_1 = 0,05$ с) и П- и ПИ-регулятора при $h_2 = 0,1$ с. Таким образом, адекватные результаты моделирования для объектов с малой постоянной времени $\tau=0,3$ с можно получить при цикле ПЛК 0,05 с и менее.

Для моделирования САР с объектом 2-го порядка при шаге интегрирования $h_1=0,025$ с относительная интегральная погрешность начинается от 14,4% и более для ПИ-регулятора. Эксперимент для ПИД-регулятора с шагом $h_3 = 0,15$ с отчетливо показывает потерю устойчивости цифровой модели САР, а не самого ПИД-регулятора, так как при уменьшении шага интегрирования наблюдается устойчивая тенденция к снижению колебаний. Таким образом, адекватные результаты моделирования для объектов 2-го порядка с малой постоянной времени $\tau=0,2$ с можно получить при цикле ПЛК менее 0,025 с.

Список литературы

1. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. 2006. № 4. С. 66-74; 2007. № 1. С. 78 - 88.
2. Демин И.О., Саблина Г.В. Исследование методов настройки параметров ПИД-регулятора // Автоматика и программная инженерия. 2020. №1(31). С. 174 - 181.
3. Хандожко В. А., Матлахов В. П. Математическая модель технологического участка магистрального трубопровода с регулированием дросселированием// Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2023. №. 4(22). С. 18-27. DOI: 10.30987/2658-6436-2023-4-18-27.
4. Саблина Г.В., Маркова В.А. Настройка параметров ПИД-регулятора в системе с объектом второго порядка с запаздыванием // Автометрия. 2022. Т.58, №4. С. 110 - 117. DOI: 10.15372/AUT20220411.

5. Горячев О. В., Калиничев К. Н. Анализ методов настройки, оптимизации и адаптации ПИД-регуляторов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2024. Вып.10. С. 526 - 530. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-526-527.

6. Воробьев В. Ю., Саблина Г. В. Расчёт и оптимизация параметров дискретного ПИД-регулятора методом Циглера – Никольса // Автоматика и программная инженерия. 2019. Т. 27, № 1. С. 9 – 13.

7. Синтез робастных ПИД-регуляторов методом двойной оптимизации / В.А. Жмудь, А.С. Востриков, А.Ю. Ивойлов, Г.В. Саблина // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. Т. 21, № 2. С.67 – 74. DOI: 10.17587/mau.21.67-73.

8. Arun Muraleedharan, Hiroyuki Okuda, Tatsuya Suzuki. Real-time implementation of randomized model predictive control for autonomous driving //IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. 2021. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Model_predictive_control (дата обращения: 16.03.2025).

9. Davut Izci, Serdar Ekinci, Abdelazim G. Hussien. Effective PID controller design using a novel hybrid algorithm for high order systems // PLOS ONE. 2023. URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0286060> (дата обращения: 13.03.2025).

10. Design of simple nonovershooting controllers for linear high order systems with or without time delay / Huanchao Du, Bobo Feng, Jieshi Shen, Dan Li. // Scientific Reports. 2024. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-49802-x#Sec2> (дата обращения: 13.04.2025).

11. Linear Tracking MPC for Nonlinear Systems – Part I: The Model-Based Case / Julian Berberich, Johannes Köhler, Matthias A. Müller, Frank Allgöwer // IEEE Transactions on Automatic Control. 2022. Vol. 67(9). P. 4390–4405. URL: <https://arxiv.org/abs/2105.08560> (дата обращения: 16.03.2025).

12. Stability properties of multistage nonlinear model predictive control / Lucia Sergio, Subramanian Sankaranarayanan, Limon Daniel, Engell Sebastian // Systems & Control Letters, 2020. Vol. 143(9). URL: https://www.researchgate.net/publication/343213495_Stability_properties_of_multistage_nonlinear_model_predictive_control (дата обращения: 16.04.2025).

13. Principles of PID Controllers / Muhammad Abdillah, Tirta Jayadiharja, R Harry Arjadi, Herlambang Setiadi, Ramon Zamora, Yusrizal Afif. 2023. URL: https://www.zhinst.com/sites/default/files/documents/202307/zi_whitepaper_principles_of_pid_controllers.pdf (дата обращения: 16.04.2025).

14. Muraleedharan Arun. Real-Time Implementation of Randomized Model Predictive Control for Autonomous Driving // IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. 2021. Vol. 7(1). P. 11–20. URL: https://www.researchgate.net/publication/349726810_Realtime_Implementation_of_Randomized_Model_Predictive_Control_for_Autonomous_Driving (дата обращения: 16.04.2025).

15. Nikolaou Michael. Model predictive controllers: A critical synthesis of theory and industrial needs // Advances in Chemical Engineering. 2001. Vol. 26. P. 131-204. URL: https://www.researchgate.net/publication/222658127_Model_predictive_controllers_A_critical_synthesis_of_theory_and_industrial_needs (дата обращения: 16.04.2025).

16. Performance and robustness analysis of V-Tiger PID controller for automatic voltage regulator / Pasala Gopi, S. Venkateswarlu Reddy, Mohit Bajaj, Ievgen Zaitsev, Lukas Prokop // *Scientific Reports*. 2024. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-58481-1#Bib1> (дата обращения: 13.04.2025).

17. Roberto Sanchis. Optimal tuning of PID controllers with derivative filter for stable processes using three points from the step response. *Control Engineering // ISA Transactions*. 2023. Vol. 153. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019057823004627> (дата обращения: 13.04.2025).

18. Миллер Ю. В., Саблина Г. В. Расчёт параметров ПИД-регулятора // *Автоматика и программная инженерия*. 2020. Т. 31, № 1. С. 148 - 153.

19. О целесообразности и возможностях аппроксимации звена с чистым запаздыванием / В. А. Жмудь, Л. Димитров, Г. В. Саблина [и др.] // *Информатика и автоматизация*. 2022. Т. 21, № 1. С. 41 - 67. DOI: 10.15622/ia.2022.21.2.

20. Aghil Ahmadi, Reza Mahboobi Esfanjani. Automatic tuning of PID controllers using deep recurrent neural networks with pruning based on tracking error // *IOPscience. Journal of Instrumentation*. 2024. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/19/02/P02028/pdf> (дата обращения: 13.03.2025).

References

1. Denisenko V. V. PID controllers: principles of construction and modification. *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii = Modern automation technologies*. 2006; (4): 66-74; 2007; (1): 78 - 88. (In Russ.).

2. Demin I.O., Sablina G.V. Study of methods for tuning PID controller parameters. *Avtomatika i programnaya inzheneriya = Automation and software engineering*. 2020; (1): 174 - 181. (In Russ.).

3. Khandozhko V. A., Matlakhov V. P. Mathematical model of a process section of a main pipeline with throttling control. *Avtomatizatsiya i modelirovanie v proektirovanii i upravlenii = Automation and modeling in design and control*. 2023; (4): 18-27. (In Russ.). DOI: 10.30987/2658-6436-2023-4-18-27.

4. Sablina G. V., Markova V. A. Tuning the parameters of a PID controller in a system with a second-order object with delay. *Avtometriya*. 2022; 58(4): 110 - 117. (In Russ.). DOI: 10.15372/AUT20220411.

5. Goryachev O.V., Kalinichev K.N. Analysis of methods for tuning, optimization and adaptation of PID controllers. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki = Bulletin of Tula State University. Technical sciences*. 2024; (10): 526 - 530. (In Russ.). DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-526-527.

6. Vorobyov V. Yu., Sablina G. V. Calculation and optimization of discrete PID controller parameters using the Ziegler – Nichols method. *Avtomatika i programnaya inzheneriya = Automation and Software Engineering*. 2019; 27(1): 9 – 13. (In Russ.).

7. Zhmud V. A., Vostrikov A. S., Ivoylov A. Yu., Sablina G. V. Synthesis of robust PID controllers using the double optimization method. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, automation, control*. 2020; 21(2): 67 – 74. (In Russ.). DOI: 10.17587/mau.21.67-73.

8. Arun Muraleedharan, Hiroyuki Okuda, Tatsuya Suzuki. Real-time implementation of randomized model predictive control for autonomous driving. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*. 2021. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Model_predictive_control (access date: 16.03.2025).

9. Davut Izci, Serdar Ekinici, Abdelazim G. Hussien. Effective PID controller design using a novel hybrid algorithm for high order systems. *PLOS ONE*. 2023. Available at: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0286060> (access date: 13.03.2025).

10. Huanchao Du, Bobo Feng, Jieshi Shen & Dan Li. Design of simple nonovershooting controllers for linear high order systems with or without time delay. *Scientific Reports*. 2024. Available at: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-49802-x#Sec2> (access date: 13.03.2025).

11. Julian Berberich, Johannes Köhler, Matthias A. Müller, Frank Allgöwer. Linear Tracking MPC for Nonlinear Systems. Part I: The Model-Based Case. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2022; 67(9): 4390–4405. Available at: <https://arxiv.org/abs/2105.08560> (access date: 16.03.2025).

12. Lucia Sergio, Subramanian Sankaranarayanan, Limon Daniel, Engell Sebastian. Stability properties of multistage nonlinear model predictive control. *Systems & Control Letters*. 2020; 143(9). Available at: https://www.researchgate.net/publication/343213495_Stability_properties_of_multistage_nonlinear_model_predictive_control (accessed: 16.04.2025).

13. Muhammad Abdillah, Tirta Jayadiharja, R Harry Arjadi, Herlambang Setiadi, Ramon Zamora, Yusrizal Afif. *Principles of PID Controllers*. 2023. Available at: https://www.zhinst.com/sites/default/files/documents/202307/zi_whitepaper_principles_of_pid_controllers.pdf (access date: 16.04.2025).

14. Muraleedharan Arun. Real-Time Implementation of Randomized Model Predictive Control for Autonomous Driving. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*. 2021; 7(1): 11–20. Available at: https://www.researchgate.net/publication/349726810_Realttime_Implementation_of_Randomized_Model_Predictive_Control_for_Autonomous_Driving (access date: 16.04.2025).

15. Nikolaou Michael. Model predictive controllers: A critical synthesis of theory and industrial needs. *Advances in Chemical Engineering*. 2001; 26: 131-204. Available at: https://www.researchgate.net/publication/222658127_Model_predictive_controllers_A_critical_synthesis_of_theory_and_industrial_needs (access date: 16.04.2025).

16. Pasala Gopi, S. Venkateswarlu Reddy, Mohit Bajaj, Ievgen Zaitsev & Lukas Prokop. Performance and robustness analysis of V-Tiger PID controller for automatic voltage regulator. *Scientific Reports*. 2024. Available at: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-58481-1#Bib1> (access date: 13.04.2025).

17. Roberto Sanchis. Optimal tuning of PID controllers with derivative filter for stable processes using three points from the step response. *Control Engineering. ISA Transactions*. 2023; 153. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019057823004627> (access date: 13.04.2025).

18. Miller Yu. V., Sablina G. V. Calculation of PID controller parameters. *Avtomatika i programmaya inzheneriya = Automation and Software Engineering*. 2020; 31 (1): 148 - 153. (In Russ.).

19. Zhmud V. A., Dimitrov L., Sablina G. V., et al. On the feasibility and possibilities of approximating a link with pure delay. *Informatika i avtomatizatsiya = Informatics and automation*. 2022; 21(1): 41 - 67. (In Russ.). DOI: 10.15622/ia.2022.21.2.

20. Aghil Ahmadi, Reza Mahboobi Esfajani. Automatic tuning of PID controllers using deep recurrent neural networks with pruning based on tracking error. IOPscience. *Journal of Instrumentation*. 2024. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/19/02/P02028/pdf> (access date: 12.03.2025).

Информация об авторах / Information about the Authors

Хандожко Виктор Александрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматизированные технологические системы», Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Российская Федерация, e-mail: vichandozhko@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5212-0616>

Viktor A. Khandozhko, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Automated Technological Systems Department, Bryansk State Technical University, Bryansk, Russian Federation, e-mail: vichandozhko@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5212-0616>

Федонин Олег Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизированные технологические системы», Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Российская Федерация, e-mail: fedonin@tu-bryansk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3511-699X>

Oleg N. Fedonin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Automated Technological Systems Department, Bryansk State Technical University, Bryansk, Russian Federation, e-mail: fedonin@tu-bryansk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3511-699X>

Матлахов Виталий Павлович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизированные технологические системы», Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Российская Федерация, e-mail: jed80@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8779-9565>

Vitaly P. Matlakhov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the of Automated Technological Systems Department, Bryansk State Technical University, Bryansk, Russian Federation, e-mail: jed80@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8779-9565>

Хандожко Александр Владимирович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты», Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Российская Федерация, e-mail: chandosh@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0604-8537>

Alexander V. Khandozhko, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Metal-Cutting Machines and Tools Department, Bryansk State Technical University, Bryansk, Russian Federation, e-mail: chandosh@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0604-8537>

Оригинальная статья / Original article

УДК 625.7:004.9

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-71-91>

Метод мониторинга состояния дорожного покрытия на основе сигналов акселерометра и аппарата нечеткой логики

К. Е. Баданис¹ ✉, Н. Ю. Фирсов¹, А. А. Шамраев¹

¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
ул. Победы, д. 85, Белгород 308015, Российская Федерация

✉ e-mail: badanis@bsuedu.ru

Резюме

Цель исследования. Целью настоящего исследования является повышение точности мониторинга состояния дорожного покрытия городской агломерации за счет анализа сигналов акселерометра в реальном времени на основе разрабатываемого комплексного метода оценки показателей ровности.

Методы. В настоящем исследовании применялись следующие методы: анализ существующих методов мониторинга состояния дорожного покрытия; методы и алгоритмы фильтрации шумов сигналов акселерометра (разработана и описана модель предобработки сигналов акселерометра включающая в себя фильтр низких частот Баттерворта, медианный фильтр, метод экспоненциального сглаживания и расчет пороговых значений); алгоритмы нечеткой логики (разработана модель классификации состояния дорожного покрытия по 5 категориям); имитационное моделирование (проведены тестовые заезды с использованием авторской имитационной модели разработанной в среде Unity).

Результаты. Представленный метод обеспечивает автоматизированный мониторинг состояния дорожного покрытия с точностью не менее 93%, и возможность интеграции в систему умного города. Метод позволяет проводить мониторинг состояния дорожного покрытия в реальном времени, а классифицирование состояния дорожного покрытия несет рекомендационный характер для проведения ремонта дорог. Перспективы исследования включают проведение натурного эксперимента, визуализацию данных с привязкой к карте города, а также применение алгоритмов траекторной кластеризации для определения общих траекторий движения ТС в моменты объезда неровностей.

Заключение. На основе разработанного метода мониторинга состояния дорожного покрытия, получена интегральная оценка соответствия точности мониторинга состояния дорожного покрытия не менее 93%.

Ключевые слова: дорожное покрытие; сигналы акселерометра; краудсенсоринг; нечеткая логика; мониторинг.

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

Для цитирования: Баданис К. Е., Фирсов Н. Ю., Шамраев А. А. Метод мониторинга состояния дорожного покрытия на основе сигналов акселерометра и аппарата нечеткой логики // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(2): 71-91. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-71-91>.

Поступила в редакцию 09.06.2025

Подписана в печать 21.06.2025

Опубликована 23.07.2025

Method of monitoring the condition of road surface based on accelerometer signals and fuzzy logic apparatus

Kirill Ye. Badanis ¹ ✉, Nikita Yu. Firsov ¹, Anatoly A. Shamraev ¹

¹ Belgorod State National Research University
85, Pobedy str., Belgorod 308015, Russian Federation

✉ e-mail: badanis@bsuedu.ru

Abstract

Purpose of research. The purpose of this research is to improve the accuracy of monitoring the condition of the road surface of an urban agglomeration by analyzing accelerometer signals in real time based on the developed integrated method for assessing evenness indicators.

Methods. The following methods were used in this research: analysis of existing methods for monitoring road surface conditions; methods and algorithms for filtering accelerometer signal noise (a model for preprocessing accelerometer signals was developed and described, including a Butterworth low-pass filter, a median filter, an exponential smoothing method, and calculation of threshold values); fuzzy logic algorithms (a model for classifying road surface conditions into 5 categories was developed); simulation modeling (test runs were conducted using the author's simulation model developed in the Unity environment).

Results. The presented method provides automated monitoring of the road surface condition with an accuracy of at least 93%, and the possibility of integration into the smart city system. The method allows monitoring the road surface condition in real time, and the classification of the road surface condition is of a recommendatory nature for road repairs. The prospects of the research include conducting a full-scale experiment, visualizing data with reference to a city map, and using trajectory clustering algorithms to determine the general trajectories of a vehicle when going around uneven surfaces.

Conclusion. Based on the developed method of monitoring the condition of the road surface, an integrated assessment of the compliance of the accuracy of monitoring the condition of the road surface of at least 93% was obtained.

Keywords: road surface; accelerometer signals; crowdsensing; fuzzy logic; monitoring.

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

For citation: Badanis K. Ye., Firsov N. Yu., Shamraev A. A. Method of monitoring the condition of road surface based on accelerometer signals and fuzzy logic apparatus. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(2): 71-91 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-71-91>.

Received 09.06.2025

Accepted 21.06.2025

Published 23.07.2025

Введение

Состояние дорожного покрытия напрямую влияет на безопасность движения, износ транспортных средств (далее – ТС) и экономику городской агломерации. Для получения наиболее точной и

объективной информации о состоянии дорожного покрытия применяются различные инструменты и методы контроля диагностических показателей. При этом важно учитывать, что все измерительные приборы имеют определенные погреш-

ности, которые отражаются в многочисленных математических моделях¹.

Специалистам дорожных служб необходимо периодически контролировать состояние городских дорог, чтобы своевременно устранять возникающие дефекты и минимизировать расходы на ремонт. Дефекты дорожного покрытия представляют собой различные виды, такие как выбоины, колеи и прочие повреждения, которые препятствуют ровности дороги. Затягивание с их устранением ускоряет деградацию дорожного покрытия, увеличивает затраты на ремонт и обслуживание дорожной сети в целом [1].

Традиционные методы мониторинга, такие как лазерные профилометры, обладают высокой точностью, но требуют значительных ресурсов [2,3]. Альтернативные подходы, такие как краудсенсоринг [4, 5-7], а также использование встроенных датчиков в смартфонах [8] показывают потенциал, но страдают от шумов, низкой интерпретируемости сигналов, а главное, являются трудно масштабируемыми в нашей стране.

Целью настоящего исследования является повышение эффективности мониторинга состояния дорожного покрытия городской агломерации за счет ежедневного анализа динамики изменений

его состояния на основе разрабатываемого комплексного метода оценки показателей ровности.

Материалы и методы

Традиционные подходы к мониторингу дорожного покрытия включают ручные методы, где задействуются специалисты для проведения полевых измерений [9], и полуавтоматические системы, использующие специализированные ТС с установленными техническими средствами. Однако ручные методы являются трудоемкими и требуют значительных временных затрат, что нередко приводит к задержкам в проведении ремонтных работ [10, 11]. Кроме того, эти методы создают неудобства для дорожного движения, включая частичное или полное перекрытие полос движения. Полуавтоматические методы, несмотря на повышение эффективности, сопряжены с высокими финансовыми и временными затратами.

Модель классификации состояния дорожного покрытия основана на анализе данных об ускорениях, измеренных по трем осям (X , Y , Z). Данные обрабатываются путем использования фильтра низких частот Баттерворта, медианного фильтра, метода экспоненциального сглаживания и расчета пороговых значений. Далее с целью классифицировать состояние дорожного покрытия используется метод дефаззификации по центру масс и алгоритмы аппарата нечеткой логики.

Основная цель модели – определить состояние дорожного покрытия как:

¹ Бендер О. А. Оценка и прогнозирование рисков в системе инструментального контроля транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог: дис. ... канд. наук. Новосибирск, 2013;

Пат. 2614836 С1. МПК E01C 23/07. Ру. Автомобильное устройство для измерения коэффициента сцепления дорожных покрытий / Бородин К. С. 2017.

- «очень плохое – требуется внеплановый капитальный ремонт»;
- «плохое – требуется капитальный ремонт»;
- «среднее – требуется комплексный текущий ремонт»;
- «хорошее – требуется выборочный текущий ремонт»;
- «очень хорошее – наблюдение».

Процесс обработки сигналов акселерометра начинается с исключения вибрационных частот. Для этого используется фильтр нижних частот Баттерворта (Butterworth Low-Pass Filter), позволяющий избежать искажения полезной информации при удалении шума [12, 13]. Низкочастотный фильтр пропускает сигналы низких частот и задерживает сигналы высоких частот. В общем случае определим полосу пропускания как интервал частот $0 < f < f_c$, полосу задерживания как частоты $f > f_1$, переходную область как диапазон частот $f_c < f < f_1$, где f_c – частота среза [14, 15]. Для каждой оси (X, Y, Z) применяется следующее рекуррентное уравнение:

$$y[n] = \alpha \cdot x[n] + (1 - \alpha) \cdot y[n-1], \quad (1)$$

где $x[n]$ – входной сигнал (текущее значение ускорения) в момент времени n ; $y[n]$ – отфильтрованный выходной сигнал в момент времени n ; $y[n-1]$ – предыдущее отфильтрованное значение, α – коэффициент сглаживания. Коэффициент сглаживания рассчитывается следующим образом:

$$\alpha = \frac{2\pi f_c \Delta t}{1 + 2\pi f_c \Delta t}, \quad (2)$$

где $\Delta t = \frac{1}{f_s}$ – интервал дискретизации (f_s – частота дискретизации); f_c – частота среза фильтра.

Фильтр нижних частот реализован и настроен с помощью параметров, таких как частота среза (f_c) и частота дискретизации (f_s). В данном случае выбраны значения $f_c = 1$ Гц и $f_s = 100$ Гц, что обеспечивает оптимальный баланс между подавлением шума и сохранением полезного сигнала [16]. Общая формула для вычисления выходного сигнала $y[n]$ имеет вид:

$$y[n] = \sum_{k=0}^{N-1} h[k] \cdot x[n-k], \quad (3)$$

где $y[n]$ – значение выходного сигнала в момент времени n ; $x[n]$ – входной сигнал; $h[k]$ – коэффициенты фильтра (импульсная характеристика); N – порядок фильтра (количество коэффициентов).

Низкочастотный фильтр Баттерворта удобен для применения в задачах оценки состояния дорожного покрытия на основе сигналов акселерометра, благодаря своей способности работать с потоковыми данными в реальном времени. Данная возможность делает его подходящим для интеграции в системы мониторинга, использующие данные акселерометров [17].

Далее для устранения шумов, вызванных внешними помехами (напри-

мер, изношенной подвеской ТС), используется медианный фильтр (Median Filter)¹ [16]. Он позволяет сохранить граничные значения и другие важные особенности сигналов акселерометра, что делает его предпочтительным выбором по сравнению с другими методами фильтрации, такими как скользящее среднее (Moving Average), которое может размывать полезные данные [18]. Метод медианной фильтрации требует минимальных вычислительных ресурсов, что особенно важно для систем реального времени, где требуется быстрая обработка данных [19], что подтверждается исследованиями, демонстрирующими его эффективность в сочетании с другими методами предобработки данных [20]. Для каждого элемента массива данных берется окно размером (w), и выбирается медианное значение:

$$y[i] = \text{Median} \left(x \left[i - \frac{w}{2}, i + \frac{w}{2} \right] \right), \quad (4)$$

где $\text{Median}(\cdot)$ – функция, вычисляющая медиану набора чисел; w – размер окна фильтра.

Для уменьшения высокочастотных компонентов шума в данных ускорений акселерометра используется метод экспоненциального сглаживания (Exponential Smoothing) [21]. Метод позволяет эффективно устранить высокочастотные колебания, сохраняя при этом низкоча-

стотные тренды, что особенно важно для анализа данных акселерометра. Это позволяет минимизировать влияние случайных шумов, вызванных внешними факторами, такими как вибрации ТС или незначительные неровности дорожного покрытия [20]. По сравнению с другими методами фильтрации, такими как фильтр Калмана (Kalman Filter), экспоненциальное сглаживание требует меньших вычислительных затрат и не требует хранения больших объемов данных, что делает этот метод идеальным для работы в реальном времени [22, 23]. Математическая формула вычисления экспоненциального сглаживания выглядит следующим образом:

$$S_t = \alpha \cdot X_t + (1 - \alpha) \cdot S_{t-1}, \quad (5)$$

где S_t – сглаженное значение в момент времени t ; X_t – исходное значение в момент времени t ; α – коэффициент сглаживания.

Коэффициент α может быть настроен для достижения баланса между чувствительностью к изменениям и подавлением шума. В данном случае выбран малый коэффициент ($\alpha = 0.01$), что обеспечивает высокую чувствительность к изменениям состояния дорожного покрытия при сохранении устойчивости к шуму [24].

На заключительном этапе предобработки сигналов акселерометра проводится расчет пороговых значений для каждого компонента ускорения (X , Y , Z), на основе медианных значений и стандартного отклонения данных ускорений, в данном случае:

¹ Макрецкий Александр Евгеньевич. Медианный фильтр. 1989 | Фридман, П. А. "Цифровой медианный фильтр." (1995).

$$\begin{aligned} Threshold_X &= Median(X) + \\ &+ 0.5 \cdot StandardDeviation(X) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Threshold_Y &= Median(Y) + \\ &+ 0.5 \cdot StandardDeviation(Y) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Threshold_Z &= Median(Z) + \\ &+ 0.5 \cdot StandardDeviation(Z) \end{aligned}$$

Чтобы начать процесс классификации состояния дорожного покрытия на основе предобработанных сигналов ускорений необходимо получить численную оценку веса общего показателя состояния дорожного покрытия. Для этого используется метод дефаззификации по центру масс (Centroid Method). Метод центра масс является наиболее распространенным и теоретически обоснованным подходом к дефаззификации, так как он учитывает все значения функции принадлежности и их распределение, что позволяет получить устойчивую и точную численную оценку [25-27]. Данный метод обеспечивает взвешенное среднее значение выходных переменных, что соответствует физическому смыслу задачи – определению «среднего» состояния дорожного покрытия на основе нечетких категорий [28]. Для расчета численной оценки веса общего показателя состояния дорожного покрытия используется следующая формула:

$$Def_{Value} = \frac{\sum_{i=1}^n (\mu_i \cdot o_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_i}, \quad (6)$$

где μ_i – степень принадлежности; o_i – выходные значения (0, 1, 2, 3, 4).

Формула вычисления численной оценки веса общего показателя состояния до-

рожного покрытия интегрирована в общую модель классификации состояния дорожного покрытия, а также реализована программно¹, что делает метод удобным для применения в реальных системах мониторинга [29]. Для оценки степени принадлежности к различным категориям состояния дорожного покрытия используется алгоритм нечеткой логики (Fuzzy Logic), а именно триангулярная функция принадлежности [30]. Для процедуры дефаззификации использовалась функция принадлежности триангулярного вида по пятиуровневой классификации с лингвистическими термами: «очень плохое», «плохое», «среднее», «хорошее», «очень хорошее». Триангулярное нечеткое число (Triangular Fuzzy Number) определяется триангулярной функцией принадлежности, имеющей вид [31, 32]:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} (x-l)/(m-l), l \leq x \leq m \\ (u-x)/(u-m), m < x \leq u, (7) \\ 0, \text{иначе} \end{cases}$$

где l, u – нижняя и верхняя граница нечеткого числа $\tilde{A}$; $m: l < m < u$. Тогда нечеткое число можно представить в виде: $\tilde{A} = (l, m, u)$.

¹ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 202560467 Российская Федерация. Программа для анализа и классификации состояния дорожного покрытия на основе сигналов акселерометра : № 2025618750: заявл. 15.04.2025; опублик. 23.04.2025 / К.Е. Баданис, А.А. Шамраев; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет».

Для оценки степени принадлежности к различным категориям состояния дорожного покрытия используется следующее выражение:

$$\mu(x, a, b, c) = \begin{cases} 0 & \text{если } x \leq a \text{ или } x \geq c \\ (x - a) / (b - a) & \text{если } a < b < c \\ (c - x) / (c - b) & \text{если } b < x < c \\ 1 & \text{если } x = b \end{cases} \quad (8)$$

Для классификации состояния дорожного покрытия использовались триангулярные функции принадлежности, каждая из которых определяется тремя точками: нижней границей, центральной точкой и верхней границей. Параметры функций принадлежности для каждой категории были выбраны на основе анализа пороговых значений ускорений:

– «очень плохое – внеплановый капитальный ремонт»: точки функции: $(0.5 * xThreshold, 1.0 * xThreshold, 1.5 * xThreshold)$;

– «плохое – капитальный ремонт»: точки функции: $(0.5 * yThreshold, 1.0 * yThreshold, 1.5 * yThreshold)$;

– «среднее – комплексный текущий ремонт»: точки функции: $(0.5 * zThreshold, 1.0 * zThreshold, 1.5 * zThreshold)$, с коэффициентом усиления 1.5 для повышения чувствительности к средним неровностям;

– «хорошее – выборочный текущий ремонт»: точки функции: $(0, 0.5 * xThreshold, 1.0 * xThreshold)$;

– «очень хорошее – наблюдение»: точки функции: $(0, 0, 0.5 * xThreshold)$.

Все функции принадлежности были нормализованы и объединены в единую

шкалу оценки состояния дорожного покрытия от 0 до 4. В свою очередь, процесс дефазификации, проведенный методом центра масс (Centroid Method), позволил получить численную оценку общего состояния дорожного покрытия.

На рис. 1 представлена разработанная блок-схема алгоритма обработки сигналов ускорения ТС и классификации состояния дорожного покрытия.

Обработка данных осуществлялась с использованием сигналов акселерометра по трем осям: X (продольная), Y (поперечная) и Z (вертикальная). Частота дискретизации составляет 100 Гц, что обеспечивает достаточное разрешение для анализа мелких неровностей и крупных дефектов дорожного покрытия.

Как уже было отмечено, перед применением алгоритмов классификации данные проходили этап предобработки, включающий: фильтрацию высокочастотного шума с помощью фильтра Баттерворта (низкочастотный фильтр с частотой среза 1 Гц); медианную фильтрацию с окном размером 5 отсчетов для устранения импульсных помех; экспоненциальное сглаживание с коэффициентом $\alpha = 0.01$ для подавления случайных колебаний; вычисление пороговых значений на основе медианы и стандартного отклонения ускорений по каждой оси.

Результаты и их обсуждение

В рамках экспериментальной части исследования тестовые заезды проводились исключительно с использованием

авторской имитационной модели¹, разработанной в кроссплатформенной среде разработки Unity (рис. 2).

Модель позволяет симулировать различные типы дорожных покрытий и регистрировать показания виртуального акселерометра при движении ТС. Хотя модель адекватно воспроизводит реальные динамические характеристики движения ТС, следует отметить, что настоящий метод пока не проверен в условиях реального дорожного движения.

Сигналы акселерометра обработаны программой для анализа и классификации состояния дорожного покрытия на основе сигналов акселерометра², а категории метода сопоставлены с диапазонами международного индекса шероховатости IRI в табл. 1 на основе стандартов, предложенных в [33].

Для 150 участков дорог использованы данные, полученные с помощью имитационной модели и лазерного

профилометра (длина каждого участка: 100 м), данные получены из открытых баз данных [34]. Диапазон IRI: от 1.2 м/км до 8.7 м/км. Значения индекса IRI и категории метода мониторинга состояния дорожного покрытия представлены в табл. 2.

На рис. 3 представлена гистограмма распределения индекса IRI, которая показывает, сколько участков попадает в каждый диапазон индекса IRI.

Ось X разделена на диапазоны: $< 2, 2 - 3, 3 - 5, 5 - 7, > 7$. Ось Y показывает количество участков в каждом диапазоне.

Для оценки адекватности метода проведен статистический анализ корреляции IRI, что позволит обосновать работоспособность и эффективность разрабатываемого метода. Сформулируем гипотезы:

- нулевая гипотеза (H_0): нет корреляции между категориями метода мониторинга состояния дорожного покрытия и диапазонами индекса IRI;

- альтернативная гипотеза (H_1): существует статистически значимая корреляция между категориями метода мониторинга состояния дорожного покрытия и индексом IRI.

Руководствуясь порядковыми данными категорий от «очень плохого» до «очень хорошего» состояния дорожного покрытия необходимо отметить, что для оценки корреляции лучше всего подойдет коэффициент ранговой корреляции Спирмена [35, 36]. Он позволяет оценить, насколько хорошо отношения между переменными можно описать монотонной функцией.

¹ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025664460 Российская Федерация. Имитационная модель состояния дорожного покрытия на основе сигналов акселерометра и местоположения транспортного средства: № 2025662201: заявл. 19.05.2025: опубл. 04.06.2025 / К.Е. Баданис, Н.Ю. Фирсов, А.А. Шамраев; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет».

² Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025664460 Российская Федерация. Имитационная модель состояния дорожного покрытия на основе сигналов акселерометра и местоположения транспортного средства: № 2025662201: заявл. 19.05.2025: опубл. 04.06.2025 / К.Е. Баданис, Н.Ю. Фирсов, А.А. Шамраев; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет».

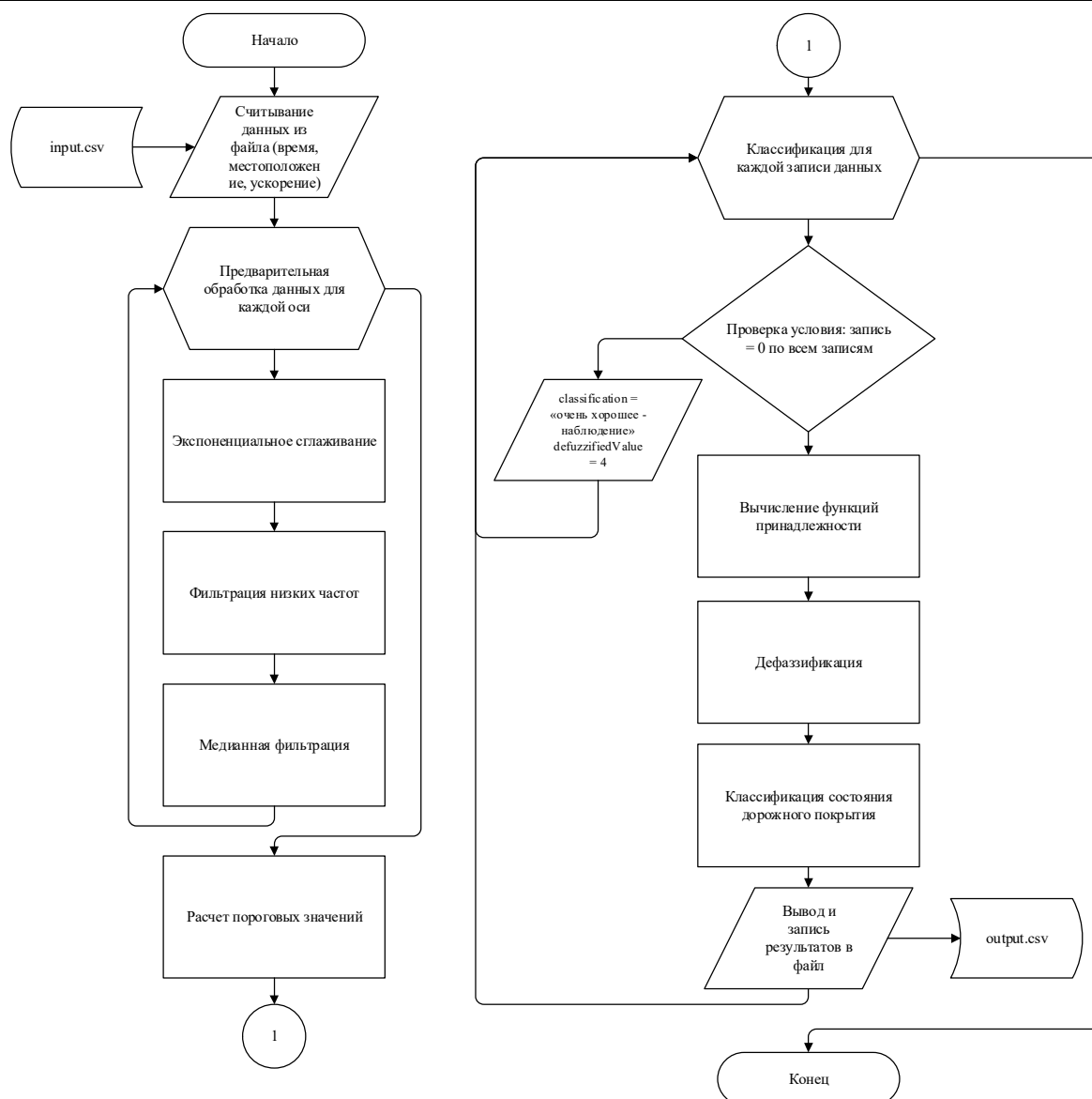


Рис. 1. Блок-схема алгоритма обработки сигналов ускорения ТС и классификации состояния дорожного покрытия

Fig. 1. Block diagram of the algorithm for processing vehicle acceleration signals and classifying road surface conditions

Категории метода мониторинга состояния дорожного покрытия и IRI имеют порядковую природу – ранговую шкалу. Коэффициент Спирмена позволит оценить, насколько монотонна связь между переменными.

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}, \quad (9)$$

где d_i – разность рангов между категорией модели и IRI для i -го участка; n – количество участков.

Рассчитаем коэффициент Спирмена для данных из табл. 2, сумма квадратов разностей равна:

$$\sum d_i^2 = 0 + 0 + 0 + 1 + 1 + 4 + 4 + 36 + 36 + 25 \dots + 25 = 3607.$$



Рис. 2. Имитационная модель Unity

Fig. 2. Unity simulation model

Полученный результат подставим в формулу (9):

$$\rho = 1 - \frac{6 \times 3607}{150 \times (150^2 - 1)} = 1 - \frac{21642}{3374850} = 1 - 0.00641 = 0.9936.$$

Коэффициент $\rho = 0.9936$ указывает на очень сильную монотонную связь между категориями метода мониторинга состояния дорожного покрытия и индексом IRI.

Таблица 1. Сопоставление категорий модели и диапазонов IRI

Table 1. Comparison of model categories and IRI ranges

Категория метода / Method Category	Диапазон IRI (м/км) / IRI Range (m/km)	Описание / Description
Очень хорошее – наблюдение	< 2	Минимальные неровности, высокая комфортность вождения
Хорошее – выборочный текущий ремонт	2 – 3	Умеренные неровности, приемлемое качество
Среднее – комплексный текущий ремонт	3 – 5	Заметные неровности, требуется профилактика
Плохое – капитальный ремонт	5 – 7	Серьезные дефекты, необходим ремонт дорожного покрытия
Очень плохое – внеплановый капитальный ремонт	> 7	Критическое состояние, аварийная опасность

Таблица 2. Значения IRI и категории метода

Table 2. IRI values and method categories

Участок / Plot	IRI (м/км) / IRI (m/km)	Категория метода / Method category	Ранг IRI / RI rank	Ранг категории / Category rank	Разность рангов между категорией метода и IRI для i -го участка / Rank difference between the method category and the IRI for the i th site	Квадраты разностей / Squares of differences /
1	1.2	Очень хорошее	1	1	0	0
2	2.5	Хорошее	2	2	0	0
3	3.2	Среднее	3	3	0	0
4	4.0	Среднее	4	3	1	1
5	5.5	Плохое	5	4	1	1
6	6.0	Плохое	6	4	2	4
7	7.5	Очень плохое	7	5	2	4
8	2.0	Хорошее	8	2	6	36
9	3.8	Среднее	9	3	6	36
10	8.7	Очень плохое	10	5	5	25
...	...	...	...	...	...	...
150	8.0	Очень плохое	10	5	5	25

Проверим значимость коэффициента корреляции, используя t -статистику [35, 36]. Введем t -критерий для коэффициента Спирмена:

$$t = \rho \sqrt{\frac{n-2}{1-\rho^2}}. \quad (10)$$

Подставив значения в формулу (10), получим:

$$t = 0.9936 \times \sqrt{\frac{148}{1-0.9872}} = 0.9936 \times 107.5 = 106.8.$$

Для $\alpha = 0.05$ и степеней свободы $df = n-2 = 148$, критическое значение $t_{\text{крит}} = 1.976$ по таблице t -распределения. Так как $t = 106.8 < 1.976$, гипотеза H_0 отвергается, что подтверждает наличие статистически значимой корреляции между категориями метода мониторинга состояния дорожного покрытия и индексом IRI (рис. 4).

В табл. 3 представлена матрица ошибок и точность метода для 150 участков.

На рис. 5 представлена визуализация матрицы ошибок в виде тепловой карты.

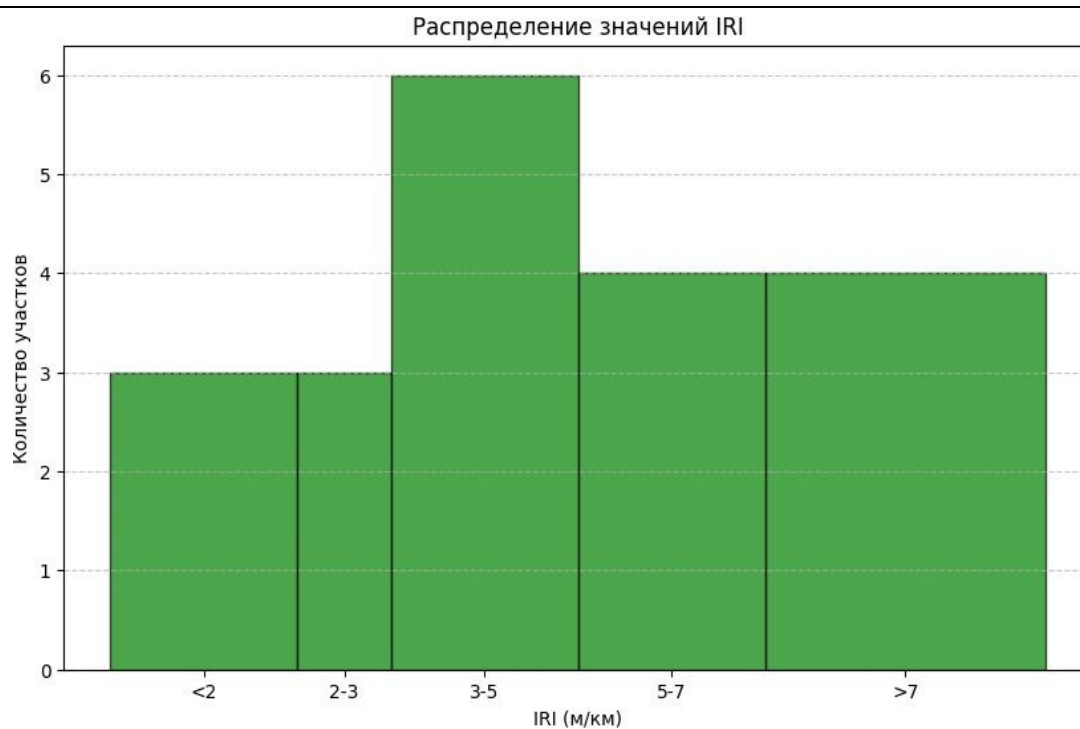


Рис. 3. Гистограмма распределения IRI

Fig. 3. IRI distribution histogram

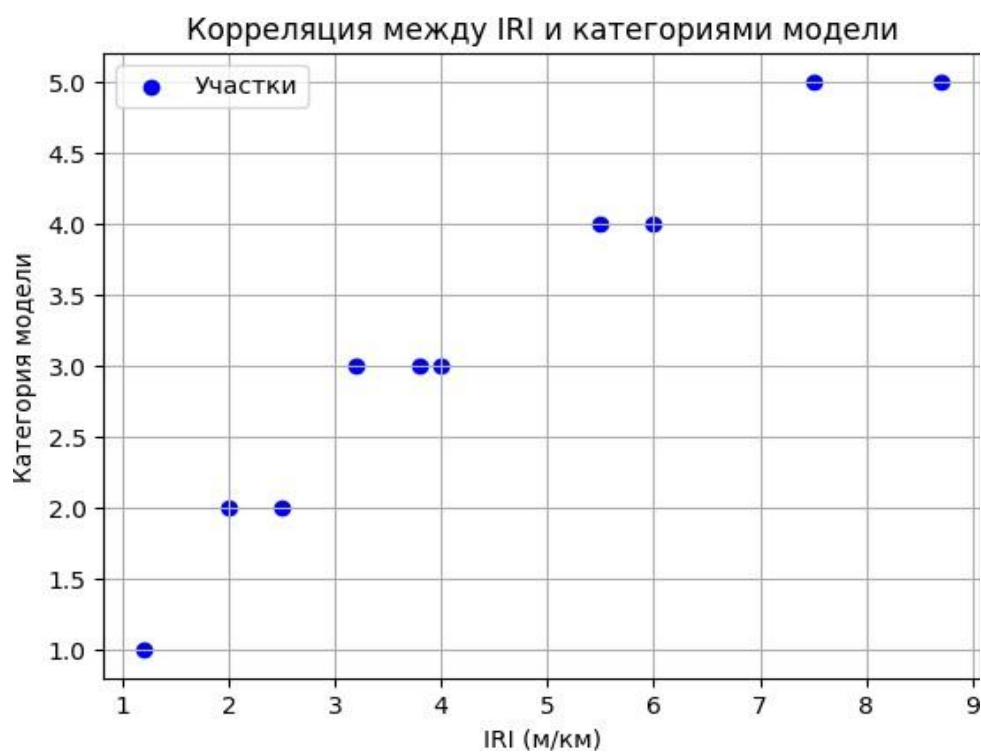
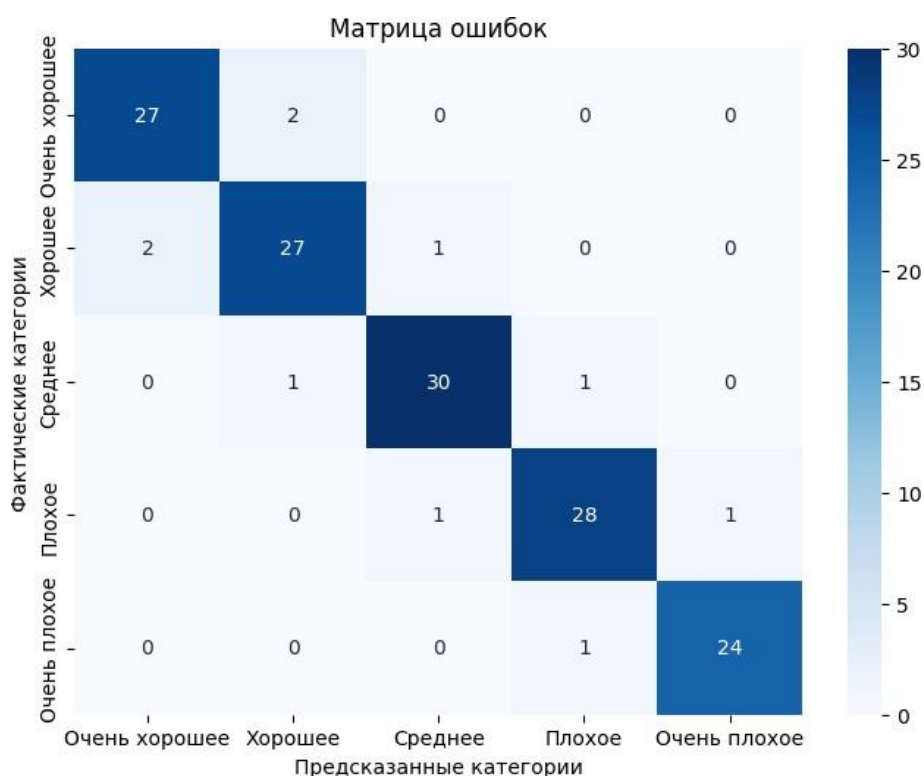


Рис. 4. График корреляции между категориями метода и индексом IRI

Fig. 4. Correlation graph between method categories and IRI index

Таблица 3. Матрица ошибок и метрики**Table 3.** Error matrix and metrics

	Очень хорошее (IRI <2) / Very good (IRI <2)	Хорошее (IRI 2–3) / Good (IRI 2–3)	Среднее (IRI 3–5) / Average (IRI 3–5)	Плохое (IRI 5–7) / The Bad (IRI 5–7)	Очень плохое (IRI >7) / Very bad (IRI >7)
Очень хорошее	27	2	0	0	0
Хорошее	2	27	1	0	0
Среднее	0	1	30	1	0
Плохое	0	0	1	28	1
Очень плохое	0	0	0	1	24

**Рис. 5.** Тепловая карта матрицы ошибок**Fig. 5.** Error matrix heat map

Тепловая карта показывает, насколько хорошо метод классифицирует каждую категорию. Цветовая шкала указывает на количество совпадений (более темные цвета – больше совпадений). Основные ошибки наблюдались между смеж-

ными категориями (например, «очень хорошее» и «хорошее», «плохое» и «среднее»), что связано с плавным переходом между состояниями дорожного покрытия и естественной неопределенностью в нечеткой логике.

Согласно проведенным расчетам, правильные предсказания: $27+27+30+28+24=136/150$. Точность метода: 91%. Рассчитаем среднее по классам (F1-score) для категории – «очень хорошее»:

$$Precision = \frac{27}{27+2} = 0.93,$$

$$Recall = \frac{27}{27+3} = 0.9,$$

$$F1 = \frac{2 \times 0.93 \times 0.9}{0.93 + 0.9} = 0.915.$$

Аналогично для остальных категорий. Средний $F1-score: 0.916$. Окончательная оценка точности осуществлена на основании данных 7640 выборок по формулам (7 и 8). Получена интегральная оценка соответствия точности не менее 93%. На рис. 6 представлено распределение участков дорожного покрытия по категориям.



Рис 6. Распределение участков по категориям

Fig. 6. Distribution of sections by categories

Для объективной оценки эффективности предложенного метода было проведено сравнение с двумя наиболее распространенными подходами к мониторингу состояния дорожного покрытия. Речь идет о краудсенсоринге на базе смартфонов и профессиональных мобильных лабораторий на основе лазерных профилометров. Основными критериями для сравнения

стали: точность, масштабируемость, стоимость реализации, возможность работы в реальном времени и применимость в условиях системы умного города. В табл. 4 представлены результаты сравнительного анализа предлагаемого метода с двумя наиболее распространенными подходами к мониторингу состояния дорожного покрытия.

Таблица 4. Сравнение с аналогами**Table 4.** Comparison with analogues

Критерий / Criterion	Мобильные лаборатории / Mobile Labs	Краудсенсоринг / Crowdsensing	Предлагаемый метод / Proposed method
Точность	95-98%	70-85%	93%
Масштабируемость	Низкая	Высокая	Высокая
Стоимость	Очень высокая	Низкая	Низкая
Реальное время	Нет	Да	Да
Интеграция в систему умного города	Ограниченная	Ограниченная	Высокая
Используемые датчики	Лазеры, сканеры, гироскопы	Датчики смартфона	Акселерометр, GPS-датчик

Как видно из табл. 4, предлагаемый метод демонстрирует высокую точность (93%), сравнимую с профессиональными решениями, при этом сохраняя низкую стоимость реализации, а также возможность масштабирования и интеграцию в систему умного города. Использование краудсенсоринга, основанного на данных с мобильных устройств водителей ТС, предполагает наличие в каждом ТС современного мобильного устройства (с датчиками GPS и акселерометра) и необходимость в согласии водителей на предоставление информации о своих перемещениях. Однако реализация подобных решений в настоящее время в нашей стране является практически невозможной. Более того, в отличие от краудсенсоринга, метод обеспечивает интерпретируемую классификацию состояния дорожного покрытия, основанную на нечеткой логике и стандартах индекса IRI,

что делает его более полезным для муниципальных дорожных служб.

Выводы

На основе разработанного комплексного метода оценки показателей ровности повышена точность мониторинга состояния дорожного покрытия городской агломерации за счет анализа динамики изменений его состояния в реальном времени. Разработана модель предобработки данных сигналов акселерометра (метод экспоненциального сглаживания, низкочастотный фильтр, медианный фильтр и среднееквадратичное значение); модель классификации состояния дорожного покрытия на основе применения алгоритмов нечеткой логики для классификации состояния дорожного покрытия. Получена интегральная оценка соответствия точности не менее 93%. Метод позволяет проводить ежедневный мониторинг состояния дорож-

ного покрытия, а классифицирование состояния дорожного покрытия несет рекомендационный характер для проведения ремонта дорог. Перспективы исследования включают проведение натурного эксперимента, визуализацию данных с

привязкой к карте города, а также применение алгоритмов траекторной кластеризации для определения общих траекторий движения ТС в моменты объезда неровностей.

Список литературы

1. Pavement Image Datasets: A New Benchmark Dataset to Classify and Densify Pavement Distresses / H. Majidifard, P. Jin, Y. Adu-Gyamfi, W.G. Buttlar // Transp. Res. Rec. 2020. 674. P. 328–339.
2. Sayers M. W. On the calculation of international roughness index from longitudinal road profile // Transportation Research Record. 1995. № 1501.
3. Баданис К. Е. Технология Big Data и искусственный интеллект в управлении автомобильным трафиком // XXXVII Международная научно-практическая конференция «Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации». Пенза, 2024. С. 73-77.
4. Sensing and Signal Processing for a Distributed Pavement Monitoring System / M. Ndoeye, S. Vanjari, H. Huh, J. Krogmeier, D. Bullock, C. Hedges, A. Adewunmi // IEEE 12th Digital Signal Processing Workshop & 4th IEEE Signal Processing Education Workshop, 2006. P. 162–167.
5. Automated Pothole Detection System / G. D. De Silva, K. M. Thilakarathna, R. S. Perera, C. I. Keppitiyagama, N. M. Laxman, R. Avenue, S. Lanka // in 9th International Information Technology Conference, 2008.
6. SmartRoadSense : Collaborative Road Surface Condition Monitoring / G. Alessandrini, L. C. Klopfenstein, S. Delpriori, M. Dromedari, G. Luchetti, B. D. Paolini, A. Seraghi-ti, E. Lattanzi, V. Freschi, A. Carini, A. Bogliolo // Ubicomm-2014. 2014. P. 210–215.
7. A Mobile Application for Road Surface Quality Control: UNiQuALroad / V. Astarita, M. V. Caruso, G. Danieli, D. C. Festa, V. P. Giofrè, T. Iuele, R. Vaiana // in Procedia - Social and Behavioral Sciences, Proceedings of EWGT2012 - 15th Meeting of the EURO Working Group on Transportation, 2012. Vol. 54. P. 1135–1144.
8. Васильев М. Д., Дегтярев А. В., Чекуров А. Ю. Применение встроенных датчиков смартфонов для обнаружения и анализа нарушений ровности автомобильных дорог // Современные наукоемкие технологии. 2022. №12(1). С. 20-25.
9. Radopoulou S.-C., Brilakis I. Improving Road Asset Condition Monitoring // Transp. Res. Procedia. 2016. 14. P. 3004–3012.

10. Nakanishi Y., Kaneta T., Nishino S. A Review of Monitoring Construction Equipment in Support of Construction Project Management // *Front. Built Environ.* 2022. 7. 632593 p.
11. Khahro S.H., Javed Y., Memon, Z.A. Low-Cost Road Health Monitoring System: A Case of Flexible Pavements // *Sustainability.* 2021. № 13. 10272 p.
12. Сурин В. И., Волкова З. С. Алгоритм аппроксимации экспериментальных данных на основе низкочастотного фильтра с конечной импульсной характеристикой // *Информационные технологии в проектировании и производстве.* 2020. №. 4. С. 25-29.
13. Gelper S., Fried R., Croux C. Robust forecasting with exponential and Holt–Winters smoothing // *Journal of forecasting.* 2010. Vol. 29, №. 3. P. 285-300.
14. Колбас Ю. Ю., Курдыбанская А. И. Применение цифровых фильтров для уменьшения случайной ошибки показаний лазерных гироскопов и маятниковых акселерометров // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение».* 2018. №2 (119).
15. Джонсон Д., Джонсон Дж., Мур Г. Справочник по активным фильтрам. М.: Энергоатомиздат, 1983. 128 с.
16. Smith S. W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. California Technical Pub., 2002.
17. Cook J. R., Gourley C. S. A framework for the appropriate use of marginal materials // *World road association (PIARC)-technical committee c12 seminar in Mongolia,* 2002.
18. Bovik A. C. Handbook of image and video processing. Academic press, 2010.
19. Gonzalez R. C. Digital Image Processing. Pearson Education India, 2009.
20. Bhoraskar R., et al. Wolverine: Traffic and road condition estimation using smartphone sensors // *2012 fourth international conference on communication systems and networks (COMSNETS 2012).* IEEE, 2012. С. 1-6.
21. Мельник В. Г. Оценка коэффициента экспоненциального сглаживания навигационных данных по результатам измерений // *Эксплуатация морского транспорта.* 2014. №. 1. С. 29-32.
22. Brown R. G. Smoothing, forecasting and prediction of discrete time series. Courier Corporation, 2004.
23. Winters P. R. Forecasting sales by exponentially weighted moving averages // *Management science.* 1960. Vol. 6, №. 3. P. 324-342.
24. Gelper S., Fried R., Croux C. Robust forecasting with exponential and Holt–Winters smoothing // *Journal of forecasting.* 2010. Vol. 29, №. 3. P. 285-300.
25. Mitsuishi T. Definition of centroid method as defuzzification // *Formalized Mathematics.* 2022. Vol. 30, №. 2. P. 125-134.
26. Chakraverty S., et al. Defuzzification // *Concepts of soft computing: Fuzzy and ANN with programming,* 2019. P. 117-127.

27. Runkler T. A., Glesner M. DECADE–Fast centroid approximation defuzzification for real time fuzzy control applications // Proceedings of the 1994 ACM symposium on Applied computing. 1994. P. 161-165.
28. Wang Y. M. Centroid defuzzification and the maximizing set and minimizing set ranking based on alpha level sets // Computers & Industrial Engineering. 2009. Vol. 57, № 1. P. 228-236.
29. Vlachos M., Kollios G., Gunopulos D. Discovering similar multidimensional trajectories // Proceedings 18th international conference on data engineering. IEEE, 2002. P. 673-684.
30. Мухаметзянов И. З. Нечеткий логический вывод и нечеткий метод анализа иерархий в системах поддержки принятия решений: приложение к оценке надежности технических систем // Кибернетика и программирование. 2017. №. 2. С. 59-77.
31. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. М.: Радио и связь, 1982. 432 с.
32. Kaufman A., Gupta M. M. Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science. North-Holland, Amsterdam, 1988. 338 p.
33. Gourley C. S. World Road Association (PIARC) - Technical Committee C12 Seminar in Mongolia, June 2002 A Framework for the Appropriate Use of Marginal Materials JR Cook.
34. PIARC – World Road Association. URL: <https://www.piarc.org/en/> (дата обращения: 15.04.2025)
35. Пудова Н. В., Никитин В. В. Анализ значений коэффициента ранговой корреляции Спирмена // Экономический анализ: теория и практика. 2004. №. 3. С. 52-56.
36. Кошелева Н. Н. Корреляционный анализ и его применение для подсчета ранговой корреляции Спирмена // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2012. №. 5. С. 23-26.

References

1. Majidifard H., Jin P., Adu-Gyamfi Y., Buttlar W.G. Pavement Image Datasets: A New Benchmark Dataset to Classify and Densify Pavement Distresses. *Transp. Res. Rec.* 2020; (2674): 328–339.
2. Sayers M. W. On the calculation of international roughness index from longitudinal road profile. *Transportation Research Record*. 1995; (1501).
3. Badanis K. Ye. Big Data Technology and Artificial Intelligence in Automobile Traffic Management. In: *XXXVII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Sovremennaya nauka: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovatsii» = XXXVII International Scientific and Practical Conference "Modern Science: Current Issues, Achievements and Innovations"*. Penza; 2024. P. 73-77. (In Russ.).

4. Ndoye M., Vanjari S., Huh H., Krogmeier J., Bullock D., Hedges C., Adewunmi A. Sensing and Signal Processing for a Distributed Pavement Monitoring System. *2006 IEEE 12th Digital Signal Processing Workshop & 4th IEEE Signal Processing Education Workshop*, 2006. P. 162–167.
5. Silva G. D. De, Thilakarathna K. M., Perera R. S., Keppitiyagama C. I., Laxman N. M., Avenue R., Lanka S. Automated Pothole Detection System. *In 9th International Information Technology Conference*, 2008.
6. Alessandrini G., L. Klopfenstein C., Delpriori S., Dromedari M., Luchetti G., Paolini B. D., Seraghiti A., Lattanzi E., Freschi V., Carini A., Bogliolo A. SmartRoadSense : Collaborative Road Surface Condition Monitoring, *Ubicomm*, 2014. P. 210–215.
7. Astarita V., Caruso M. V., Danieli G., Festa D. C., Giofrè V. P., Iuele T., Vaiana R. A Mobile Application for Road Surface Quality Control: UNiQuALroad. In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences, Proceedings of EWGT2012 - 15th Meeting of the EURO Working Group on Transportation*. 2012; 54: 1135–1144.
8. Vasiliev M. D., Degtyarev A. V., Chekurov A. Yu. Application of built-in smartphone sensors for detection and analysis of road unevenness violations. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern high technologies*. 2022; (12): 20-25. (In Russ.).
9. Radopoulou S.-C., Brilakis I. Improving Road Asset Condition Monitoring. *Transp. Res. Procedia*. 2016; 14: 3004–3012.
10. Nakanishi Y., Kaneta T., Nishino S. A Review of Monitoring Construction Equipment in Support of Construction Project Management. *Front. Built Environ*. 2022; 7: 632593.
11. Khahro S.H.; Javed Y.; Memon Z.A. Low-Cost Road Health Monitoring System: A Case of Flexible Pavements. *Sustainability*. 2021; (13): 10272.
12. Surin V. I., Volkova Z. S. Algorithm for approximating experimental data based on a low-pass filter with a finite impulse response. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve = Information technologies in design and production*. 2020; (4): 25-29 (In Russ.).
13. Gelper S., Fried R., Croux C. Robust forecasting with exponential and Holt–Winters smoothing. *Journal of forecasting*. 2010; 29(3): 285-300.
14. Kolbas Yu. Yu., Kurdybanskaya A. I. Application of digital filters to reduce random error in readings of laser gyroscopes and pendulum accelerometers. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Seriya «Priborostroenie» = Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*. 2018; (2). (In Russ.).
15. Johnson D., Johnson J., Moore G. Handbook of active filters. Moscow: Energoatomizdat; 1983. 128 p. (In Russ.).
16. Smith S. W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. California Technical Pub., 2002.

17. Cook J. R., Gourley C. S. A framework for the appropriate use of marginal materials World road association (PIARC)-technical committee c12 seminar in Mongolia, 2002.
18. Bovik A. C. Handbook of image and video processing. Academic press, 2010.
19. Gonzalez R. C. Digital Image Processing. Pearson Education India, 2009.
20. Bhoraskar R., et al. Wolverine: Traffic and road condition estimation using smartphone sensors. 2012 fourth international conference on communication systems and networks (COMSNETS 2012). IEEE, 2012. P. 1-6.
21. Melnik V. G. Estimation of the exponential smoothing coefficient of navigation data based on measurement results. *Ekspluatatsiya morskogo transporta = Operation of sea transport*. 2014; (1): 29-32. (In Russ.).
22. Brown R. G. Smoothing, forecasting and prediction of discrete time series. Courier Corporation, 2004.
23. Winters P. R. Forecasting sales by exponentially weighted moving averages. *Management science*. 1960; 6 (3): 324-342.
24. Gelper S., Fried R., Croux C. Robust forecasting with exponential and Holt–Winters smoothing. *Journal of forecasting*. 2010; 29(3): 285-300.
25. Mitsuishi T. Definition of centroid method as defuzzification. *Formalized Mathematics*. 2022; 30(2): 125-134.
26. Chakraverty S., et al. Defuzzification. Concepts of soft computing: Fuzzy and ANN with programming, 2019. P. 117-127.
27. Runkler T. A., Glesner M. DECADE–Fast centroid approximation defuzzification for real time fuzzy control applications. Proceedings of the 1994 ACM symposium on Applied computing, 1994. P. 161-165.
28. Wang Y. M. Centroid defuzzification and the maximizing set and minimizing set ranking based on alpha level sets. *Computers & Industrial Engineering*. 2009; 57(1): 228-236.
29. Vlachos M., Kollios G., Gunopulos D. Discovering similar multidimensional trajectories. In: *Proceedings 18th international conference on data engineering. IEEE*, 2002. P. 673-684.
30. Mukhametzyanov I. Z. Fuzzy logical inference and fuzzy hierarchy process analysis in decision support systems: application to reliability assessment of technical systems. *Kibernetika i programmirovaniye = Cybernetics and programming*. 2017; (2): 59-77. (In Russ.).
31. Kofman A. Introduction to the Theory of Fuzzy Sets. Moscow: Radio i svyaz'; 1982. 432 p. (In Russ.).
32. Kaufman A., Gupta M. M. Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science, North-Holland, Amsterdam; 1988. 338 p.
33. Gourley C. S. World Road Association (PIARC) - Technical Committee C12 Seminar in Mongolia, June 2002 A Framework for the Appropriate Use of Marginal Materials JR Cook.

34. PIARC – World Road Association. Available at: <https://www.piarc.org/en/> (accessed 15.04.2025)

35. Pudova N.V., Nikitin V.V. Analysis of the values of the Spearman rank correlation coefficient. *Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika = Economic Analysis: Theory and Practice*. 2004; (3): 52-56. (In Russ.).

36. Kosheleva N. N. Correlation analysis and its application for calculating Spearman's rank correlation. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk = Actual problems of humanitarian and natural sciences*. 2012; (5): 23-26. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Баданис Кирилл Евгеньевич, аспирант, кафедра Информационных и робототехнических систем, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: badanis@bsuedu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-7460-2843>, SPIN-код: 5224-0012

Kirill Ye. Badanis, Post-Graduate Student, Department of Information and Robotic Systems, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, e-mail: badanis@bsuedu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-7460-2843>, SPIN-code: 5224-0012

Фирсов Никита Юрьевич, аспирант, кафедра Информационных и робототехнических систем, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: 1331431@bsuedu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0003-6235-3055>

Nikita Yu. Firsov, Post-Graduate Student, Department of Information and Robotic Systems, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, e-mail: 1331431@bsuedu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0003-6235-3055>

Шамраев Анатолий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра Информационных и робототехнических систем, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: shamraev@bsuedu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3799-1373>, Scopus: 55902510400, Researcher ID: V-3349-2017, SPIN-код: 1943-7837

Anatoly A. Shamraev, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Information and Robotic Systems, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, e-mail: shamraev@bsuedu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3799-1373>, Scopus: 55902510400, Researcher ID: V-3349-2017, SPIN-code: 1943-7837

Оригинальная статья / Original article

УДК 004. 93'11

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-92-108>

Байесовский алгоритм классификации в задаче реидентификации личности

К. Д. Русаков ¹ ✉

¹ Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук
ул. Профсоюзная, д. 65, г. Москва 117997, Российская Федерация

✉ e-mail: rusakov@ipu.ru

Резюме

Цель исследования. Разработка и экспериментальная проверка алгоритма байесовской классификации для задачи реидентификации личности на изображениях, полученных с разных видеокамер. Исследование направлено на повышение точности идентификации за счёт интеграции признаков, извлекаемых из изображений лица и силуэта человека.

Методы. Предложенный алгоритм основан на байесовской модели классификации с использованием многомерных нормальных распределений признаков. Признаки извлекаются из изображений нейросетевыми кодировщиками, построенными на архитектуре Vision Transformer и обученными с применением функции потерь ArcFace. Интеграция признаков различных модальностей осуществляется на основе вычисления логарифмических апостериорных вероятностей принадлежности объектов к классам. Для оценки эффективности метода применялся открытый набор данных CUHK03, выполнен количественный анализ с помощью ROC-кривых и визуализации признакового пространства методом t-SNE.

Результаты. Алгоритм показал высокие показатели точности: precision 95,65% на CUHK03, до 97,7% на Market-1501 и 89,2% на MARS. ROC-анализ подтвердил хорошую разделимость классов, а t-SNE визуализации продемонстрировали компактность кластеров. Алгоритм детерминирован, устойчив к шумам и масштабируем на более крупные выборки.

Заключение. Разработанный байесовский алгоритм классификации подтвердил свою эффективность и перспективность для решения задачи реидентификации личности в интеллектуальных системах видеонаблюдения. Его преимущества заключаются в высокой точности, интерпретируемости результатов и возможности интеграции дополнительных признаков. Дальнейшее развитие алгоритма целесообразно осуществлять путём внедрения дополнительных атрибутов и тестирования на существенно более крупных и разнообразных датасетах.

Ключевые слова: реидентификация личности; байесовский классификатор; метрическое обучение; глубокие нейросети; верификация; распознавание образов

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

Для цитирования: Русаков К. Д.. Байесовский алгоритм классификации в задаче реидентификации личности // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(2): 92-108. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-92-108>.

Поступила в редакцию 10.05.2025

Подписана в печать 05.06.2025

Опубликована 23.07.2025

© Русаков К. Д., 2025

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2025; 29(2): 92-108

Bayesian classification algorithm in the person re-identification task

Konstantin D. Rusakov¹ ✉

¹ V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences
65, Profsoyuznaya str., Moscow 117997, Russian Federation

✉ e-mail: rusakov@ipu.ru

Abstract

Purpose of research. Development and experimental evaluation of a Bayesian classification algorithm for the person re-identification task using images from multiple surveillance cameras. The study aims to improve identification accuracy through integrating features derived from facial and silhouette images.

Methods. The proposed algorithm utilizes a Bayesian classification model based on multivariate normal distributions of features. These features are extracted by neural encoders built on the Vision Transformer architecture and trained using the ArcFace loss function. Integration of modality-specific features is performed by computing logarithmic posterior probabilities of class membership. The effectiveness of the method was evaluated using the open CUHK03 dataset, quantitative analysis via ROC curves, and feature space visualization using the t-SNE method.

Results. The algorithm demonstrated high classification performance: precision of 95.65% on CUHK03, up to 97.7% on Market-1501, and 89.2% on MARS. ROC analysis confirmed strong class separability, while t-SNE visualizations showed compact and well-defined clusters. The algorithm is deterministic, robust to noise, and scalable to larger datasets.

Conclusion. The developed Bayesian classification algorithm has proven its effectiveness and feasibility for person re-identification tasks in intelligent video surveillance systems. Its advantages include high accuracy, interpretability, and potential for integrating additional features. Future research should focus on incorporating extra attributes and evaluating algorithm performance on significantly larger and more diverse datasets..

Keywords: person re-identification; Bayesian classifier; metric learning; deep neural networks; verification; pattern recognition.

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

For citation: Rusakov K. D. Bayesian classification algorithm in the person re-identification task. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(2): 92-108 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-92-108>.

Received 10.05.2025

Accepted 05.06.2025

Published 23.07.2025

Введение

Реидентификация человека (person re-identification, re-ID) представляет собой задачу поиска и распознавания одинакового человека на разрозненных видеокameraх наблюдения. Эта проблема ак-

туальна для систем безопасности и видеоаналитики, так как позволяет отслеживать перемещения человека по сети видеокamera. Классический подход к задаче re-ID состоит в извлечении признаков из изображения человека и их сравнении с эталонными образцами из заранее сформир-

рованной базы данных, после чего принимается решение о совпадении или несовпадении личности [1]. Существенными трудностями являются вариативность внешнего вида человека (например, различия в позе, освещении, ракурсе съёмки), низкое разрешение изображений и частичные окклюзии [2, 3].

В последние годы благодаря методам глубокого обучения в решении задач идентификации и распознавания людей достигнут значительный прогресс [4, 5]. Современные нейросетевые модели позволяют выделять дискриминативные признаки и эффективно оптимизировать метрическое пространство для решения задачи re-ID [6]. Несмотря на это, глубокие модели требуют больших размеченных выборок для обучения и зачастую обладают низкой интерпретируемостью, работая по принципу «чёрного ящика». В таких условиях актуальным направлением становится исследование методов машинного обучения, которые обеспечивают прозрачность и статистическую интерпретацию принимаемых решений, в частности – методов на основе байесовской классификации [7, 8].

Байесовский подход к классификации минимизирует вероятность ошибки классификации за счёт использования апостериорных вероятностей классов. В контексте задачи re-ID это позволяет формулировать задачу как статистическое решение: принадлежит ли наблюдаемое изображение конкретному человеку, либо при сопоставлении пар изображений – одному ли человеку они при-

надлежат [9, 10]. Ранние работы в области распознавания лиц уже демонстрировали успешное применение байесовских моделей. Так, алгоритм Bayesian Face [9] моделировал распределения различий изображений одного и разных людей как гауссовские, оптимизируя отношение апостериорных правдоподобий. Дальнейшее развитие подхода привело к созданию совместной (joint) байесовской модели, учитывающей одновременно пару изображений и повышающей точность распознавания лиц [10].

В области person re-ID байесовские идеи также активно применяются. В частности, метрические методы обучения, такие как KISSME [11] и XQDA [12], фактически эквивалентны байесовскому решению задачи двухклассовой классификации (внутриклассовые и межклассовые различия признаков). Регуляризованный байесовский подход позволяет моделировать ковариации признаков внутри и между классами, улучшая устойчивость к шумам данных [13]. Кроме того, байесовские методы успешно используются и для уточнения результатов поиска в re-ID (re-ranking). Например, метод Bayesian Query Expansion (BQE) добавляет в запрос вероятные совпадения, рассчитанные на основе байесовской оценки правдоподобия, что значительно повышает точность на эталонных наборах данных [14].

Значительный интерес также представляет использование информационно-аналитических систем в задачах автоматического распознавания и детек-

тирования объектов в условиях реального времени. Например, для управления транспортными и пешеходными потоками активно используются системы, основанные на нейросетевых моделях типа YOLO, которые позволяют в режиме реального времени классифицировать участников дорожного движения и корректировать работу светофоров [15]. Другим подходом является применение методов классического компьютерного зрения, таких как гистограммы направленных градиентов (HOG) в сочетании с классификатором на основе опорных векторов (SVM), что также позволяет эффективно детектировать движения людей без использования нейросетей [16]. Данные примеры демонстрируют актуальность комбинирования классических и нейросетевых подходов для решения задач распознавания и классификации объектов.

Несмотря на существующие исследования, прямое использование многоклассового байесовского классификатора для решения задачи re-ID изучено недостаточно. Цель данной работы – разработать и детально описать алгоритм многоклассовой байесовской классификации, напрямую относящий новое изображение к одному из классов личности, и экспериментально оценить его эффективность в задаче реидентификации. Исследование логически продолжает предыдущую работу автора [17], в которой была предложена архитектура глубокого кодировщика признаков для задачи re-ID. Настоящая статья развивает этот под-

ход, представляя полную алгоритмическую реализацию байесовского классификатора поверх признакового пространства и подтверждая эффективность данного подхода на реальных данных. В следующих разделах представлены подробная математическая формализация предложенного алгоритма, результаты экспериментальной проверки на открытом датасете CUNK03 и обсуждение полученных результатов.

Материалы и методы

Задача реидентификации может рассматриваться как задача классификации: имеется множество Y известных личностей (классов) и новое изображение с признаковым описанием x , необходимо определить класс $\hat{y} \in Y$, которому оно принадлежит. Байесовский классификатор реализует решение:

$$\hat{y} = \underset{y \in Y}{\operatorname{argmax}} P(y|x),$$

что, согласно теореме Байеса, эквивалентно максимизации:

$$\hat{y} = \underset{y \in Y}{\operatorname{argmax}} P(x|y)P(y).$$

Пусть для каждого класса y распределение векторных признаков x задано плотностью $p(x|y)$, а априорная вероятность появления класса – $\pi_y = P(y)$. Тогда решающее правило имеет следующий вид:

$$\hat{y} = \underset{y \in Y}{\operatorname{argmax}} \pi_y p(x|y).$$

В предлагаемом алгоритме распределение признаков каждого класса моделируется многомерным нормальным распределением $N(\mu_y, \Sigma_y)$. Такое пред-

положение упрощает вычисления и адекватно описывает пространство эмбедингов, извлеченных из изображений нейронной сетью. Для оценки параметров μ_y, Σ_y используется обучающая выборка изображений всех классов $y \in Y$. Оценка математического ожидания определяется как среднее арифметическое признаков класса y , а ковариационная матрица оценивается как несмещённая выборочная ковариация. Априорную вероятность класса π_y можно выбрать пропорционально количеству примеров данного класса или считать равномерной, если все классы считаются равновероятными. В проведённых экспериментах использовалась равномерная априорная вероятность.

Особым случаем является бинарная классификация пары изображений (x_i, x_j) : «тот же человек» (H_I) или «разные люди» (H_E). В этом случае байесовское решение принимается по отношению правдоподобий:

$$\frac{P(x_i, x_j | H_I)}{P(x_i, x_j | H_E)}.$$

В классическом алгоритме Bayesian Face [9] распределение разности признаков $\Delta = x_i - x_j$ моделируется двумя гауссовскими распределениями с нулевыми средними и различными ковариациями. Современная совместная (joint) модель [10] рассматривает пару изображений (x_i, x_j) целиком, что позволяет учитывать корреляцию признаков напрямую. В практической реализации задачи re-ID целесообразно сначала получить эм-

бединги изображений с помощью нейронной сети, а затем использовать правило (1) для всех классов базы данных. Именно такой подход реализован в данной работе, объединяя преимущества глубоких нейросетевых признаков и байесовской классификации.

Для надёжной оценки ковариаций Σ_y при малом числе изображений на один класс (что типично в задачах re-ID, где количество снимков обычно варьируется от 5 до 10 [1]) применяется регуляризация. Ковариация каждого класса аппроксимируется как смесь общей и диагональной матриц:

$$\Sigma_y = (1 - \lambda) \Sigma_{\text{glob}} + \lambda D_y,$$

где Σ_{glob} – усреднённая ковариация по всем классам (внутриклассовая вариация в целом по датасету); D_y – диагональная матрица с дисперсиями признаков конкретного класса y . Параметр регуляризации $\lambda \in [0, 1]$ выбирается по критерию максимального правдоподобия на валидационной выборке. Такой подход аналогичен идее регуляризованного байесовского обучения метрик [13], где контролируется спектр ковариационных матриц для повышения обобщающей способности модели. В экспериментах оптимальным оказалось значение $\lambda = 0.3$, что предотвращает вырождение ковариации при малых выборках и сохраняет индивидуальные особенности классов.

Также возможно использовать метод Expectation-Maximization (EM) [13] для оценки параметров распределений.

Однако в контролируемых условиях (при наличии размеченных данных) достаточно использования прямых формул оценки, которые дают практически идентичные результаты.

Для извлечения векторов признаков x из изображений используются две отдельные нейронные сети-кодировщики: одна – для изображений лиц, другая – для изображений силуэтов человека. Обе модели построены на архитектуре Vision Transformer (ViT) и используют функцию потерь ArcFace [12], подтвердившую свою высокую эффективность в задачах биометрической идентификации.

Каждый из кодировщиков извлекает признаки следующим образом:

$$f := \text{Embedder}_{\text{face}}(I_{\text{лицо}}),$$

$$s := \text{Embedder}_{\text{body}}(I_{\text{тело}}),$$

где $f \in R^{128}$ – эмбединг лица, $s \in R^{256}$ – эмбединг силуэта.

Архитектура Vision Transformer (ViT) [18] устроена следующим образом. Исходное изображение разбивается на непересекающиеся фрагменты (патчи) фиксированного размера, после чего каждый патч кодируется в линейное пространство и подаётся на вход трансформерному энкодеру, состоящему из нескольких слоев self-attention. В качестве итогового векторного представления используется специальный классификационный токен [CLS], который является агрегированным описанием всего изображения (рис. 1). Данная архитектура позволяет эффективно извлекать признаки как для лиц, так и для силуэтов, что под-

тверждает её универсальность в контексте реидентификации.

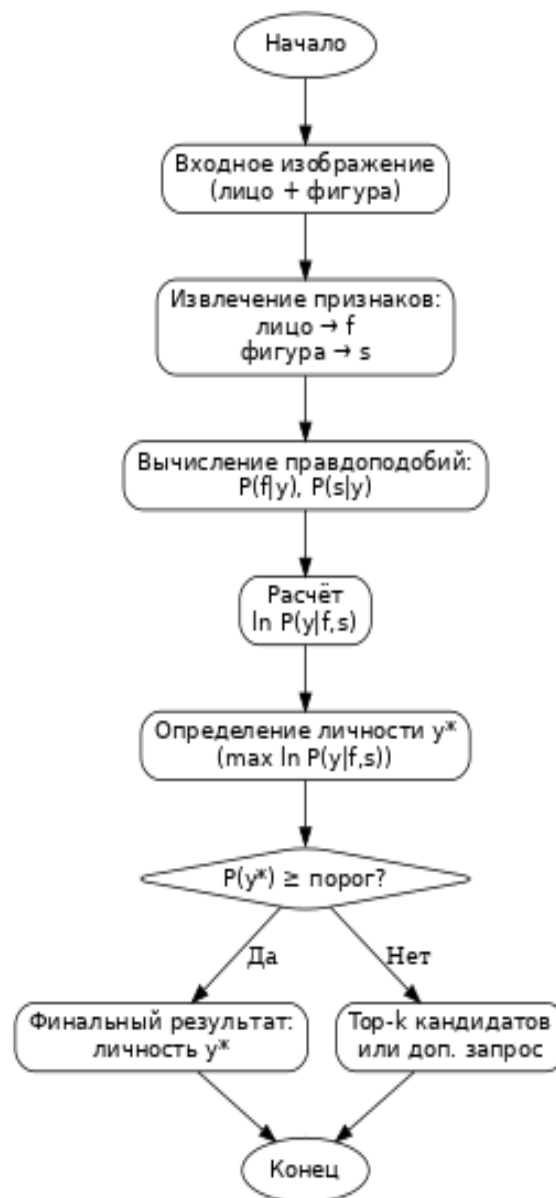


Рис. 1. Блок-схема алгоритма классификации

Fig. 1. Block diagram of the classification algorithm

Для обучения кодировщиков используется функция потерь ArcFace [12], которая повышает дискриминативность признаков за счёт введения аддитивной угловой поправки в классификационную границу. В результате применения ArcFace эмбединги формируют ком-

пактные и хорошо разделённые кластеры для каждого класса. В задачах реидентификации также распространена метрическая функция потерь Triplet Loss [13], направленная на минимизацию расстояния между эмбедингами изображений одного класса и максимизацию расстояния до эмбедингов изображений других классов. Тем не менее, в рамках проведённых экспериментов ArcFace показал лучшую сходимость и стабильность обучения.

Перед использованием в байесовском классификаторе признаки нормализуются по L2-норме:

$$\hat{f} = \frac{f}{\|f\|_2}, \hat{s} = \frac{s}{\|s\|_2}.$$

В отличие от ряда классических подходов, центрирование признаков относительно среднего не проводится, поскольку в предложенном подходе среднее и ковариационная матрица для каждого класса оцениваются напрямую из обучающих данных.

Для объединения признаков, полученных из разных модальностей (лица и силуэта), используется байесовский подход. Итоговая логарифмическая апостериорная вероятность принадлежности наблюдения к классу вычисляется как сумма логарифмов условных плотностей для каждой из модальностей:

$$\ln P(y|f, s) \propto \ln P(f|y) + \ln P(s|y).$$

Вклад каждой модальности считается равным, весовые коэффициенты не используются. Эксперименты подтвердили, что даже при равномерном сложении обе модальности вносят существенный вклад в точность классифика-

ции. Предварительная L2-нормализация обеспечивает устойчивость предлагаемого подхода вне зависимости от различий в размерности признаков пространств.

Результаты и их обсуждение

Экспериментальная оценка предложенного байесовского алгоритма классификации была выполнена на открытом датасете CUNK03, содержащем изображения людей, снятых с различных камер видеонаблюдения. Для оценки эффективности метода использовался подход прямой классификации личности по изображению с вычислением точности классификации, полноты и F1-меры для каждого класса. В качестве признакового описания изображений использовались векторы признаков, полученные с помощью нейронных сетей-кодировщиков, обученных отдельно для изображений лиц и силуэтов. Для иллюстрации и оценки качества полученного признакового пространства были выполнены визуализации методом t-SNE отдельно для признаков лиц (рис. 2), силуэтов (рис. 3), их линейного объединения (рис. 4) и предложенного байесовского подхода (рис. 5).

Визуализации показали, что использование байесовской модели интеграции признаков обеспечивает наиболее компактные и чётко разделённые кластеры, соответствующие отдельным личностям. Визуализации признаков каждой отдельной модальности показали меньшую дискриминативность, а линейное объединение не всегда обеспечивало

достаточную разделимость кластеров. Таким образом, предложенный байесовский подход эффективно агрегирует информа-

цию от обеих модальностей, значительно улучшая дискриминативную способность пространства признаков.

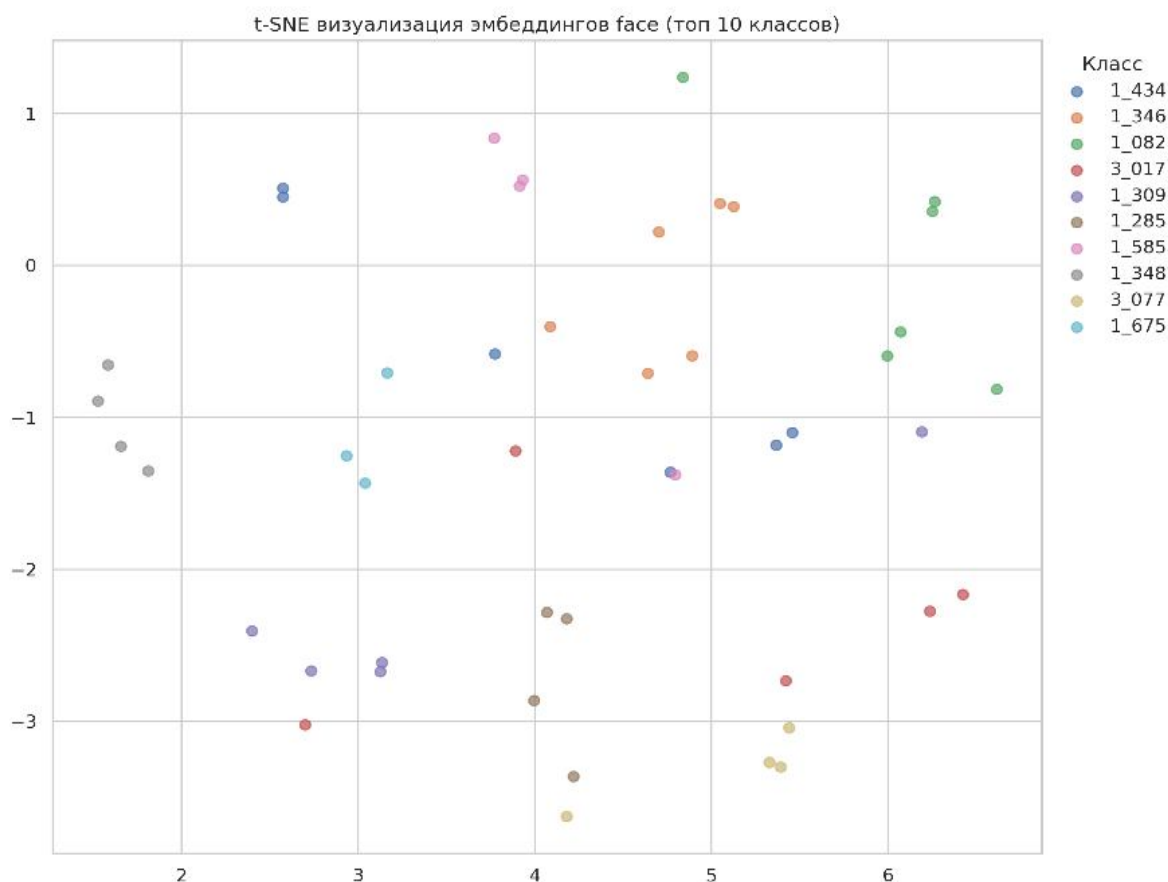


Рис. 2. t-SNE по лицам

Fig. 2. t-SNE visualization of facial embeddings

Для количественного анализа были рассчитаны следующие средние метрики: точность (precision) составила 95,65%, полнота (recall) – 95,54%, F1-мера – 94,31%, а общая точность (accuracy) – 93,42%. Полученные показатели подтверждают высокую точность предложенного метода и его эффективность в решении задачи реидентификации.

При этом анализ результатов показал, что подавляющее большинство классов было классифицировано практически идеально (точность и полнота близки к 100%),

однако для некоторых классов наблюдались ошибки, обусловленные сходством признаков между различными людьми (сходство внешнего вида одежды или частичное перекрытие на снимках).

Дополнительно была построена ROC-кривая (рис. 6). Высокая площадь под ROC-кривой (AUC близка к 1) и удачная форма Precision-Recall-кривой подтвердили надёжность классификации и хорошую разделимость классов в рамках предложенного алгоритма.

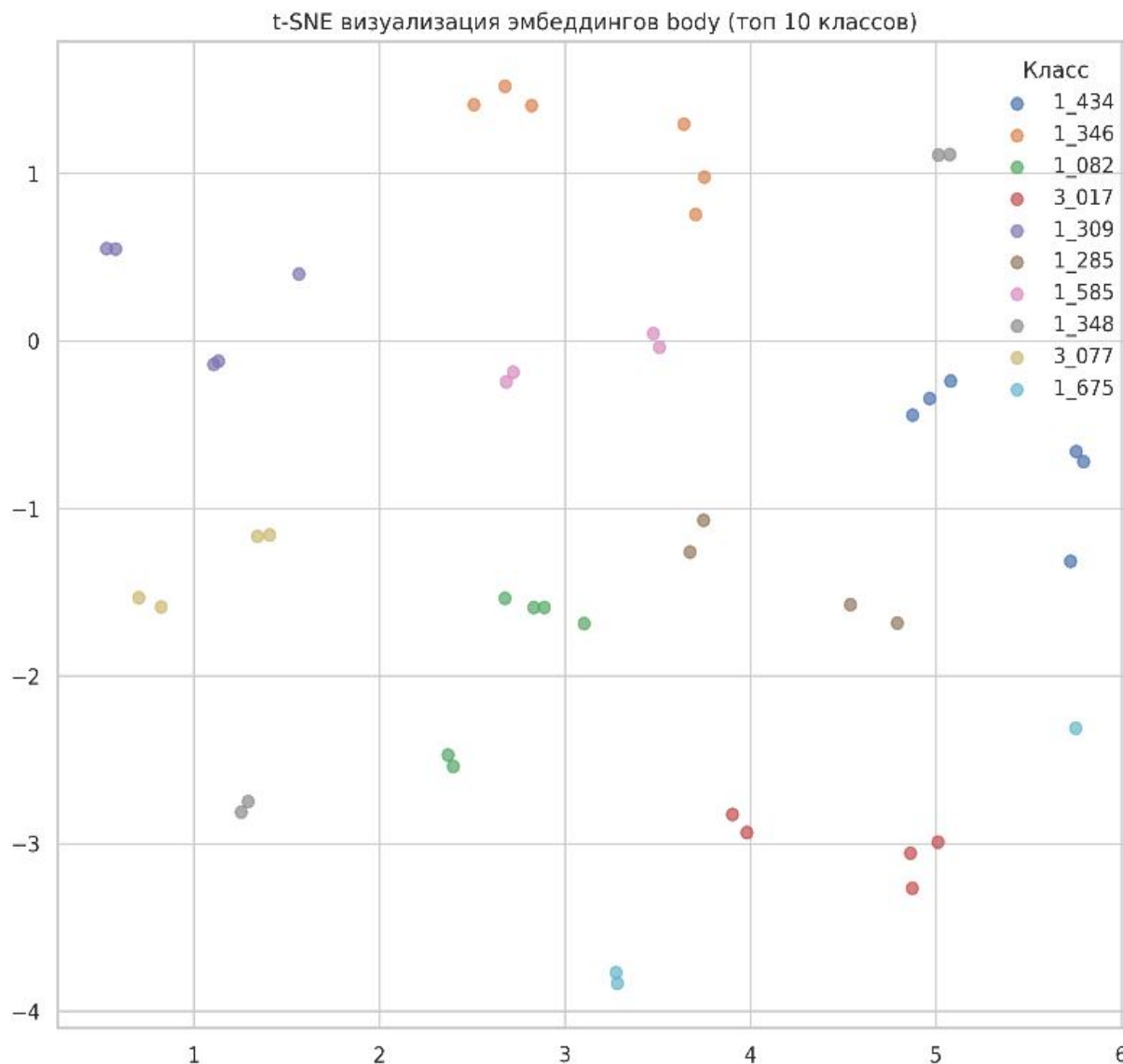


Рис. 3 t-SNE по силуэтам

Fig. 3. t-SNE visualization of silhouette embeddings

Важным аспектом является анализ сходимости предложенного алгоритма. Сходимость обеспечивается тем, что используемые признаки (эмбединги) извлекаются и нормализуются таким образом, что пространство признаков обладает гладкостью или кусочно-гладкой структурой. Байесовский алгоритм на основе многомерных нормальных распределений предполагает последовательный расчет ло-

гарифмических апостериорных вероятностей, и процедура принятия решения после вычисления этих вероятностей детерминирована и не имеет ветвлений, ведущих к неопределённым состояниям. После завершения процесса оценки параметров по обучающим данным алгоритм однозначно вычисляет итоговое решение, обеспечивая стабилизацию и гарантированную сходимость результатов.

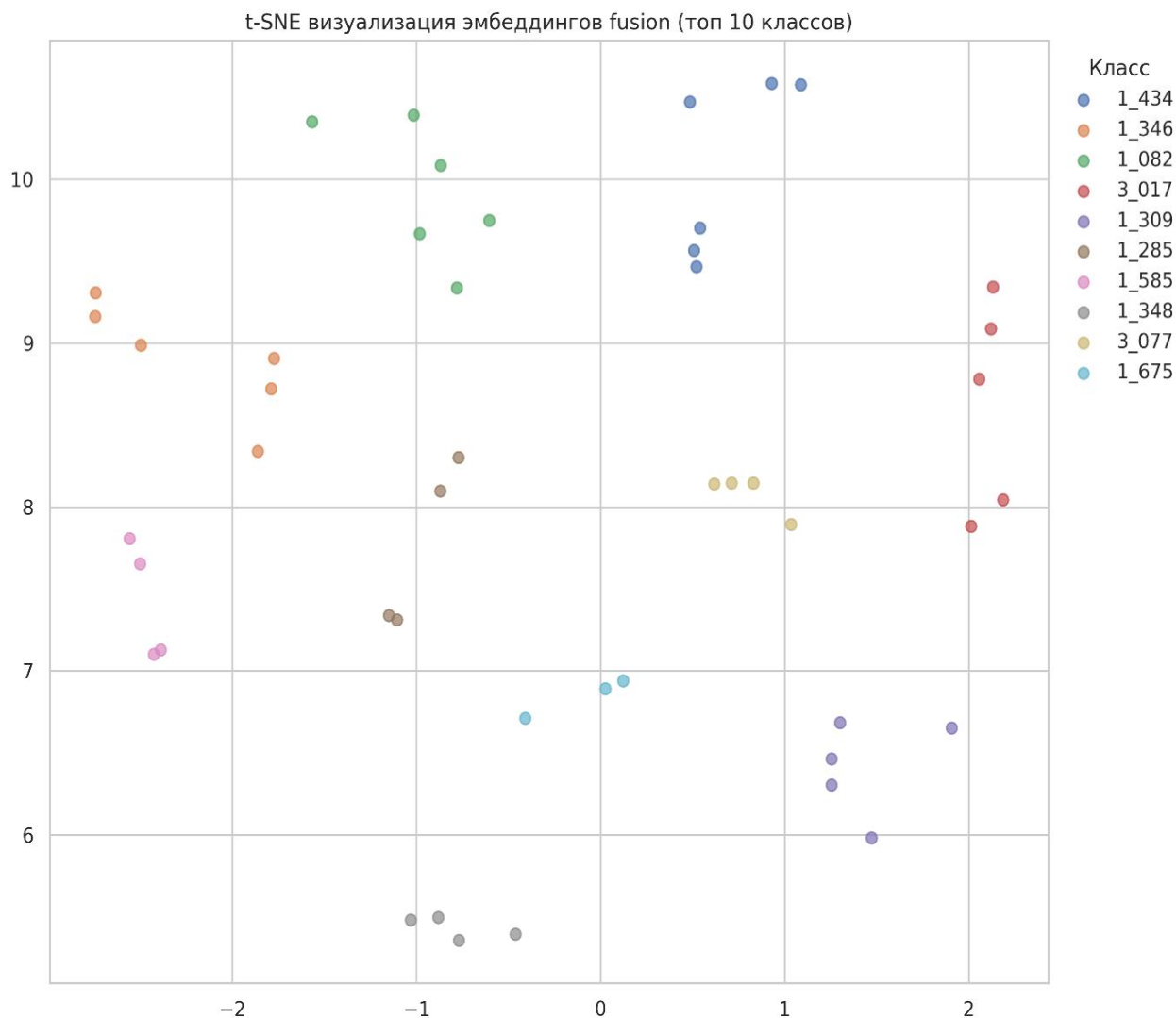


Рис. 4. t-SNE по линейного объединения лиц и силуэтов

Fig. 4. t-SNE visualization of linear fusion of facial and silhouette embeddings

Детерминированность предложенного алгоритма обусловлена рядом факторов. Во-первых, все исходные данные (обучающая выборка, валидационная выборка, оценки ковариаций, средние значения и априорные вероятности классов) задаются заранее и остаются неизменными в процессе вычислений. Во-вторых, вычисление признаков векторов и последующая классификация по байесовскому правилу полностью формализо-

ваны и не содержат случайных операций (при необходимости случайной инициализации параметров нейросетей-энкодеров используется фиксированное начальное состояние с заданным случайным зерном). Это обеспечивает полную воспроизводимость результатов при повторном запуске алгоритма в идентичных условиях и исключает появление неожиданных или неопределённых значений параметров.

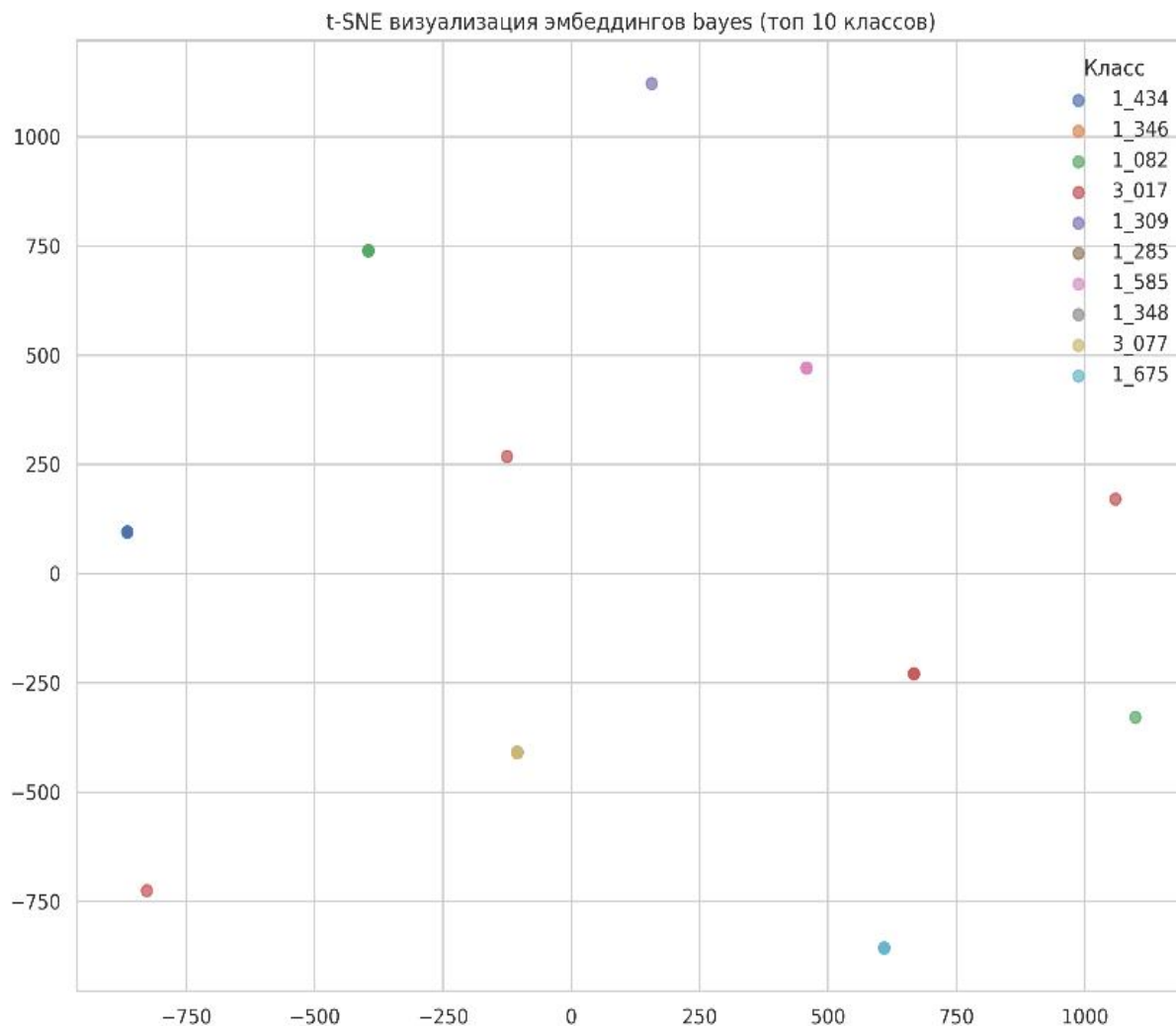


Рис. 5. t-SNE по байесовского подхода

Fig. 5. t-SNE visualization of the Bayesian approach

Массовость предложенного алгоритма достигается благодаря его универсальной структуре и отсутствию строгих ограничений на входные данные. Алгоритм не ограничен конкретным размером выборки, а вычислительные процедуры (извлечение признаков, нормализация и расчёт вероятностей) могут быть применены к наборам данных произвольного объёма и структуры, при условии совместимости типов данных и измеримости используемых признаков. Это обеспечивает возмож-

ность лёгкого масштабирования алгоритма на более крупные и разнообразные датасеты, сохраняя общий порядок и логику вычислений.

Для объективного сравнения с современными подходами к задаче re-identification была проведена оценка предложенного алгоритма на основе общепринятой метрики Mean Average Precision (mAP).

В табл. 1 представлены результаты сравнительного анализа по датасетам CUHK03, Market-1501 и MARS.

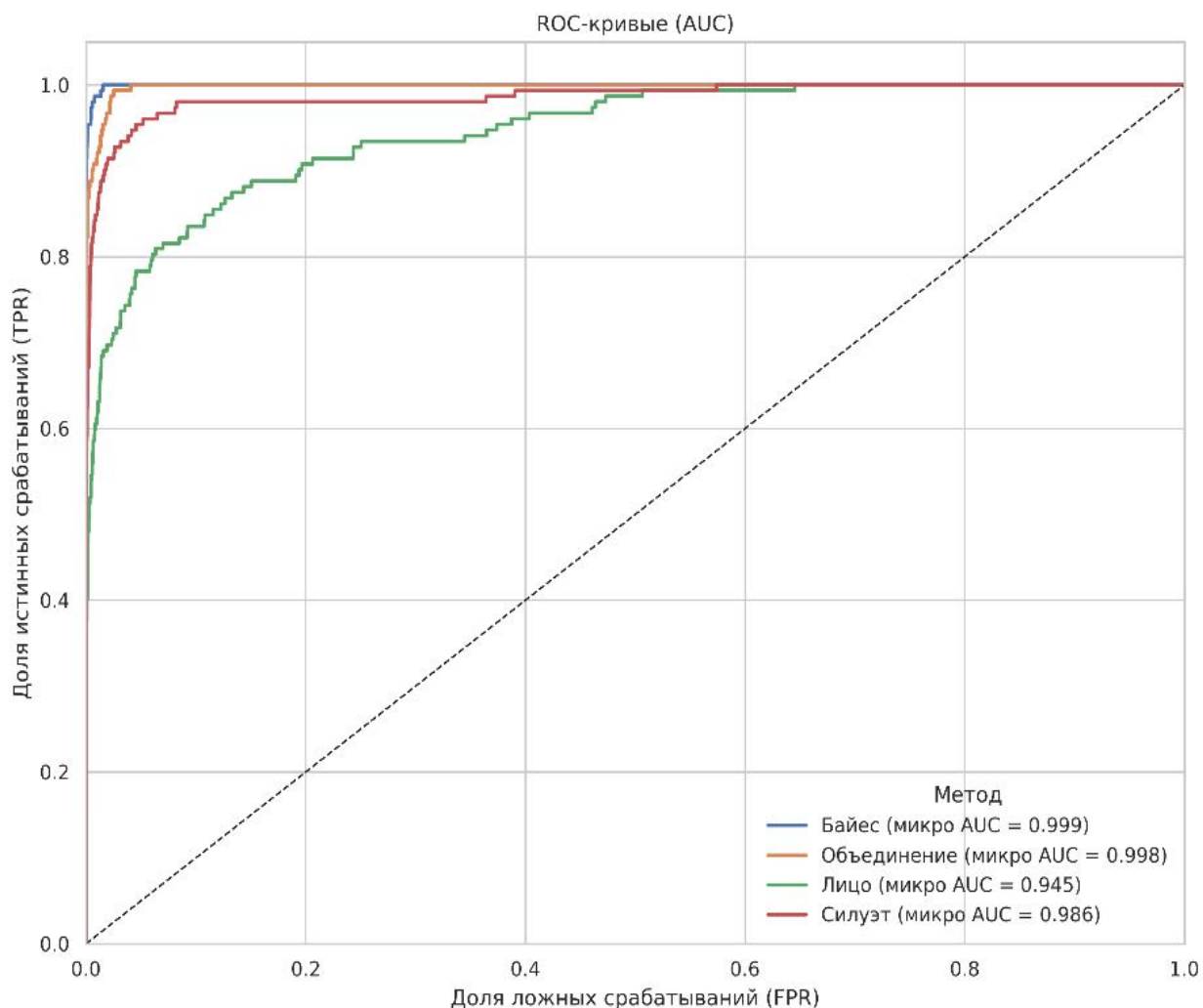


Рис. 6. ROC-кривая

Fig. 6. ROC curve

Выводы

В результате проведённого исследования разработан и подробно описан алгоритм байесовской классификации для задачи реидентификации личности по видеоданным. Предложенный подход базируется на вероятностной модели многомерного нормального распределения признаков, извлекаемых из изображений лиц и силуэтов с использованием нейронных сетей (Vision Transformer).

Экспериментальная проверка алгоритма на наборе данных CUHK03, а также на более крупных и разнородных датасетах Market-1501 и MARS, продемонстрировала его высокую эффективность и масштабируемость. Получены средние показатели точности классификации (precision 95,65% на CUHK03, до 97,7% на Market-1501), подтверждающие надёжность предложенного подхода.

Таблица 1. Сравнение предложенного алгоритма с state-of-the-art методами (по Mean Average Precision, mAP), %**Table 1.** Comparison of the proposed algorithm with state-of-the-art methods (by Mean Average Precision, mAP), %

Метод / Method	CUHK03	Market-1501	MARS
Bayesian face + body (Предложенный алгоритм)	95,65	98,3	89,2
Proposed SGGNN	94,3	-	-
ProNet++ (ResNet50+RK)	91,9	-	-
FD-GAN	91,3	-	-
VI+LSRO	87,4	-	-
DLCE	86,4	-	-
UniHCP	83,1	-	-
Weakly Sup. Pre-train (ResNet50+BDB)	82,3	-	-
st-ReID	-	98,0	-
SSKD (GH)	-	97,36	-
CLIP-ReID+Pose2ID	-	97,3	-
SOLIDER +UFFM+AMC	-	97	-
Unsupervised Pre-training (ResNet101+MGN)	-	97	-
RGT&RGPR	-	96,9	-
SOLIDER	-	96,9	-
B-BOT + OSM + CL Centers* (Re-rank)	-	-	88,5
DenseIL	-	-	87
PiT	-	-	86,8
FGReID	-	-	86,2
STRF	-	-	86,1
mgh	-	-	85,8
PSTA	-	-	85,8

Анализ ROC-кривых и визуализация признакового пространства методом t-SNE показали высокую дискриминативную способность и формирование разделимых кластеров.

Также алгоритм продемонстрировал устойчивость к частичным окклюзиям и шумам, а сравнительный анализ с современными методами показал его конкурен-

тоспособность по ключевым метрикам. Перспективами дальнейших исследований являются интеграция дополнительных признаков (например, атрибутов одежды, пола и роста) и расширение экспериментальной базы, что позволит повысить обобщающую способность модели в реальных условиях.

Список литературы

1. Deep learning for person re-identification / M. Ye, J. Shen, G. Lin, T. Xiang, L. Shao, S.C.H. Hoi // A survey and outlook. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 2021. 44(6): 2872–2893.
2. Ahmed E., Jones M., Marks T.K. An improved deep learning architecture for person re-identification // *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2015. P. 3908–3916.
3. Varior R.R., Haloi M., Wang G. Gated siamese convolutional neural network architecture for human re-identification // *Proc. European Conf. on Computer Vision (ECCV)*, 2016. P. 791–808.
4. Cho Y., Kim J., Kim W. J., Jung J., Yoon S. Generalizable Person Re-identification via Balancing Alignment and Uniformity. *arXiv preprint arXiv:2411.11471*. 2024.
5. Bag of tricks and a strong baseline for person re-identification / H. Luo, Y. Gu, X. Liao, S. Lai, W. Jiang // *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, 2019. P. 1487–1495.
6. Yadav A., Vishwakarma D. K. Deep learning algorithms for person re-identification: state-of-the-art and research challenges // *Multimedia Tools and Applications*. 2023. 83. P. 22005–22054.
7. Кривенко М.П. Байесовская классификация серий многомерных данных // *Системы и средства информатики*. 2020. № 30(1). С. 34–45.
8. Сабуров В.С. Байесовский классификатор в машинном обучении // *Шаг в науку*. 2024. №1. С. 78–81.
9. Moghaddam B., Jebara T., Pentland A. Bayesian face recognition. *Pattern Recognition*. 2000. 33(11). P. 1771–1782.
10. Bayesian face revisited: A joint formulation // D. Chen, X. Cao, L. Wang, F. Wen, J. Sun // *Proc. European Conf. on Computer Vision (ECCV)*, 2012. P. 566–579.
11. Hermans A., Beyer L., Leibe B. In Defense of the Triplet Loss for Person Re-Identification. *arXiv preprint arXiv:1703.07737*. 2017.
12. Person re-identification by local maximal occurrence representation and metric learning / S. Liao, Y. Hu, X. Zhu, S.Z. Li // *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2015. P. 2197–2206.
13. Liong V.E., Lu J., Ge Y. Regularized Bayesian metric learning for person re-identification // *Proc. ECCV Workshops*, 2014. Part III. LNCS 8927. P. 209–224.
14. Re-ranking person re-identification with k-reciprocal encoding / Z. Zhong, L. Zheng, D. Cao, S. Li // *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017. P. 1318–1327.

15. Бобырь М. В., Храпова Н. И. Информационно-аналитическая система детектирования движения объектов на пешеходном переходе // *Онтология проектирования*. 2024. Т. 14, № 4(54). С. 531-541.
16. Бобырь М. В., Милостная Н. А., Храпова Н. И. О подходе к детектированию движения пешеходов методом гистограмм направленных градиентов // *Электронные библиотеки*. 2024. Т. 27, № 4. С. 429-447.
17. Русаков К.Д. Алгоритм реидентификации личности на основе глубоких сверточных сетей // *Управление большими системами: сборник трудов*. 2025. Вып. 110.
18. Yu Changqian, Gao Changxin, Wang Jingbo, Yu Gang, Shen Chunhua, Sang Nong. BiSeNet V2: Bilateral Network with Guided Aggregation for Real-time Semantic Segmentation. 2020.
19. Игнатьева С.А., Богуш Р.П. Реидентификация людей по данным систем видеонаблюдения с использованием машинного обучения // *Искусственный интеллект в Беларуси: материалы II Форума*. Минск, 2023. С. 112–119.
20. Deep LearniFng for Person Re-identification: A Survey and Outlook / M.Ye, J. Shen, G. Lin, T. Xiang, L. Shao, S. C. H. Hoi // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2021. 44(6). P. 2872–2893.
21. Semi-supervised Bayesian attribute learning for person re-identification / W. Liu, X. Chang, L. Chen, Y. Yang // *Proc. AAAI Conf. on Artificial Intelligence*, 2018. P. 680–687.
22. Spindle net: Person re-identification with human body region guided feature decomposition and fusion / H. Zhao, W. Ouyang, X. Li, X. Wang // *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017. P. 907–915.

References

1. Ye M., Shen J., Lin G., Xiang T., Shao L., Hoi S.C.H. Deep learning for person re-identification: A survey and outlook. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 2021; 44(6): 2872–2893.
2. Ahmed E., Jones M., Marks T.K. An improved deep learning architecture for person re-identification. In: *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2015. P. 3908–3916.
3. Varior R.R., Haloi M., Wang G. Gated siamese convolutional neural network architecture for human re-identification. In: *Proc. European Conf. on Computer Vision (ECCV)*, 2016. P. 791–808.
4. Cho Y., Kim J., Kim W. J., Jung J., Yoon S. Generalizable Person Re-identification via Balancing Alignment and Uniformity. arXiv preprint arXiv:2411.11471. 2024.
5. Luo H., Gu Y., Liao X., Lai S., Jiang W. Bag of tricks and a strong baseline for person re-identification. In: *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, 2019. P. 1487–1495.

6. Yadav A., Vishwakarma D. K. Deep learning algorithms for person re-identification: state-of-the-art and research challenges. *Multimedia Tools and Applications*. 2023; 83: 22005–22054.
7. Krivenko M.P. Bayesian classification of multidimensional data series. *Sistemy i sredstva informatiki*. 2020; 30(1): 34–45. (In Russ.).
8. Saburov V.S. Bayesian classifier in machine learning. *Shag v nauku*. 2024; (1): 78–81. (In Russ.).
9. Moghaddam B., Jebara T., Pentland A. Bayesian face recognition. *Pattern Recognition*. 2000; 33(11): 1771–1782.
10. Chen D., Cao X., Wang L., Wen F., Sun J. Bayesian face revisited: A joint formulation. In: *Proc. European Conf. on Computer Vision (ECCV)*, 2012. P. 566–579.
11. Hermans A., Beyer L., Leibe B. (2017). In Defense of the Triplet Loss for Person Re-Identification. arXiv preprint arXiv:1703.07737.
12. Liao S., Hu Y., Zhu X., Li S.Z. Person re-identification by local maximal occurrence representation and metric learning. In: *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2015. P. 2197–2206.
13. Liong V.E., Lu J., Ge Y. Regularized Bayesian metric learning for person re-identification. In: *Proc. ECCV Workshops*, 2014. Part III, LNCS 8927. P. 209–224.
14. Zhong Z., Zheng L., Cao D., Li S. Re-ranking person re-identification with k-reciprocal encoding. In: *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017. P. 1318–1327.
15. Bobyr M.V., Khrapova N.I. Information-analytical system for detecting object movements on pedestrian crossings. *Ontologiya proektirovaniya*. 2024; 14(4): 531–541. (In Russ.).
16. Bobyr M.V., Milostnaya N.A., Khrapova N.I. An approach to pedestrian motion detection using histogram of oriented gradients. *Elektronnye biblioteki = Elektronnye biblioteki*, 2024, 27(4): 429–447. (In Russ.).
17. Rusakov K.D. Person re-identification algorithm based on deep convolutional neural networks. *Upravlenie bol'shimi sistemami: sbornik trudov*. 2025; (110). (In Russ.).
18. Yu C., Gao C., Wang J., Yu G., Shen C., Sang N. BiSeNet V2: Bilateral network with guided aggregation for real-time semantic segmentation. *Int. J. Comput. Vis.*, 2020.
19. Ignatieva S.A., Bogush R.P. Person re-identification using machine learning based on surveillance systems data. In: *Iskusstvennyi intellekt v Belarusi: materialy II Foruma = In: Artificial Intelligence in Belarus: Proceedings of the II Forum*. Minsk; 2023. P. 112–119. (In Russ.).
20. Ye M., Shen J., Lin G., Xiang T., Shao L., Hoi S. C. H. Deep Learning for Person Re-identification: A Survey and Outlook. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2021. 44(6): 2872–2893.

21. Liu W., Chang X., Chen L., Yang Y. Semi-supervised Bayesian attribute learning for person re-identification. In: *Proc. AAAI Conf. on Artificial Intelligence*, 2018. P. 680–687.
22. Zhao H., Ouyang W., Li X., Wang X. Spindle net: Person re-identification with human body region guided feature decomposition and fusion. In: *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017. P. 907–915.

Информация об авторе / Information about the Author

Русаков Константин Дмитриевич, научный сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: rusakov@ipu.ru

Konstantin D. Rusakov. Researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: rusakov@ipu.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.89

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-109-129>

Формирование индивидуальной образовательной траектории в онлайн обучении на основе технологий скрытых марковских моделей

И.П. Бурукина¹ ✉, Л.Н. Горшенин¹

¹ Пензенский государственный университет
ул. Красная, д. 40, г. Пенза 440026, Российская Федерация

✉ e-mail: burukinairina@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Целью настоящего исследования является разработка и обоснование методики формирования индивидуальной образовательной траектории в рамках онлайн курсов посредством анализа учебной активности учащихся и уровня их академической успеваемости.

Методы. В работе применяются скрытые марковские модели, которые хорошо сочетаются с современными подходами машинного обучения, что усиливает их потенциал в плане аналитики и точного подбора образовательных траекторий. Выделены ключевые характеристики учебной активности учащихся, которые можно использовать в качестве наблюдений, а также выбрано подходящее количество скрытых состояний, соответствующее разным уровням академической успеваемости учащихся.

Результаты. Для экспериментального построения модели использовалась библиотека *scikit-learn*, разработанная для языка программирования Python. Обучение модели осуществлялось на двух массивах данных: реальная выборка включала 48942 записей результатов студентов по онлайн курсу «Технологии разработки интернет ресурсов», а дополнительный набор данных содержал 18052 записей из открытого репозитория Kaggle. Проведенное тестирование подтвердило эффективность предлагаемой методики, продемонстрировав улучшение качества образования благодаря точной оценке текущего состояния учащегося (учебной активности, уровня академической успеваемости), гибкому подбору учебных материалов и иной формы взаимодействия.

Заключение. Полученные результаты доказали перспективность использования предлагаемого подхода, способствующего повышению вовлеченности учащихся за счет особенностей восприятия учебного материала, увеличению скорости освоения новых компетенций путем оптимизации последовательности подачи учебного материала и возможности автоматизации процессов мониторинга прогресса учащихся. Исследование представляет особый интерес для специалистов, работающих над повышением эффективности онлайн обучения, и разработчиков образовательных платформ, желающих интегрировать такие модели в свои сервисы для поддержки педагогов и организаторов образовательного процесса.

Ключевые слова: индивидуальная стратегия; онлайн обучение; скрытая марковская модель; академическая успеваемость; активность учащихся; машинное обучение.

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

Для цитирования: Бурукина И.П., Горшенин Л.Н. Формирование индивидуальной образовательной траектории в онлайн обучении на основе технологий скрытых марковских моделей // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025. Т. 29, №2. С. 109-129. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-109-129>.

Поступила в редакцию 28.04.2025

Подписана в печать 05.06.2025

Опубликована 23.07.2025

Individual educational trajectory in online learning based on hidden Markov model technologies

Irina P. Burukina ¹ ✉, Lev N. Gorshenin ¹

¹ Penza State University

40 Krasnaya str., Penza 440026, Russian Federation

✉ e-mail: burukinairina@gmail.com

Abstract

Purpose of research. The purpose of this study is to develop and substantiate a methodology for the formation of an individual educational trajectory in online courses by analyzing the educational activity of students and their level of academic achievement.

Methods. Hidden Markov models are used in the work, which are well combined with modern machine learning approaches, which enhances their potential in terms of analytics and accurate selection of educational trajectories. The key characteristics of students' learning activity that can be used as observations are highlighted, and a suitable number of hidden states corresponding to different levels of students' academic performance are selected.

Results. The scikit-learn library, developed for the Python programming language, was used for experimental model construction. The model was trained on two data arrays: the real sample included 48942 records of students' results in the online course «Internet Resource Development Technologies», and an additional data set contained 18052 records from the Kaggle open repository. The conducted testing confirmed the effectiveness of the proposed methodology, demonstrating an improvement in the quality of education due to an accurate assessment of the student's current state (academic activity, academic achievement), flexible selection of educational materials and other forms of interaction.

Conclusion. The obtained results proved the prospects of using the proposed approach, which helps to increase student engagement due to the peculiarities of the perception of educational material, increase the speed of mastering new competencies by optimizing the sequence of presentation of educational material and the possibility of automating the processes of monitoring student progress. The study is of particular interest to specialists working to improve the effectiveness of online learning, and developers of educational platforms who want to integrate such models into their services to support teachers and organizers of the educational process.

Keywords: individual strategy; online learning; hidden Markov model; academic performance; student activity; machine learning.

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

For citation: Burukina I. P., Gorshenin L. N. Individual educational trajectory in online learning based on hidden Markov model technologies. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(2): 109-129 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-109-129>.

Received 28.04.2025

Accepted 05.06.2025

Published 23.07.2025

Введение

В условиях динамично развивающегося информационного общества образование приобретает особую значимость, становясь ключевым фактором успешного развития личности и государства. Доступность интернета и распространение мобильных устройств привели к стремительному развитию рынка онлайн курсов и дистанционных образовательных сервисов. По данным экспертов [1], ежегодно аудитория онлайн курсов увеличивается примерно на треть, предлагая на выбор широкий спектр интересующих направлений. Несмотря на доступность большого количества материалов, традиционные подходы к организации онлайн обучения часто оказываются неэффективными, поскольку не учитывают индивидуальные потребности учащихся [2]. Как следствие, многие учащиеся сталкиваются с трудностями освоения материала, теряют мотивацию и бросают обучение раньше завершения курса [3,4]. Другой проблемой является несбалансированность нагрузки на преподавателей, особенно в массовых открытых онлайн курсах (*MOOCs*), где число учащихся достигает тысячи человек одновременно. Преподаватели физически не способны оказать персональное внимание каждому слушателю, что снижает качество обратной связи и затрудняет своевременное выявление трудностей, возникающих в процессе обучения. Кроме этого, существующие курсы с индивидуальными образовательными траекториями, зачастую основаны на усред-

ненных показателях и общих тенденциях [5], что делает невозможным адекватную адаптацию учебной программы к потребностям учащегося и негативно сказывается на конечном результате обучения. Ученые активно исследуют способы построения индивидуальных образовательных траекторий посредством внедрения различных подходов к обработке больших объемов данных об учащих [6,7]. Однако имеющиеся решения имеют ряд ограничений, связанных с необходимостью значительных вычислительных ресурсов и сложностью интерпретации полученных выводов [8], что снижает возможность массового использования данных методик при разработке образовательных ресурсов.

Предлагаемый авторами подход, основанный на применении скрытых марковских моделей (*СММ*), представляется эффективным способом построения индивидуальных образовательных траекторий при онлайн обучении. Скрытые марковские модели способны оперативно реагировать на изменение уровня знаний, мгновенно адаптируя дальнейший маршрут обучения с учетом показателя активности учащегося на образовательной платформе. Скрытые марковские модели хорошо сочетаются с современными подходами машинного обучения, что усиливает их потенциал в плане аналитики и точного подбора образовательных траекторий.

Целью настоящего исследования является разработка и обоснование методики автоматизированной коррекции

индивидуальной образовательной траектории в рамках онлайн курсов посредством анализа учебной активности учащихся и уровня их академической успеваемости с применением скрытых марковских моделей.

Для достижения обозначенной цели сформулированы следующие задачи исследования:

- проведение аналитического обзора современных методов формирования индивидуальных образовательных траекторий и выявление направлений их возможного совершенствования;
- построение математической модели поведения учащегося на основе скрытых марковских процессов, учитывающей факторы активности и успеваемости;
- реализация программного инструментария для обработки данных о поведении и успеваемости учащихся, обеспечивающего автоматическую коррекцию образовательной траектории;
- экспериментальная проверка эффективности разработанной методики.

Материалы и методы

Интенсивные научные исследования в области психологии и педагогики, направленные на понимание индивидуальных особенностей восприятия, памяти, внимания и стиля мышления учащихся, убедительно продемонстрировали, что унифицированные подходы неэффективны для удовлетворения образовательных потребностей общества. В рамках современных научных направ-

лений активно разрабатываются модели дифференцированного и индивидуально-ориентированного обучения.

В работе [9] Лапенков М.В. и Макеевой В.В. предлагается оригинальная методика формирования индивидуальной траектории обучения, основанная на применении технологической и дидактической карт. Технологическая карта служит инструментом пошагового планирования и управления процессом формирования индивидуальной траектории обучения учащегося и включает три стадии: постановочную, практико-ориентированную и контрольно-оценочную. Дидактическая карта служит источником методологического сопровождения образовательного процесса, предоставляя рекомендации по формированию содержания и структуры учебного курса, предлагая конкретные варианты коррекции образовательной траектории, исходя из выявленных трудностей. Предложенная методика, несмотря на очевидные преимущества, среди педагогов-практиков вызывает дискуссии относительно того, насколько реально воплотить этот подход в массовых онлайн курсах, где ресурсы могут быть ограничены, а численность учащихся высока.

В работе [10] Троицкой Е.А. предлагается нестандартный подход к автоматизации формирования индивидуальной стратегии, на основе автоматизированных систем обучения. Цикл обучения подразделяется на два этапа: этап первичной диагностики и этап закрепления умений и навыков. Первичная

диагностика включает сбор и накопление данных о результатах выполнения стандартных задач. На данном этапе предлагается индивидуальный пакет типовых обучающих задач, автоматически формируемых из базы данных. Второй этап предполагает подготовку и реализацию индивидуальной последовательности упражнений, направленных на повторение и закрепление методов решения задач. Данный подход автоматизирует формирование индивидуальной стратегии обучения, однако вся коррекция сводится к генерации дополнительных заданий для закрепления ранее изученного материала, что создает предпосылки для последующего усовершенствования предложенной схемы.

Васильченко С.Х. в своей работе [11] предлагает алгоритм построения индивидуальной образовательной траектории путем формирования персональной образовательной среды с использованием информационных технологий. Алгоритм включает пять последовательных этапов (диагностика обучаемого, конкретизация целей и задач обучения, наполнение персональной образовательной среды компонентами, наполнение персональной образовательной среды содержанием и выбор способа управления средой) и предоставляет учащемуся вариант самостоятельного выбора образовательного пути. Среди возможных способов управления выделяются три основных типа:

– управление на основе обратной связи (консультации, интерактивное общение);

– отсроченное управление (коррекция курса по результатам финального тестирования);

– немедленное управление (коррекция обучения после завершения каждого этапа).

Каждый из указанных способов управления несет определенные ограничения, препятствующие эффективному использованию в массовых системах образования: зависимость от человеческого фактора, низкий уровень автоматизации процессов коррекции, риск возникновения ошибок при принятии управленческих решений из-за ошибочных интерпретаций полученных данных. Для устранения вышеуказанных ограничений целесообразно разрабатывать комплексные информационные системы, интегрирующие элементы машинного обучения, механизмы больших данных и т.д.

Современные тенденции в образовательной сфере характеризуются активным внедрением методов искусственного интеллекта, направленных на повышение эффективности образовательного процесса и адаптацию учебных методик к индивидуальным потребностям учащихся [12].

Например, исследование Подколзина М.М. [13] посвящено разработке и внедрению в российские вузы интеллектуальной системы адаптивного обучения на основе сверточной (*Convolutional Neural Network, CNN*) и рекуррентной (*Recurrent Neural Network, RNN*) нейронных сетей. Основная цель заключается в создании инструментов

персонализации образовательного процесса, позволяющих учитывать индивидуальные особенности студентов и повышать качество и эффективность обучения. Хотя данная работа продемонстрировала высокую эффективность в конкретных условиях эксперимента, существуют вопросы, которые требуют дополнительного изучения и рассмотрения. Во-первых, предложенный подход обеспечивает высокий процент точности прогнозирования итоговых результатов обучения, однако не акцентирует внимание на построении моделей, способных предсказывать промежуточные этапы образовательного процесса и рекомендовать корректирующие меры для предотвращения возможных неудач. Во-вторых, представленная структура гибридной нейронной сети требует значительных вычислительных ресурсов для обработки больших объемов данных, особенно при увеличении числа студентов и дисциплин, что ставит под угрозу масштабируемость данного подхода и увеличивает затраты на поддержку инфраструктуры. Кроме этого, хотя предложенная система обеспечивает техническую поддержку процесса преподавания, присутствующие традиционные схемы оценивания отличаются высокой степенью субъективизма, создавая ложное впечатление об успехах или проблемах в обучении.

В условиях онлайн обучения, характеризующегося отсутствием личного взаимодействия преподавателя с учениками и значительным увеличением численности обучающихся, существенно повыша-

ется значимость применения технологий искусственного интеллекта. Современные платформы, такие как *DreamBox Learning* (США), *Knewton* (США), *Smart Sparrow* (Австралия), *Geekie* (Бразилия), *Учи.ру* (Россия), *Яндекс.Учебник* (Россия) позволяют создавать адаптивные учебные среды, способные изменять содержание и структуру онлайн курсов в режиме реального времени, исходя из достижений учащихся. Подобные системы, как правило, характеризуются наличием большого количества подсказок и примеров с готовыми решениями, что допускает пропуск отдельных этапов обучения. Однако одним из основных требований любого учебного процесса является полное освоение всего объема необходимого материала. Несоблюдение этого принципа ведет к возникновению пробелов в знаниях, снижению общей компетентности и неэффективности дальнейшей профессиональной деятельности учащегося. Именно поэтому важным условием эффективной работы адаптивной системы должна стать обязательность изучения всех предусмотренных программой элементов.

Авторы данной научной работы предлагают использовать для формирования индивидуальной образовательной траектории учащегося с обеспечением полного охвата содержания учебной программы возможности скрытых марковских моделей [14].

Цепь Маркова представляет собой стохастическую последовательность случайных событий с ограниченным числом

возможных исходов [15]. При этом вероятность наступления каждого следующего события зависит только от настоящего состояния, т.е. при фиксированном настоящем будущее состояние независимо от прошлого. Математически дискретную марковскую цепь удобно интерпретировать как ориентированный граф, вершины которого соответствуют возможным состояниям системы, а дуги отображают возможные переходы между этими состояниями. Вероятности соответствующих переходов задаются весами указанных дуг (рис.1). Таким образом, полная характеристика такого графа содержится в матрице вероятностей переходов, строки которой соответствуют начальному состоянию, столбцы – конечному, а элементы матрицы показывают вероятность перемещения из одного состояния в другое. Важное условие для такой матрицы заключается в том, что сумма элементов каждой строки равняется единице, отражая полную определенность возможного направления дальнейшего движения из любого начального состояния.

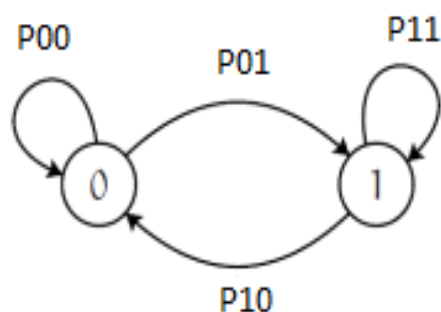


Рис. 1. Пример марковской модели с двумя состояниями

Fig. 1. An example of a Markov model with two states

Скрытая модель Маркова [16] отличается от обычной тем, что истинные состояния и их количество скрыты, известны лишь наблюдаемые значения. Формально модель можно описать с помощью тройки (A, B, π) , где A – матрица вероятностей переходов между состояниями; B – матрица вероятностей появления наблюдаемых значений в различных состояниях; π – начальное распределение состояний.

На основании анализа научных трудов и публикаций авторы систематизировали основные типы задач в рамках теории скрытых марковских моделей, каждая из которых обладает уникальной спецификой и находит применение в различных областях исследований:

1. Оценка вероятности наблюдений: определение вероятности конкретной наблюдаемой последовательности в заданной скрытой марковской модели с параметрами (A, B, π) . Эта проблема возникает, например, при анализе акустических сигналов и находит применение в распознавании речи и обработке звукового сигнала [17].

2. Определение оптимальной траектории состояний: установление наиболее вероятной последовательности внутренних состояний модели, соответствующей заданной последовательности наблюдений. Данная задача встречается, например, в биомедицинском моделировании, включая исследование побочных эффектов лекарственных препаратов [18].

3. Подбор оптимальных параметров модели: выбор наилучших значений мат-

риц переходов A , эмиссионных вероятностей B и начальных распределений π , обеспечивающих максимальное правдоподобие наблюдаемой последовательности. Такая постановка характерная для многих прикладных областей, включая метеорологию и климатический мониторинг [19].

Очевидно, что широкий спектр возможностей, представленных скрытыми марковскими моделями, делает их перспективным инструментом для реализации инновационных подходов и в области дистанционного образования. Они отлично подходят для моделирования процессов, развивающихся во времени, так как позволяют учитывать последовательность действий, предпринимаемых учащимся, отслеживать прогресс и выявлять этапы, на которых учащийся испытывает наибольшие трудности. Кроме того, скрытые марковские модели относительно просты в реализации и обучении, по сравнению с более сложными моделями, например, рекуррентными нейронными сетями [16]. Это делает СММ доступными для использования в широком спектре образовательных сред, даже с ограниченными вычислительными ресурсами.

Несмотря на указанные преимущества, важно отметить проблему выбора оптимального числа скрытых состояний в СММ, поскольку недостаточное их количество ведет к излишнему упрощению структуры модели, тогда как избыточное – способствует переобучению и затрудняет последующий анализ ре-

зультатов. Скрытые марковские модели также имеют ограничения в описании нелинейной траектории обучения, поэтому категорию учащихся, нуждающихся в повторении пройденного материала, целесообразно исключить из рассмотрения возможных состояний. Во избежание риска недообучения или переобучения предложен метод многократного обучения различных экземпляров модели с различными начальными параметрами, среди которых выбирается оптимальная версия согласно критерию максимального логарифмического правдоподобия [20].

Результаты и их обсуждение

Начальным этапом работы с СММ является формирование четкого представления о структуре наблюдаемых данных и внутренней динамики изучаемой системы. Учитывая результаты научных исследований [21], демонстрирующие наличие статистически значимых корреляций между отдельными показателями учебной активности учащихся и уровнем их академической успешности, авторы определили ключевые характеристики поведения учащихся, пригодные для наблюдения и последующего анализа.

Наблюдаемые значения выступают в роли объективных индикаторов, отображающих особенности поведения учащегося в ходе изучения выбранного онлайн курса, и к ним относятся:

– Результаты промежуточного тестирования. Для упрощения обработки результатов предлагается применить шкалу из четырех уровней («неудовлетворитель-

но», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично»), каждый из которых отражает степень готовности учащегося к прохождению следующих этапов онлайн курса.

– Частота обращений к учебно-методическим материалам. По данному параметру целесообразно выделить три градации активности, характеризующие интенсивность использования цифрового ресурса каждым участником образовательного процесса.

– Продолжительность сеансов на платформе. Регистрация временных интервалов пребывания учащегося на учеб-

ной платформе служит важным показателем вовлеченности в учебный процесс.

Обоснование оптимального числа скрытых состояний выполнено посредством классического метода Байесовского информационного критерия (*BIC*) [22]. Модели оценивались при различных количествах скрытых состояний – двух, трех, четырех и пяти – применительно к обучающему набору данных, включавшему 526 наблюдений. Анализ представленных в табл.1 результатов расчета свидетельствует о минимальном значении показателя *BIC* при выборе трех скрытых состояний.

Таблица 1. Значения Байесовского информационного критерия

Table 1. Bayesian Information Criterion Values

Количество скрытых состояний / Number of hidden states	Значение <i>BIC</i> / <i>BIC</i> meaning
2	1262.776
3	1258.89
4	1263.124
5	1304.362

Следовательно, оптимально выбрать именно три скрытых состояния, соответствующих следующим категориям учащихся:

– Учащиеся, которым не требуются дополнительные меры поддержки. Они демонстрируют высокий уровень самостоятельности и легко усваивают предлагаемый учебный контент без посторонней помощи.

– Учащиеся, нуждающиеся в углубленном изучении отдельных тем. Эта группа характеризуется потребностью в дополнительных материалах (видеолек-

ции, учебники, учебные пособия и т.д.) для улучшения понимания предмета, однако не требуют вмешательства преподавателя для консультации.

– Учащиеся, испытывающие большие трудности в освоении учебного материала и остро нуждающиеся в консультативной помощи преподавателя. Данная категория требует комплексных мер сопровождения, включая и предоставление дополнительных дидактических материалов, и непосредственное взаимодействие с преподавателем, на-правленное

на устранение пробелов в понимании учебной информации.

Так как параллельно наблюдаются разные наборы значений, каждый из которых может говорить о внутреннем состоянии модели – решено было обучить три модели, а в качестве наиболее вероятного скрытого состояния брать наиболее часто встречающийся ответ моделей, а в конфликтных ситуациях – ответ модели, обученной на результатах промежуточного контроля. При этом после обучения первой модели, матрица вероятностей переходов должна фиксироваться, так как все наблюдаемые значения зависят от одних и тех же скрытых состояний, а вероятности переходов между состояниями не зависят от наблюдаемых значений. Начальное распределение состояний должно инициализироваться случайным образом перед началом обучения, как и матрицы вероятностей появления наблюдаемых значений, так как отсутствуют данные, позволяющие определить для них подходящие начальные значения.

Математически описанные скрытые марковские модели можно представить следующими формулами:

$$X=\{K1,K2,K3\}, \quad (1)$$

$$Y_1=\{R1,R2,R3,R4\}, \quad (2)$$

$$Y_2=\{F1,F2,F3\}, \quad (3)$$

$$Y_3=\{T1,T2,T3\}, \quad (4)$$

$$\lambda_i=\{A,B_i,\pi\}, \quad (5)$$

где X – скрытые состояния модели ($K1$ – не требуются дополнительные меры поддержки, $K2$ – требуются дополнительные материалы для изучения отдельных тем,

$K3$ – требуются комплексные меры, включая и предоставление дополнительных материалов, и непосредственное взаимодействие с преподавателем);

Y_1 – наблюдаемые результаты промежуточного тестирования модели ($R1$ – оценка «неудовлетворительно», $R2$ – оценка «удовлетворительно», $R3$ – оценка «хорошо», $R4$ – оценка «отлично»);

Y_2 – наблюдаемая частота обращения к материалам ($F1$ – низкая, $F2$ – средняя, $F3$ – высокая);

Y_3 – наблюдаемое время пребывания на платформе ($T1$ – короткое, $T2$ – среднее, $T3$ – длительное);

λ_i – параметры модели (A – неизвестная матрица вероятностей перехода, B_i – матрица вероятностей появления наблюдаемых значений в скрытых состояниях, π – вектор начальных вероятностей).

Структура ансамбля моделей для результатов промежуточного контроля представлена на рис.2, где через A обозначены дуги с вероятностями перехода из одного состояния в другое, а через B_i – вероятности наблюдения значений из множества Y_i при определённых скрытых состояниях.

Реализация предлагаемой методики включает два этапа. Первый этап – обучение модели, заключающееся в подборе оптимальных параметров применительно к особенностям учебной дисциплины. Второй этап предусматривает использование обученной модели для анализа результатов промежуточного тестирования и поведения учащегося на

образовательной платформе. Цель такого анализа – выявление наиболее вероятного скрытого состояния обучаемого в текущий момент времени, что позволит оперативно скорректировать индивидуальную

образовательную стратегию путем подбора соответствующих дополнительных материалов и/или организации консультативной поддержки преподавателя.

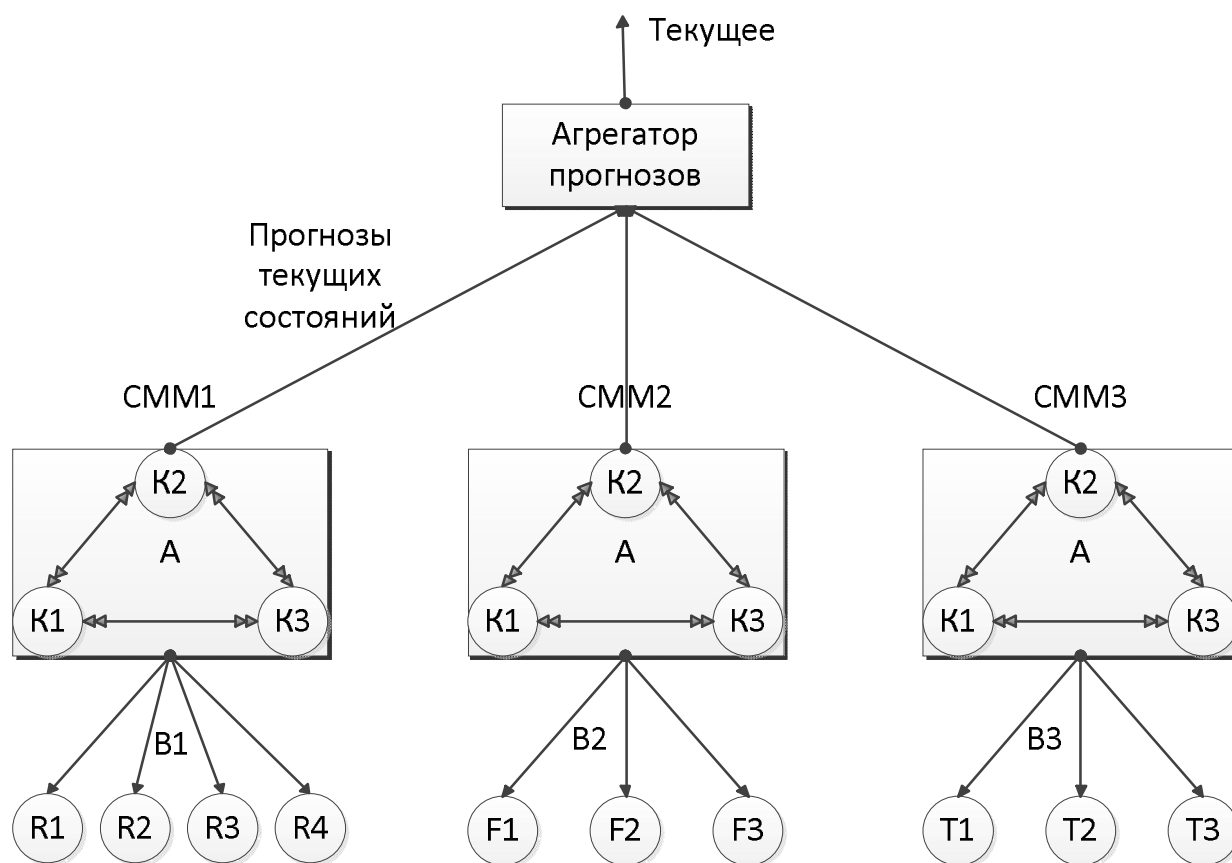


Рис. 2. Структура ансамбля моделей для коррекции индивидуальной стратегии обучения

Fig. 2. The structure of an ensemble of models for correcting an individual learning strategy

Для нахождения неизвестных параметров модели часто применяется алгоритм Баума-Велша [23,24]. Основная часть алгоритма заключается в последовательных процедурах подсчёта ожидания данных при условии модели и изменения модели при условии данных. По сути, этот алгоритм является частным случаем алгоритма ожидания-максимизации (*Expectation-Maximization*). Начальные значения λ задаются случайным образом. В алгоритме используют-

ся значения вероятности получения заданной наблюдаемой последовательности Y из заданного начального состояния i (всего N состояний) в момент времени t (6) и вероятности получения заданной наблюдаемой последовательности Y к моменту времени T при условии начального состояния i в момент времени t (7). Также используются оценки вероятности состояния i в момент времени t (8) и вероятности перехода из состояния i в состояние j в момент времени t (9).

$$\alpha_i(1)=\pi_i*b_i(Y_1);\alpha_i(t+1)=$$

$$=b_j(Y_{t+1})\sum_{i=1}^N(\alpha_i(t)*a_{i,j}). \quad (6)$$

$$\beta_i(1)=1;\beta_i(t)=$$

$$=\sum_{j=1}^N(\beta_j(t+1)*a_{i,j}*b_j(Y_{t+1})). \quad (7)$$

$$\gamma_i(t)=\frac{\alpha_i(t)*\beta_i(t)}{\sum_{j=1}^N(\alpha_j(t)*\beta_j(t))}. \quad (8)$$

$$\varphi_{i,j}(t)=\frac{\alpha_i(t)*a_{i,j}*\beta_j(t+1)*b_j(Y_{t+1})}{\sum_{i=1}^N\sum_{j=1}^N\alpha_i(t)*a_{i,j}*\beta_j(t+1)*b_j(Y_{t+1})}. \quad (9)$$

Для пересчёта параметров модели на очередной итерации используются следующие формулы:

$$\pi_i=\gamma_i(1), \quad (10)$$

$$a_{i,j}=\frac{\sum_{t=1}^{T-1}\varphi_{i,j}(t)}{\sum_{t=1}^{T-1}\gamma_i(t)}, \quad (11)$$

$$b_i(k)=\frac{\sum_{t=1}^T\delta(Y_t,Y_k)*\gamma_i(t)}{\sum_{t=1}^T\gamma_i(t)}, \quad (12)$$

где δ – символ Кронекера, результат которого равен единице, если аргументы равны, и ноль – в противном случае; Y – вектор возможных наблюдаемых значений; k – индекс наблюдаемого значения.

Обучение скрытой марковской модели может осуществляться с использованием различных инструментальных средств. В рамках настоящего исследования для экспериментального построения и обучения модели была выбрана библиотека *hmmlearn* версии 0.3.3, разработанная для языка программирования *Python* версии 3.10 – высокоуровневого интерпретируемого языка, широко применяемого в области машинного обучения [25]. Библиотека *hmmlearn* предоставляет широкий спектр модулей, предназначенных для реализации алгоритмов машинного обучения моделей СММ [26].

Для тестового обучения модели использовались два набора данных. Массив реальных данных, собранный в процессе преподавания учебного онлайн курса «Технологии разработки интернет ресурсов» для студентов направления подготовки 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» в Пензенском государственном университете автором И.П. Бурукиной. Массив включает 48942 последовательности, зафиксированные в течение двух лет преподавания среди 526 учащихся на платформе Moodle. Дополнительно был использован массив «*student-semester-result*» из репозитория *Kaggle*, состоящий из 18052 последовательностей, и отражающих, так же как в первом случае, оценочные показатели промежуточного контроля, активность учащихся при обращении к учебному контенту и продолжительность сессий на цифровой образовательной платформе. Наборы данных решено было разделить на обучающую и валидационную выборки в пропорции 9 к 1.

Разработанная на языке *Python* программа реализует процедуру обучения 10000 моделей для каждого набора входных данных, начиная с произвольно инициализированных начальных распределений и матриц вероятностей. Пример произвольных начальных матриц представлен формулами (13), (14), (15). Каждая модель проходит процесс обучения, состоящий из 15 итераций, при этом алгоритм останавливается досрочно, если прирост логарифма правдоподобия становится меньше заданного порога в

0.01. Для демонстрации процесса сходимости приведены примеры матриц перехода на различных этапах итерации (формулы (16), (17), (18)). По окончании процедуры обучения осуществляется отбор оптимальной модели путем оценки ее производительности на предварительно выделенной валидационной

выборке. Оптимальность определяется максимальным значением логарифмического правдоподобия среди всех обученных моделей, результаты которого зафиксированы в табл.2. Согласно представленным данным, наилучшие характеристики демонстрирует первая модель.

Таблица 2. Таблица значений логарифмического правдоподобия

Table 2. Table of log-likelihood values

Модель / Model	Информационный критерий Акаике / Akaike Information Criterion	Логарифмическое правдоподобие / Log-likelihood
1. Результаты промежуточного тестирования	34.83	0.36
2. Частота обращений к учебно-методическим материалам	30.34	-1.1
3. Продолжительность сеансов на платформе	29.4	-0.74

Матрица вероятностей переходов между состояниями обученной модели имеет следующий вид (19). Матрицы вероятностей выдачи значений приведены в формулах (20), (21), (22).

$$\begin{pmatrix} 0.359 & 0.476 & 0.165 \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{pmatrix} 0.1 & 0.67 & 0.22 \\ 0.004 & 0.006 & 0.99 \\ 0.97 & 0.02 & 0.01 \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{pmatrix} 0.228 & 0.297 & 0.25 & 0.226 \\ 0.177 & 0.269 & 0.182 & 0.372 \\ 0.361 & 0.144 & 0.297 & 0.198 \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{pmatrix} 0.114 & 0.658 & 0.227 \\ 0.004 & 0.006 & 0.99 \\ 0.978 & 0.021 & 0.001 \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{pmatrix} 0.113 & 0.660 & 0.225 \\ 0.004 & 0.006 & 0.99 \\ 0.979 & 0.020 & 0.001 \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{pmatrix} 0.116 & 0.662 & 0.221 \\ 0.004 & 0.006 & 0.99 \\ 0.979 & 0.020 & 0.001 \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$A = \begin{pmatrix} 0.8 & 0.199 & 0.001 \\ 0.095 & 0.722 & 0.183 \\ 0.114 & 0.048 & 0.838 \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$B1 = \begin{pmatrix} 0.001 & 0.094 & 0.804 & 0.101 \\ 0.002 & 0.773 & 0.224 & 0.001 \\ 0.362 & 0.597 & 0.040 & 0.001 \end{pmatrix} \quad (20)$$

$$B2 = \begin{pmatrix} 0.737 & 0.26 & 0.003 \\ 0.014 & 0.942 & 0.044 \\ 0.006 & 0.546 & 0.448 \end{pmatrix} \quad (21)$$

$$B3 = \begin{pmatrix} 0.003 & 0.663 & 0.334 \\ 0.033 & 0.941 & 0.026 \\ 0.773 & 0.219 & 0.008 \end{pmatrix} \quad (22)$$

Из значений матрицы A можно определить следующее: крайне мала вероятность перехода из скрытого состоя-

ния $K1$ в $K3$ (0.001); вероятность перехода из $K2$ в $K1$ значительно меньше, чем в $K3$; высока вероятность остаться в текущем скрытом состоянии. Из значений матрицы $B1$ видно, что если обучающийся находится в скрытом состоянии $K1$ (первая строка), то он имеет очень высокую вероятность получить оценки «отлично» и «хорошо» (4-ый и 3-ий столбец соответственно). Если обучающийся находится в состоянии $K2$ (вторая строка), он с большей вероятностью получит оценки «удовлетворительно» (2-ой столбец) и «хорошо» (3-ий столбец). В состоянии $K3$ (третья строка) – «неудовлетворительно» (1-ый столбец) и «удовлетворительно» (2-ой столбец). Значения матрицы $B2$ показывают, что при скрытом состоянии $K1$ обучающиеся не слишком часто обращаются к материалам, возможно, из-за

более быстрого понимания материала. Из значений матрицы $B3$ можно понять, что чем больше времени обучающийся провёл на цифровой образовательной платформе – тем выше будет его категория (от $K3$ до $K1$). В целом можно заключить, что полученные значения матриц адекватно отражают действительность.

Для проверки работоспособности модели был составлен ряд запросов в виде последовательностей результатов промежуточного контроля, количества обращений к учебному контенту и времени сессий на платформе. Запросы и результаты представлены на рис. 3. Наблюдаемые значения результатов промежуточного контроля представлены в форме: $R1 - 0$, $R2 - 1$, $R3 - 2$, $R4 - 3$; значения из остальных наборов наблюдаемых значений – от 0 до 2; предсказанные ансамблем модели состояния: $K1$, $K2$, $K3$.

```
ensemble.get_result([[2,1,2,2,1,2,2,1,0]], [[1,2,1,1,1,0,1,2,2]],\
                    [[1,2,1,1,1,0,0,1,2]])
'K3'
ensemble.get_result([[3,2,3,2,2,3,3,1,2]], [[1,2,1,1,0,0,1,1,2]],\
                    [[1,2,1,0,1,0,1,2,1]])
'K1'
ensemble.get_result([[3,2,3,2,2,3,2,1,1]], [[1,2,1,1,0,0,1,1,2]],\
                    [[1,2,1,0,1,0,1,2,1]])
'K2'
ensemble.get_result([[2,0,2,0,2,0,2,0,2]], [[1,2,1,1,2,1,1,2,1]],\
                    [[1,2,1,1,1,0,0,1,2]])
'K1'
ensemble.get_result([[0,2,0,2,0,2,0,2,0]], [[2,1,2,1,2,1,2,1,2]],\
                    [[1,2,1,1,1,0,0,1,2]])
'K3'
```

Рис. 3. Предсказания состояний модели

Fig. 3. Predictions of model states

Анализ представленных данных (рис. 3) демонстрирует способность модели эффективно реагировать на изме-

нения результатов промежуточных оценочных мероприятий учащихся и уровня их активности на цифровой образо-

вательной платформе. При регулярном появлении наблюдаемых значений *R3* («хорошо») и *R2* («удовлетворительно»), особенно если данные показатели совмещены с показателями активности – учащийся обращается к учебно методическим материалам, выполняет практические задания, участвует в форумах и т.д., наблюдается переход в состояние *K2* (требуется дополнительные учебные материалы). Если же, несмотря на значительную активность учащегося, отмечается последовательное ухудшение академической успеваемости от уровня *R2* до *R1* («неудовлетворительно»), диагностируется более критическое состояние *K3*. Для устранения такой ситуации необходимо проведение радикальных мер коррекции стратегии обучения, включающие предоставление дополнительных учебных материалов и обязательную консультацию с преподавателем. При преобладании высоких показателей *R4* («отлично») и *R3* («хорошо») система остается в стабильном состоянии *K1*, которое свидетельствует об отсутствии трудностей у учащегося при обучении, материал ему ясен и понятен, все задания студент выполняет, потребности во вмешательстве и дополнительном контроле нет.

Отдельного внимания заслуживают случаи циклических колебаний между независимыми показателями *R3* («хорошо») и *R2* («удовлетворительно»), сопровождающиеся низким уровнем участия обучающегося в изучении базовых учебно-методических ресурсов и редким по-

сещением электронной среды обучения. Такая динамика расценивается моделью как сигнал перехода в состояние *K3*, подчеркивая важность своевременного выявления низкой вовлеченности учащегося и инициирования комплексного подхода к исправлению ситуации посредством сочетания обязательной консультации с преподавателем, а после предоставления дополнительных материалов. Подчеркнем, что предлагать дополнительную литературу без проведения консультаций неэффективно, поскольку учащийся проявляет пассивность в освоении основного учебного материала.

В двух последних запросах проверялось поведение модели на неординарных входных последовательностях: чередовании оценок «неудовлетворительно» и «хорошо». На эти запросы модель ответила в соответствии с последней оценкой: если «неудовлетворительно» – то *K3* (требуется комплексные меры), если «хорошо» – то *K1* (мер не требуется). Однако, в любом случае, такие последовательности могут свидетельствовать о нечестном прохождении некоторых тестирований и, следовательно, о непонимании материала и требуют комплексных мер. Скорее всего, модель ответила не вполне корректно на один из запросов из-за очень малого количества подобных неординарных последовательностей в обучающем наборе данных.

Эффективность разработанной модели оценивалась путем сравнения академической успеваемости эксперимен-

тальной группы, проходившей дистанционное обучение с применением *СММ*, и контрольной группы, обучавшейся онлайн по той же дисциплине традиционным способом. Исследование проводилось среди студентов Пензенского государственного университета направления подготовки бакалавров 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника». Чтобы обеспечить высокий уровень надежности и валидности результатов эксперимента, предварительно было выполнено статистическое обоснование объема выборки [27], определившее минимальную численность каждой группы – 22

участника. Для равномерного распределения студентов между двумя группами, перед началом обучения они прошли процедуру предварительного электронного тестирования, предназначенного для объективной оценки исходного уровня знаний каждого учащегося. Полученные данные подверглись однофакторному дисперсионному анализу, подтвердившему (высокое значение показателя *F*-статистики (9.2656) при низком значении вероятности *p*-value (0.0001)) положительное влияние использования *СММ* на повышение уровня академической успеваемости учащихся, что видно из табл. 3.

Таблица 3. Результаты однофакторного дисперсионного анализа

Table 3. The results of a one-way analysis of variance

Источник изменчивости / Source of Variability	Сумма квадратов (SS) / Sum of Squares (SS)	Степень свободы (DF) / Degrees of Freedom (DF)	Средние квадраты (MS) / Mean Squares (MS)	F	p-value
Между группами	626.087	1	626.087	9.2656	0.0001
Внутри групп	1486.5652	43	33.7856		
Всего	2112.6522	44			

Таким образом, разработанная скрытая марковская модель обеспечивает надежную идентификацию текущего образовательного статуса учащегося на основании динамического анализа результатов промежуточных контрольных испытаний и показателей активности, позволяя своевременно определить наиболее целесообразные меры требуемой коррекции в индивидуальной стратегии обучения.

Выводы

В настоящей работе предложен подход к формированию индивидуальных образовательных траекторий на основе скрытых марковских моделей, применяемых в системах онлайн обучения. Полученные результаты подтверждают возможность существенного улучшения качества образования благодаря точной оценке текущего состояния учащегося и

гибкому подбору материалов для изучения или иной формы взаимодействия.

Выявленные преимущества включают:

- повышение вовлеченности учащихся за счет особенностей восприятия учебного материала;
- увеличение скорости освоения новых компетенций путем оптимизации последовательности подачи учебного материала;
- возможность автоматизации процессов мониторинга прогресса учащихся

ся и рекомендаций по дальнейшим этапам обучения.

Настоящее исследование представляет интерес для специалистов, занятых вопросами совершенствования технологий дистанционного обучения, а также разработчиков электронных образовательных платформ, стремящихся интегрировать соответствующие аналитические модели в свои системы с целью оптимизации деятельности преподавателей и повышения эффективности учебного процесса.

Список литературы

1. Li D., Xing W. A comparative study on sustainable development of online education platforms at home and abroad since the twenty-first century based on big data analysis // *Education and Information Technologies*. 2025. P. 1-22. <https://doi.org/10.1007/s10639-025-13400-3>.
2. Бурукина И.П. LX Design в разработке онлайн курсов: принципы, методы и практика // *Педагогическая информатика*. 2025. № 1. С. 117-123.
3. Rajabalee Y.B., Santally M.I. Learner satisfaction, engagement and performances in an online module: Implications for institutional e-learning policy analysis // *Education and Information Technologies*. 2021. №3. P. 2623-2656. <https://doi.org/10.1007/s10639-020-10375-1>.
4. Kedia P., Mishra L. Exploring the factors influencing the effectiveness of online learning: a study on college students // *Social Sciences & Humanities Open*. 2023. №1. P. 100559. <https://doi.org/10.1016/J.SSAHO.2023.100559>.
5. Lalitha T.B., Sreeja P.S. Personalised self-directed learning recommendation system // *Procedia Computer Science*. 2020. Vol.171. P. 583-592. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.063>.
6. Alper A., Okyay S., Nihat A. Hybrid course recommendation system design for a real-time student automation application // *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*. 2021. T.26. P. 85-90. <https://doi.org/10.31590/ejosat.944596>.
7. Когнитивные технологии в принятии управленческих решений / С.П. Серегин, А.Р. Федорова, Ю.А. Халин, А.И. Катыхин // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2024; 28(4): 57-66. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-4-57-66>.
8. Thaipisutikul T., Shih T.K., Enkhbat A., Aditya W. Exploiting long- and short-term preferences for deep context-aware recommendations // *IEEE Transactions on Computational Social Systems*. 2021. Vol. 9, №4. P. 1237-1248.

9. Лапенко М.В., Макеева В.В. Формирование индивидуальной траектории обучения в информационно-образовательной среде школы // Педагогическое образование в России. 2016. №7. С. 37-43.
10. Троицкая Е.А. Психологическая устойчивость и субъективное благополучие личности как ресурсы для проявления эмпатии // Вестник Московского государственного лингвистического университета. 2014. №. 7. С. 46-59.
11. Васильченко С. Х. Функциональные особенности формирования персональной образовательной среды как средства индивидуализации обучения на основе информационных технологий // Информатика и образование. 2010. №. 12. С. 104-108.
12. Wang S., Wang F., Zhu Z. Artificial intelligence in education: A systematic literature review // Expert Systems with Applications. 2024. P. 124-167. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124167>.
13. Подколзин М.М. Интеллектуальная система адаптивного обучения на основе нейронных сетей для персонализации образовательных траекторий студентов российских вузов // Информатика и образование. 2024. 39(6). С. 65–81. <https://doi.org/10.32517/0234-0453-2024-39-6-65-81>.
14. Варнухов А.Ю. Скрытая марковская модель: метод построения модели бизнес-процесса // Бизнес-информатика. 2024. Т. 18, №. 3. С. 41-55. DOI: 10.17323/2587-814X.2024.3.41.55.
15. Земсков А.В. Аналитический подход к исследованию неоднородных марковских цепей с кусочно-постоянными изменениями переходных вероятностей // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2024. Т. 67, №. 8. С. 657-669. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2024-67-8-657-669>
16. Ravari A., Ghoreishi S.F., Imani M. Optimal inference of hidden Markov models through expert-acquired data // IEEE Transactions on Artificial Intelligence. 2024. Vol. 5, № 8. P. 3985-4000. <https://doi.org/10.1109/TAI.2024.3358261>.
17. Pan W. Research on pig sound recognition based on deep neural network and hidden Markov models // Sensors. 2024. Vol. 24, № 4. P. 1269. <https://doi.org/10.3390/s24041269>
18. Jithendar T.R., Devi M.T., Saritha G. Determination of viterbi path for 3 hidden and 5 observable states using hidden Markov model // Reliability: Theory & Applications. 2024. Vol. 19, №. 2 (78). P. 509-515.
19. Zhu K. Physics-informed hidden markov model for tool wear monitoring // Journal of Manufacturing Systems. 2024. Vol. 72. P. 308-322. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.11.003>.
20. Харин Ю.С. Критерий отношения правдоподобия проверки сложных гипотез s-мерной равномерности двоичных последовательностей //Вероятностные методы в дискретной математике. 2024. Т. 1. С. 122.
21. Wong Z.Y. et al. Student engagement and its association with academic achievement and subjective well-being: A systematic review and meta-analysis // Journal of Educational Psychology. 2024. №. 1. P. 48–75. <https://doi.org/10.1037/edu0000833>.

22. Zhao J. et al. Choosing the number of factors in factor analysis with incomplete data via a novel hierarchical Bayesian information criterion // *Advances in Data Analysis and Classification*. 2024. P. 1-27. <https://doi.org/10.1007/s11634-024-00582-w>.
23. Yang F., Balakrishnan S., Wainwright M.J. Statistical and computational guarantees for the Baum-Welch algorithm // *Journal of Machine Learning Research*. 2017. Vol. 18, № 125. P. 1-53.
24. Wang C., Li K., He X. Network risk assessment based on Baum Welch algorithm and HMM // *Mobile Networks and Applications*. 2021. Vol. 26, №. 4. P. 1630-1637. <https://doi.org/10.1007/s11036-019-01500-7>.
25. Anderson K.S. Python: 2023 project update // *Journal of Open Source Software*. 2023. Vol. 8, №. 92. P. 5994.
26. Библиотеки python для начинающих / В.В. Сааков, Л.Х. Кучмезова, А.А. Дзамихова, З.Х. Шауцева // Молодой учёный: сборник статей III Международной научно-практической конференции. Пенза, 2023. С. 19-21.
27. Сальников А.В. Верификация и валидация компьютерных моделей // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2022. №. 9 (750). С. 100-115. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-9-100-115>.

References

1. Li D., Xing W. A comparative study on sustainable development of online education platforms at home and abroad since the twenty-first century based on big data analysis. *Education and Information Technologies*. 2025. P. 1-22. <https://doi.org/10.1007/s10639-025-13400-3>.
2. Burukina I.P. LX Design in the development of online courses: principles, methods and practice. *Pedagogicheskaya informatika = Pedagogical informatics*. 2025; (1): 117-123. (In Russ.).
3. Rajabalee Y.B., Santally M.I. Learner satisfaction, engagement and performances in an online module: Implications for institutional e-learning policy analysis. *Education and Information Technologies*. 2021; (3): 2623-2656. <https://doi.org/10.1007/s10639-020-10375-1>.
4. Kedia P., Mishra L. Exploring the factors influencing the effectiveness of online learning: a study on college students. *Social Sciences & Humanities Open*. 2023; (1): 100559. <https://doi.org/10.1016/J.SSAHO.2023.100559>.
5. Lalitha T.B., Sreeja P.S. Personalised self-directed learning recommendation system. *Procedia Computer Science*. 2020; 171: 583-592. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.063>.
6. Alper A., Okyay S., Nihat A. Hybrid course recommendation system design for a real-time student automation application. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*. 2021; 26: 85-90. <https://doi.org/10.31590/ejosat.944596>.
7. Seregin S. P., Fedorov A. R., Khalin Y. A., Katykhin A. I. Cognitive technologies in management decision-making. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta =*

Proceedings of the Southwest State University. 2024; 28(4): 57-66 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-4-57-66>.

8. Thaipisutikul T., Shih T.K., Enkhbat A., Aditya W. Exploiting long- and short-term preferences for deep context-aware recommendations. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*. 2021; 9(4): 1237-1248.

9. Lapenok M.V., Makeeva V.V. Formation of an individual learning trajectory in the information and educational environment of the school. *Pedagogicheskoe obrazovanie v Rossii = Pedagogical education in Russia*. 2016; (7): 37-43. (In Russ.)

10. Troitskaya E.A. Psychological stability and subjective well-being of an individual as resources for the manifestation of empathy. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo lingvisticheskogo universiteta = Bulletin of the Moscow State Linguistic University*. 2014; (7): 46-59. (In Russ.)

11. Vasilchenko S.Kh. Functional features of the formation of a personal educational environment as a means of individualization of learning based on information technology. *Informatika i obrazovanie = Computer Science and Education*. 2010; (12): 104-108. (In Russ.)

12. Wang S., Wang F., Zhu Z. Artificial intelligence in education: A systematic literature review. *Expert Systems with Applications*. 2024. P. 124-167. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124167>.

13. Podkolzin M.M. Intelligent adaptive learning system based on neural networks for personalization of educational trajectories of students of Russian universities. *Informatika i obrazovanie = Computer Science and Education*. 2024; (39): 65–81. (In Russ.). <https://doi.org/10.32517/0234-0453-2024-39-6-65-81>.

14. Varnukhov A.Yu. Hidden Markov Model: Method for Constructing a Business Process Model. *Biznes-informatika = Business Informatics*. 2024; 18(3): 41–55. (In Russ.). <https://10.17323/2587-814X.2024.3.41.55>.

15. Zemskov A.V. Analytical approach to the study of non-homogeneous Markov chains with piecewise constant changes in transition probabilities. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priboroostroenie = Bulletin of higher educational institutions. Instrument engineering*. 2024; 67(8): 657-669. (In Russ.). <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2024-67-8-657-669>.

16. Ravari A., Ghoreishi S.F., Imani M. Optimal inference of hidden Markov models through expert-acquired data. *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*. 2024; 5 (8): 3985-4000. <https://doi.org/10.1109/TAI.2024.3358261>.

17. Pan W. Research on pig sound recognition based on deep neural network and hidden Markov models. *Sensors*. 2024; 24(4): 1269. <https://doi.org/10.3390/s24041269>

18. Jithendar T.R., Devi M.T., Saritha G. Determination of viterbi path for 3 hidden and 5 observable states using hidden Markov model. *Reliability: Theory & Applications*. 2024; 19(2): 509-515.

19. Zhu K. Physics-informed hidden markov model for tool wear monitoring. *Journal of Manufacturing Systems*. 2024; 72: 308-322. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.11.003>.
20. Kharin Yu.S. Likelihood ratio criterion for testing complex hypotheses of s-dimensional uniformity of binary sequences. *Veroyatnostnye metody v diskretnoi matematike = Probabilistic methods in discrete mathematics*. 2024; 1: 122. (In Russ.).
21. Wong Z.Y., et al. Student engagement and its association with academic achievement and subjective well-being: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Educational Psychology*. 2024; (1): 48–75. <https://doi.org/10.1037/edu0000833>.
22. Zhao J., et al. Choosing the number of factors in factor analysis with incomplete data via a novel hierarchical Bayesian information criterion. *Advances in Data Analysis and Classification*. 2024: 1-27. <https://doi.org/10.1007/s11634-024-00582-w>.
23. Yang F., Balakrishnan S., Wainwright M.J. Statistical and computational guarantees for the Baum-Welch algorithm. *Journal of Machine Learning Research*. 2017; 18 (125): 1-53.
24. Wang C., Li K., He X. Network risk assessment based on Baum Welch algorithm and HMM. *Mobile Networks and Applications*. 2021; 26 (4): 1630-1637. <https://doi.org/10.1007/s11036-019-01500-7>.
25. Anderson K.S. Python: 2023 project update. *Journal of Open Source Software*. 2023; 8 (92): 5994 p.
26. Saakov V.V., Kuchmezova L.Kh., Dзамikhova A.A., Shaushcheva Z.Kh. Python libraries for beginners. In: *Molodoi uchenyi: sbornik statei III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Young scientist: collection of articles of the III International Scientific and Practical Conference*. Penza, 2023. P. 19-21. (In Russ.).
27. Salnikov A.V. Verification and validation of computer models. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroyeniye = News of higher educational institutions. Mechanical engineering*. 2022; (9): 100-115. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-9-100-115>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Бурукина Ирина Петровна, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой "Системы автоматизированного проектирования", Пензенский государственный университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: burukinairina@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0009-0006-1953-2914>

Irina P. Burukina, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Computer-Aided Design Systems Department, Penza State University, Penza, Russian Federation, e-mail: burukinairina@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0009-0006-1953-2914>

Горшенин Лев Николаевич, аспирант, Пензенский государственный университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: burukinairina@gmail.com

Lev N. Gorshenin, Post-Graduate Student, Penza State University, Penza, Russian Federation, e-mail: burukinairina@gmail.com

УДК 004.93

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-130-145>

Повышение скорости вейвлет-обработки изображений на основе метода Винограда с учетом децимации

П. А. Ляхов ¹ ✉

¹ Северо-Кавказский федеральный университет
ул. Пушкина, д. 1, г. Ставрополь 355017, Российская Федерация

✉ e-mail: ljahov@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Вейвлет-преобразование находит широкое применение при решении широкого круга задач цифровой обработки изображений в различных прикладных и научно-технических областях. В то же время, современные системы обработки визуальной информации сталкиваются с проблемой недостаточной производительности на фоне стремительного увеличения объёмов цифровых данных. Указанное обстоятельство требует разработки вычислительно эффективных алгоритмов вейвлет-обработки, пригодных для реализации в составе современных вычислительных устройств. Данное исследование направлено на снижение вычислительной сложности выполнения вейвлет обработки изображений на основе использования модификации метода Винограда. В статье предлагается применение нового подхода для организации вычислений при одномерной фильтрации с децимацией.

Методы. В исследовании применялся метод организации вычислений на основе преобразования Винограда и аппаратное моделирование на программируемой вентильной матрице в среде Xilinx Vivado 2018.2 с использованием языка Verilog для семейства Virtex 7 модель «xc7vx485tffg1157-1», с применением стандартных параметров синтеза и реализации: «Vivado Synthesis Defaults» и «Vivado Implementation Defaults» соответственно.

Результаты. Экспериментальное моделирование вейвлет-преобразования продемонстрировало, что применение метода Винограда в задачах вейвлет-обработки изображений позволяет снизить вычислительную задержку на 34-63 % по сравнению с прямым методом при использовании вейвлетов четвёртого порядка и на 39-66 % при использовании вейвлетов шестого порядка.

Заключение. Применение метода Винограда обеспечивает существенное увеличение скорости вычислений при некотором росте аппаратной сложности и энергопотребления. Результаты исследования могут найти широкое применение в современных системах обработки сигналов, изображений и видео, а также при разработке систем машинного обучения.

Ключевые слова: параллельные вычисления; цифровая обработка изображений; дискретное вейвлет-преобразование; метод Винограда; аппаратная реализация цифровых фильтров.

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

Для цитирования: Ляхов П. А. Повышение скорости вейвлет-обработки изображений на основе метода Винограда с учетом децимации // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(2): 130-145. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-130-145>.

Поступила в редакцию 25.04.2025

Подписана в печать 03.06.2025

Опубликована 23.07.2025

Increasing the speed of wavelet image processing based on the Winograd method taking into account decimation

Pavel A. Lyakhov ¹ ✉

¹ North-Caucasus Federal University
1, Pushkin str., Stavropol 355017, Russian Federation

✉ e-mail: ljahov@mail.ru

Abstract

Purpose of research. Wavelet transform is widely used to solve a wide range of digital image processing problems in various applied and scientific and technical fields. At the same time, modern visual information processing systems face the problem of insufficient performance against the background of a rapid increase in digital data volumes. This circumstance requires the development of computationally efficient wavelet processing algorithms suitable for implementation in modern computing devices. This study is aimed at reducing the computational complexity of wavelet image processing based on the use of a modification of the Winograd method. The article proposes the use of a new approach to organizing calculations for one-dimensional filtering with decimation.

Methods. The study used a method for organizing calculations based on the Winograd transform and hardware simulation on a programmable valve matrix in Xilinx Vivado 2018.2 environment using Verilog language for Virtex 7 family model "xc7vx485tffg1157-1", using standard synthesis and implementation parameters: "Vivado Synthesis Defaults" and "Vivado Implementation Defaults", respectively.

Results. Experimental modeling of the wavelet transform has demonstrated that the application of the Winograd method in wavelet image processing tasks allows for a reduction the computational delay by 34-63% compared to the direct method when using fourth-order wavelets and by 39-66% when using sixth-order wavelets.

Conclusion. The application of the Winograd method provides a significant increase in the computation speed with some increase in hardware complexity and energy consumption. The results of the study can find wide application in modern signal, image and video processing systems, as well as in the development of machine learning systems.

Keywords: parallel computing; digital image processing; discrete wavelet transform; Winograd method; hardware implementation of digital filters.

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

For citation: Lyakhov P. A. Increasing the speed of wavelet image processing based on the Winograd method taking into account decimation // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(2): 130-145 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-130-145>.

Received 25.04.2025

Accepted 03.06.2025

Published 23.07.2025

Введение

В настоящее время вейвлет-преобразование активно применяется для решения широкого спектра задач в области

обработки изображений, включая подавление шумов [1], восстановление изображений [2], их анализ [3], а также обработку видеоданных [4]. На практике алго-

ритмы вейвлет-анализа обычно основаны на дискретном вейвлет-преобразовании посредством одномерной цифровой фильтрации [5], которая предполагает множественные операции свёртки, включающие повторяющиеся вычисления сложений и умножений, что влечет высокую вычислительную сложность преобразований [6, 7]. Экспоненциальный рост объёмов цифровой визуальной информации в настоящее время требует все более эффективной обработки, хранения и передачи. Современные системы обработки изображений испытывают сложности, связанные с недостаточной производительностью имеющихся вычислительных средств [8]. Одним из направлений повышения производительности вычислений является совершенствование методов и алгоритмов цифровой обработки сигналов и изображений [9]. Таким образом, актуальной является разработка различных подходов для снижения вычислительной сложности вейвлет-преобразований, включая использование различных специализированных аппаратных архитектур [10].

В настоящее время существуют некоторые подходы к разрешению проблемы недостаточной производительности алгоритмов вейвлет-обработки сигналов. В статье [11] представлен способ построения многомерных вейвлетов, обеспечивающий формирование неразделимых наборов вейвлет-фильтров на основе пары одномерных фильтров нижних частот. В предложенном подходе один из фильтров обладает интерполяционными

свойствами, что позволяет повысить эффективность обработки изображений за счёт увеличения скорости вычислений. Авторами работы [12] предложены оригинальные алгоритмы прямого и обратного дискретного вейвлет-преобразования сигналов в частотной области. Данные алгоритмы используют вейвлеты на основе производных функции Гаусса. Результаты моделирования в указанной работе продемонстрировали, что применение быстрого преобразования Фурье позволяет сократить время выполнения вейвлет-преобразования в 15000 раз по сравнению с методом прямого численного интегрирования для сигнала объёмом 32 768 отсчётов. Предложенные алгоритмы также применимы к вейвлетам с прямоугольной амплитудно-частотной характеристикой. В работе [13] предложены модификации алгоритмов цифровой обработки изображений на основе обобщённого метода Винограда. В монографии [14] описаны алгоритмы вейвлет-фильтрации для систем на кристалле, оптимизированные по использованию вычислительных ресурсов. Авторами [14] также представлены принципы вычислений вейвлет-коэффициентов с использованием базовых блоков, а также изложены способы реализации вейвлет-фильтров на основе дискретно-аналоговых вычислений. В работе [15] представлена архитектура усечённого умножителя с накопителем, а также преобразователей для выполнения вычислений по модулю (2^n+1) . Согласно результатам аппаратного моделирования, для 32-

разрядной реализации фильтра экономия аппаратных ресурсов достигает 32,5 %, однако при этом наблюдается увеличение задержки до 16,4 %. В статье [16] описаны алгоритмы цифровой фильтрации на основе метода Винограда, которые могут быть использованы в сверточных слоях нейронных сетей. Продемонстрировано преимущество в быстродействии разработки, по сравнению с быстрым преобразованием Фурье, при обработке больших массивов визуальной информации в задачах глубокого обучения. На основе подхода из работы [16] были разработаны архитектурные решения в исследовании [17] и проблемно-ориентированные аппаратные ускорители в работе [18], обеспечивающие реализацию алгоритмов машинного обучения и цифровой обработки изображений на основе метода Винограда.

Классическая формулировка метода Винограда ориентирована на вычисление групп соседних значений, в то время как при вейвлет-фильтрации используется операция децимации, заключающаяся в уменьшении частоты дискретизации. Данное обстоятельство требует адаптации и обобщения метода Винограда для задач с понижающей дискретизацией сигнала с коэффициентом 2, характерной для вейвлет-преобразований изображений.

Цель настоящего исследования заключается в снижении вычислительной задержки и повышении скорости обработки изображений при использовании вейвлет-фильтров на основе применения модифицированного метода Винограда

для высокоскоростной реализации одномерной фильтрации с децимацией.

Оставшаяся часть статьи организована следующим образом. В разделе 2 излагается предложенный метод реализации вейвлет-обработки изображений на основе метода Винограда. В разделе 3 представлена высокопроизводительная реализация дискретного вейвлет-преобразования с использованием указанных подходов. В заключении подводятся итоги работы.

Материалы и методы

А. Вейвлет-фильтрация прямым методом

Процесс обработки двумерного изображения при помощи вейвлет-фильтрации с децимацией по строкам в рамках прямого метода может быть описан следующей формулой:

$$I(i, j) = \sum_{k=1}^I J(i, 2j+1-k) WF(k), \quad (1)$$

где J – обрабатываемое двумерное изображение; I – результат вейвлет-обработки изображения; i – номер строки пикселей; j – номер столбца пикселей; WF – вейвлет-фильтр порядка k . Вейвлет-преобразование изображений прямым методом выполняется с использованием двух вычислительных каналов, соответствующих низкочастотному и высокочастотному вейвлетным фильтрам [19]. На рис. 1 изображена схема одномерной вейвлет-обработки прямым методом, где WF_L – низкочастотный вейвлет-фильтр; WF_H – высокочастотный фильтр; $J_L(i, j)$ и $J_H(i, j)$ – результаты обработки изображения, содержащие

низкочастотную и высокочастотную информацию об исходном изображении, соответственно.

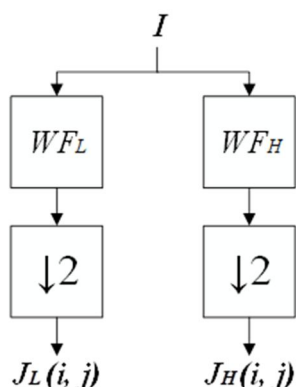


Рис. 1. Схема вейвлет-обработки изображения прямым методом с децимацией

Fig. 1. Scheme of wavelet filtering of a fragment of the original image by the direct method with decimation

При вейвлет-обработке прямым методом каждый пиксель изображения преобразуется с использованием пары вейвлет-фильтров порядка q , что требует выполнения $2q$ операций умножения и $2(q-1)$ операций сложения. Поскольку операции умножения характеризуются большей вычислительной сложностью по сравнению со сложениями, их реализация в цифровых фильтрах на современных вычислительных устройствах сопровождается значительными затратами ресурсов. Одним из ключевых альтернативных подходов к классическому прямому методу является метод Винограда, рассмотренный далее.

В. Цифровая фильтрация на основе метода Винограда

Метод Винограда позволяет уменьшить вычислительную сложность при об-

работке изображений за счёт одновременного получения нескольких пикселей обработанного изображения за счет использования матричных преобразований. Общая формула метода Винограда для одномерной фильтрации изображений может быть описана следующей формулой [20]:

$$J = M^T \left((B \times WF) \odot (N^T \times I) \right), \quad (2)$$

где J – фрагмент обработанного изображения размером $d \times 1$; WF – маска вейвлет-фильтра размером $q \times 1$; I – фрагмент исходного обрабатываемого изображения размером $a \times 1$, где $a = d + q - 1$; M^T , B , N^T – матрицы преобразования размерами $d \times a$, $a \times q$, $a \times a$, соответственно; $\odot$ – оператор поэлементного умножения матриц. Обозначение метода Винограда $K(a, q)$ указывает на размер a обрабатываемых фрагментов изображения и порядок q используемого вейвлета, от которых зависят размеры матриц преобразования и исходных фрагментов изображения. Так, метод Винограда со значением $K(4, 2)$ использует матрицы, построенные на точках $0, \pm 1, 2, \infty$:

$$M^T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 4 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 8 & 1 \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{6} \\ \frac{1}{6} & -\frac{1}{6} \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{3} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$N^T = \begin{pmatrix} 2 & -1 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & -2 & 3 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & -1 & -2 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Классическая форма метода Винограда предполагает обработку групп смежных пикселей. В то же время, вейвлет-фильтрация изображения осуществляется по двум вычислительным каналам с децимацией, что направлено на снижение частоты дискретизации и устранение избыточных вычислений. Это требует адаптации метода Винограда к более широкому классу задач, в том числе и для случаев, когда обрабатываемый фрагмент изображения может включать не только соседние, но и идущие не подряд пиксели.

С. Фильтрация методом Винограда с децимацией

Пусть $x_1, x_2, \dots, x_a, \dots, x_{a+q-1}$ являются значениями яркости пикселей некото-

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} d_1 \\ d_3 \\ d_5 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \\ x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 \\ x_5 & x_6 & x_7 & x_8 & x_9 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 q_1 + x_2 q_2 + x_3 q_3 + x_4 q_4 + x_5 q_5 \\ x_3 q_1 + x_4 q_2 + x_5 q_3 + x_6 q_4 + x_7 q_5 \\ x_5 q_1 + x_6 q_2 + x_7 q_3 + x_8 q_4 + x_9 q_5 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} x_1 q_1 + x_3 q_3 + x_5 q_5 \\ x_3 q_1 + x_5 q_3 + x_7 q_5 \\ x_5 q_1 + x_7 q_3 + x_9 q_5 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_2 q_2 + x_4 q_4 \\ x_4 q_2 + x_6 q_4 \\ x_6 q_2 + x_8 q_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 & x_3 & x_5 \\ x_3 & x_5 & x_7 \\ x_5 & x_7 & x_9 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} q_1 \\ q_3 \\ q_5 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_2 & x_4 \\ x_4 & x_6 \\ x_6 & x_8 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} q_2 \\ q_4 \end{pmatrix}. \quad (6) \end{aligned}$$

Полученные вычисления можно реализовать комбинацией метода Винограда $K(3,3)$ с применением значений яркости пикселей x_1, x_3, x_5, x_7, x_9 и коэффициентов фильтра q_1, q_3, q_5 , и $K(3,2)$ с применением значений яркости пиксе-

рого фрагмента строки исходного изображения I , а $q_1, q_2, \dots, q_q$ – коэффициенты вейвлет-фильтра WF . Тогда, вычисление значений $d_1, d_2, \dots, d_a$ фрагмента строки обработанного изображения J может быть описано в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dots \\ z_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_r \\ x_2 & x_3 & \dots & x_{r+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_a & x_{a+1} & \dots & x_{a+q-1} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \dots \\ q_q \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Рассмотрим фильтрацию методом Винограда на примере обработки фрагмента с 10 пикселями ($a+q-1=10$) при помощи фильтра 5-го порядка ($q=5$) с получением на выходе 6 значений ($a=6$) фрагмента обработанного изображения J :

$$\begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \\ d_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \\ x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 \\ x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 \\ x_4 & x_5 & x_6 & x_7 & x_8 \\ x_5 & x_6 & x_7 & x_8 & x_9 \\ x_6 & x_7 & x_8 & x_9 & x_{10} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

При вейвлет-фильтрации с децимацией вычисляются значения d_1, d_3, d_5 :

лей x_2, x_4, x_6, x_8 и коэффициентов фильтра q_2, q_4 . В данном случае, вместо метода $K(6,5)$, при вейвлет-фильтрации с децимацией можно использовать метод $K(3,5,2)=K(3,3)+K(3,2)$, где третье число в $K(3,5,2)$ означает степень

уменьшения частоты дискретизации. В общем случае, фильтрация при помощи метода Винограда $K(a, q, s)$ с уменьшением частоты дискретизации сигнала в s раз производится следующим образом:

$$K(a, q, s) = b_2 \times K(a, b_1 + 1) + (s - b_2) \times K(a, b_1), \quad (7)$$

где b_1 и b_2 – неполное частное и остаток от деления q на s , соответственно. Обозначение метода Винограда $K(a, q, s)$ содержит размер a обрабатываемых пикселей изображения, порядок q исполь-

зуемого вейвлетного фильтра и s шаг децимации.

Рассмотрим цифровую фильтрацию на основе метода Винограда с децимацией на примере обработки фрагмента, содержащего 14 ($a + q - 1 = 14$) пикселей фильтром 6-го порядка ($q = 6$), с получением на выходе 9 значений ($a = 9$) фрагмента обработанного изображения J . При $s = 3$ вычисляются значения d_1, d_4, d_7 следующим образом:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_4 \\ q_7 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 \\ x_4 & x_5 & x_6 & x_7 & x_8 & x_9 \\ x_7 & x_8 & x_9 & x_{10} & x_{11} & x_{12} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 q_1 + x_2 q_2 + x_3 q_3 + x_4 q_4 + x_5 q_5 + x_6 q_6 \\ x_4 q_1 + x_5 q_2 + x_6 q_3 + x_7 q_4 + x_8 q_5 + x_9 q_6 \\ x_7 q_1 + x_8 q_2 + x_9 q_3 + x_{10} q_4 + x_{11} q_5 + x_{12} q_6 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} x_1 q_1 + x_4 q_4 \\ x_4 q_1 + x_7 q_4 \\ x_7 q_1 + x_{10} q_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_2 q_2 + x_5 q_5 \\ x_5 q_2 + x_8 q_5 \\ x_8 q_2 + x_{11} q_5 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_3 q_3 + x_6 q_6 \\ x_6 q_3 + x_9 q_6 \\ x_9 q_3 + x_{12} q_6 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} x_1 & x_4 \\ x_4 & x_7 \\ x_7 & x_{10} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} q_1 \\ q_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_2 & x_5 \\ x_5 & x_8 \\ x_8 & x_{11} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} q_2 \\ q_5 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_3 & x_6 \\ x_6 & x_9 \\ x_9 & x_{12} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} q_3 \\ q_6 \end{pmatrix}. \quad (8) \end{aligned}$$

Полученные вычисления можно реализовать методом Винограда $K(3, 2)$ с использованием значений яркости пикселей x_1, x_4, x_7, x_{10} и коэффициентов фильтра q_1, q_4 ; для значений x_2, x_5, x_8, x_{11} и коэффициентов q_2, q_5 ; для значений x_3, x_6, x_9, x_{12} и коэффициентов q_3, q_6 . В данном случае вместо метода винограда $K(9, 6)$ при фильтрации с шагом 3 можно использовать метод $K(3, 6, 3) = 3K(3, 2)$. В частном случае, когда s делит q , формула (7) принимает следующий вид:

$$K(a, q, s) = s \times K(a, b_1). \quad (9)$$

В процессе вейвлет-обработки изображения с использованием метода Винограда $K(a, q, s)$ входные данные раз-

деляются на четные и нечетные группы отсчетов. При этом вычисления разбиваются на вычислительные каналы, соответствующие четным и нечетным отсчетам пикселей. Умножения матриц $B \times WF_L$ и $B \times WF_H$ для реализации метода Винограда выполняются однократно для каждого фильтра, и не требуют дополнительных вычислительных затрат при предварительной подготовке констант. Произведение $N^T \times I$ вычисляется до передачи обработки на два параллельных канала, поэтому оно выполняется одинаково для каждого вейвлетного фильтра. Указанное свойство позволяет сократить общее количество опе-

раций при дискретном вейвлет-преобразовании изображения, за счёт однократного вычисления величины $N^T \times I$, с последующей передачей результата по двум вычислительным каналам системы. Элементы матриц преобразований M^T и N^T известны заранее и состоят из нулей, степеней двоек, а также чисел, представленных в двоичном виде как комбинации единиц. Благодаря этому, умножения на элементы матриц M^T и N^T можно заменить на операции сдвига и сложения. Например, умножение на 9 (в двоичной форме 1001_2) можно реализовать смещением запятой этого числа

на три бита вправо, с последующим прибавлением к исходному числу. Таким образом, все вычисления по формуле (2) могут быть сведены к выполнению операций сложения, за исключением поэлементного умножения $\odot$, которое выполняется один раз для двух матриц размера $a \times 1$. На рис. 2 представлена предложенная схема вейвлет-обработки с децимацией по методу Винограда, где J_L и J_H обозначают фрагменты изображения, обработанные с применением вейвлет-фильтров WF_L и WF_H , соответственно.

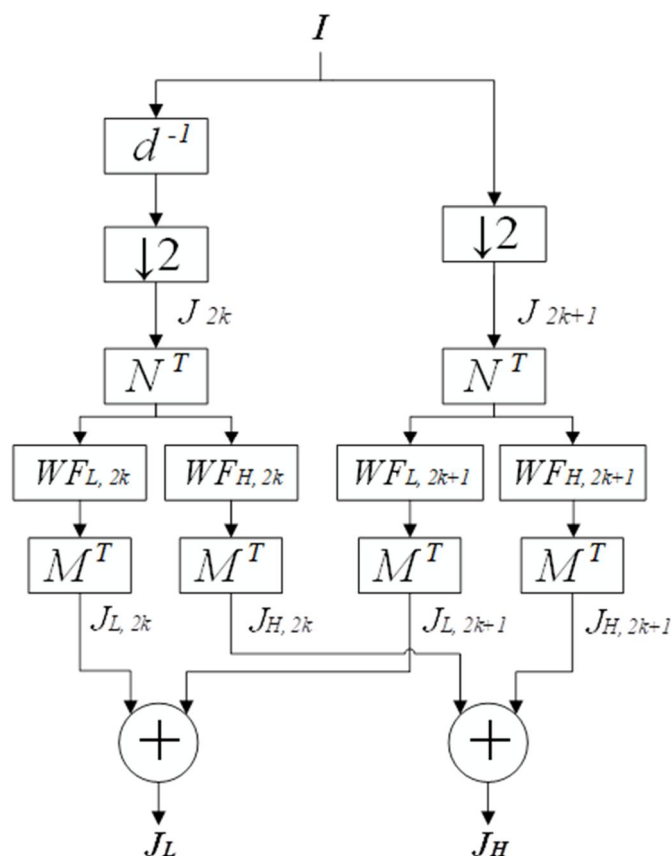


Рис. 2. Схема вейвлет-фильтрации фрагмента исходного изображения на основе метода Винограда с децимацией

Fig. 2. Scheme of wavelet filtering of a fragment of the original image based on the Winograd method with decimation

D. Эффективное представление данных по вычислительной сложности

Поскольку в цифровых устройствах данные представлены с ограниченной точностью, требуется квантование коэффициентов вейвлет-фильтров. В рамках экспериментов используются вейвлеты Добеши $db2$ и $db3$. При обработке 8-битных изображений коэффициенты фильтров задаются с точностью, определяемой согласно формуле [17]

$$f = 10 + \left\lfloor \sqrt{\frac{q}{4}} \right\rfloor, \quad (10)$$

где f – разрядность квантованных коэффициентов вейвлет-фильтров без учета знакового бита. Коэффициенты исходного фильтра K масштабируются на f бит и округляются к большему:

$$K^* = \lceil K \times 2^f \rceil, \quad (11)$$

где K^* – квантованный фильтр.

Возьмем в качестве примера исходных коэффициентов высокочастотного вейвлет-фильтра $db2$ следующие значения:

$$HD = \begin{pmatrix} \frac{-1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} & \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} & \frac{-3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} & \frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Согласно формуле (10) для рассматриваемого вейвлет-фильтра $f=11$. Квантование коэффициентов вейвлет-фильтра по формуле (11) можно представить в виде:

$$HD = (-699 \quad 1212 \quad -324 \quad -187). \quad (13)$$

После применения вейвлет-фильтрации с использованием метода Винограда полученные значения проходят обратное

масштабирование и округляются в меньшую сторону для компенсации погрешностей, вызванных округлением. Таким образом, ограниченная точность представления данных в памяти устройства не оказывает значительного влияния на качество вейвлет-обработки изображений.

В следующем разделе представлены результаты реализации обоих рассмотренных подходов к вейвлет-обработке на программируемой вентильной матрице, а также проведён анализ полученных данных.

Результаты и их обсуждение

Аппаратное моделирование и сравнение методов организации матричных вычислений при вейвлет-обработке двумерного 8-битного изображения с использованием прямого метода и метода Винограда с прореживанием в 2 раза выполнено на программируемой вентильной матрице (ППВМ) в среде Xilinx Vivado 2018.2. Реализация выполнена на языке Verilog для ППВМ из семейства Virtex 7 (модель xc7vx485tffg1157-1), с использованием стандартных параметров синтеза (Vivado Synthesis Defaults) и реализации (Vivado Implementation Defaults), соответственно. Использование указанных настроек параметров синтеза и реализации ППВМ «по умолчанию» обеспечивает воспроизводимость результатов эксперимента. Для реализации операций сложения и умножения применялись деревья Уоллеса с последующим сложением при помощи сумматоров с сохранением переноса (CSA) и сумматоров Когге-Стоуна (KSA). Проектирова-

ние указанных деревьев CSA и KSA осуществлялось стандартными алгоритмами, описанными в [21]. Использование данных типов сумматоров позволяет минимизировать временные затраты на вычисления. Входными данными служили 8-битные пиксели исходного изображения. Для моделирования были выбраны вейвлеты Добеши 4-го и 6-го порядков, коэффициенты фильтров которых были квантованы до 11 бит, в соответствии с формулами (10)-(11). Результатом обработки являлись 8-битные пиксели выходного изображения. Поскольку метод Винограда генерирует несколько выходных пикселей за одну итерацию, для корректного сравнения все методы оценивались по средним затратам ресурсов на обработку одного

пикселя. Численные результаты моделирования приведены в табл. 1, а графики на рис. 3-4 демонстрируют временные затраты, а также произведение «площадь-задержка».

Результаты экспериментального моделирования продемонстрировали, что время вычислений при вейвлет-преобразовании изображений на основе метода Винограда (по сравнению с прямым методом) уменьшается на 34-63%, при использовании вейвлет-фильтров 4 порядка, и на 39-66%, при использовании вейвлет-фильтров 6 порядка. При этом, наилучшая эффективность произведения «площадь-задержка» достигается при использовании метода Винограда $K(3,4,2)$ для вейвлет-фильтра 4 порядка и $K(5,6,2)$ для вейвлетного фильтра 6 порядка.

Таблица 1. Численные результаты моделирования устройства вейвлет-обработки изображений с использованием различных методов организации вычислений, с усредненными значениями по каждому пикселю

Table 1. Numerical results of modeling a wavelet image processing device using various methods of organizing calculations, with averaged values for each pixel

Порядок вейвлет-фильтра / The order of the wavelet filter	Метод вычислений / Calculation method	Количество пикселей фрагмента обработанного изображения / Number of pixels of the processed image fragment	Задержка устройства, нс / Device delay, ns	Произведение площади и задержки устройства / Product of area and device delay
4	Прямой	1	14,815	9140,86
	$K(2,4,2)$	2	9,732	6739,07
	$K(3,4,2)$	3	7,263	6311,55
	$K(4,4,2)$	4	6,908	7275,85
	$K(5,4,2)$	5	5,415	6525,92
6	Прямой	1	16,730	15107,19
	$K(2,6,2)$	2	10,222	9368,01
	$K(3,6,2)$	3	7,786	8268,73
	$K(4,6,2)$	4	6,747	7931,10
	$K(5,6,2)$	5	5,706	6419,03

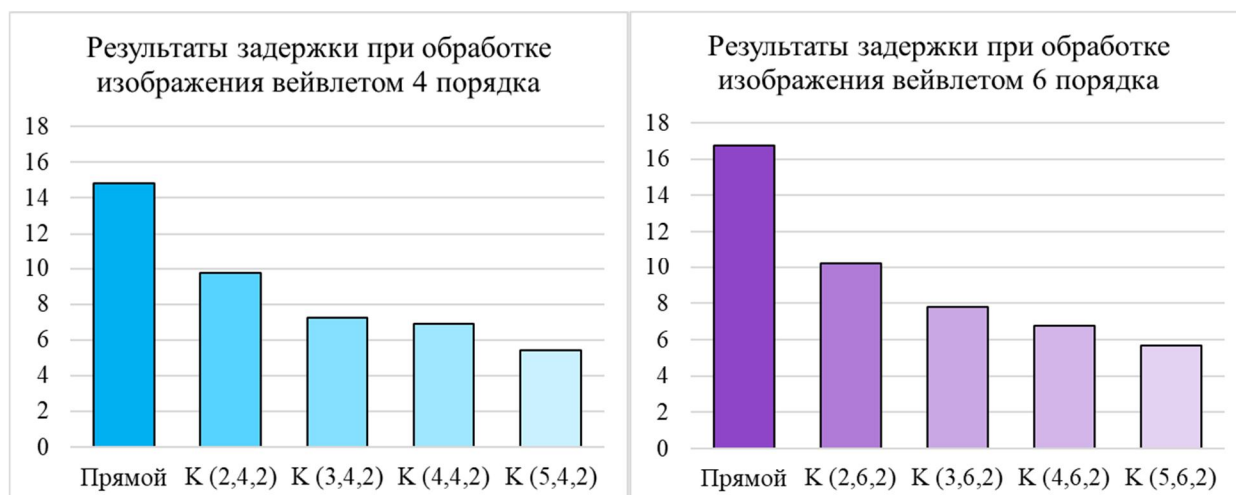


Рис. 3. График задержки (нс) при дискретном вейвлет-преобразовании изображения с использованием прямого метода (1 пиксель) и метода Винограда (2-5 пикселей), с усредненными значениями по каждому пикселю

Fig. 3. Delay (ns) graph for discrete wavelet transform of an image using direct method (1 pixel) and Winograd method (2-5 pixels), with averaged values for each pixel

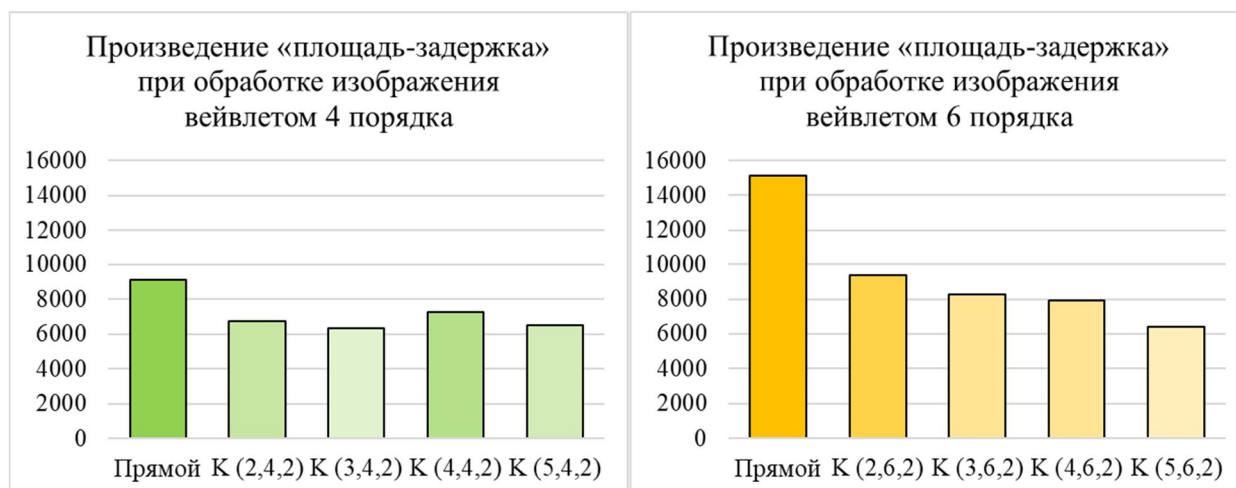


Рис. 4. График произведения площади и задержки устройства при дискретном вейвлет-преобразовании изображения с использованием прямого метода (1 пиксель) и метода Винограда (2-5 пикселей), с усредненными значениями по каждому пикселю

Fig. 4. Plot of area-device product delay for discrete wavelet transform of an image using direct method (1 pixel) and Winograd method (2-5 pixels), with averaged values for each pixel

Разработанный подход может быть применен к любым наборам фильтров, реализующих дискретное вейвлет-преобразование, например, из работы [11]. Перспективным направлением дальнейших исследований является применение раз-

работанного подхода в нейросетевых архитектурах, например, путем перехода от двумерных сверток из работы [15] к композиции одномерных преобразований, например, с использованием тензорных разложений. Аналогичным об-

разом могут быть преобразованы двумерные цифровые фильтры для обработки изображений, рассмотренные в работе [12]. Другими перспективными направлениями дальнейших исследований в предметной области статьи могут быть определение оптимальной разрядности коэффициентов фильтров для ППВМ-реализации, по аналогии с работой [18], а также разработка параллельных вычислительных структур, реализующих вейвлет-фильтрацию в системе остаточных классов [14].

Представленный в статье подход сохраняет все преимущества пространственно-временной вейвлет-обработки сигналов по сравнению только с частотной обработкой при использовании преобразования Фурье или его модификаций. Метод Винограда позволяет значительно ускорить вейвлет-обработку изображений, ценой умеренного возрастания аппаратных и энергетических затрат. Было установлено, что дальнейшее увеличение размера обрабатываемых фрагментов изображения при использовании метода Винограда приводит к незначительному приросту скорости вейвлет-обработки, сопровождаемому существенным ростом аппаратных и энергетических затрат. Кроме того, дальнейшее увеличение размера может существенно повысить вычислительную погрешность и снизить качество обработки изображения.

Установленный факт может стать основой для разработки новых систем цифровой обработки сигналов и изображений на основе дискретного вейв-

лет-преобразования. В настоящее время такие системы весьма востребованы для решения широкого класса задач в области машинного обучения, медицинской визуализации, беспилотного транспорта, обработки спутниковых снимков. Кроме того, полученный результат может помочь в создании систем обработки изображений и видео в реальном времени.

Выводы

В статье предложен новый подход к вейвлет-фильтрации изображений с децимацией на основе метода Винограда, который адаптирован для обработки сигналов с понижающей дискретизацией и произвольным шагом. Аппаратное моделирование вейвлет-фильтрации на FPGA показало, что предложенное решение позволяет снизить вычислительную задержку до 63% для вейвлет-фильтров 4 порядка и до 66% для вейвлет-фильтров 6 порядка. Наилучшее соотношение между площадью и задержкой устройства продемонстрировали конфигурации метода Винограда $K(3,4,2)$ при использовании вейвлет-фильтров 4 порядка и $K(5,6,2)$ при использовании вейвлет-фильтров 6-го порядка.

Полученный результат будет востребован для практического применения в области цифровой обработки сигналов, изображений и видео. Доказанная высокая скорость вейвлет-обработки на основе предложенного метода позволит обрабатывать большие массивы информации за меньшее время, что

особенно важно в современных системах искусственного интеллекта.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на реализацию данного подхода на интегральных схемах специаль-

ного назначения (ASIC), а также на применение модулярных вычислений для более эффективного параллелизма и увеличения скорости работы устройств.

Список литературы

1. Wu Y., Gao G., Cui C. Improved wavelet denoising by non-convex sparse regularization under double wavelet domains // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 30659-30671. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2903125.
2. Qin Q., Dou J., Tu Z. Deep ResNet Based Remote Sensing Image Super-Resolution Reconstruction in Discrete Wavelet Domain // Pattern Recognition and Image Analysis. Advances in Mathematical Theory and Applications. 2020. Vol. 30, №. 3. P. 541-550. DOI: 10.1134/S1054661820030232.
3. Souillard R., Carre P. Elliptical monogenic wavelets for the analysis and processing of color images // IEEE transactions on signal processing. 2015. Vol. 64, №. 6. C. 1535-1549. DOI: 10.1109/TSP.2015.2505664
4. Chen Y., Li D., Zhang J. Q. Complementary color wavelet: A novel tool for the color image/video analysis and processing // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. 2017. Vol. 29, №. 1. P. 12-27. DOI: 10.1109/TCSVT.2017.2776239.
5. Тараненко Ю. К. Методы дискретной вейвлет-фильтрации измерительных сигналов: алгоритм выбора метода // Измерительная техника. 2021. № 10. С. 14-20. DOI: 10.32446/0368-1025it.2021-10-14-20.
6. Алимагадов К. А., Умняшкин С. В. Аугментация данных на основе вейвлет-фильтрации при обучении нейронных сетей // ГрафиКон-2023: труды Международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению. М., 2023. С. 437-442.
7. Симонов Е. Н., Виноградов К. М. Реконструкция изображения по методу обратного проецирования с использованием вейвлет-фильтрации проекционных данных в рентгеновской компьютерной томографии // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2024. Т. 13, № 2. С. 5-22. DOI: 10.14529/cmse240201.
8. Rossinelli D., Fourestey G., Schmidt F. High-Throughput Lossy-to-Lossless 3D Image Compression // IEEE Transactions on Medical Imaging. 2021. Vol. 40, no. 2. P. 607-620. DOI: 10.1109/TMI.2020.3033456.
9. Alcaín E., Fernández P. R., Nieto R. Hardware Architectures for Real-Time Medical Imaging // Electronics. 2021. Vol. 10, no. 24. P. 3118. DOI: 10.3390/electronics10243118.

10. Escande P., Weiss P. Fast wavelet decomposition of linear operators through product-convolution expansions // IMA Journal of Numerical Analysis. 2022. Vol. 42, no. 1. P. 569-596. DOI: 10.1093/imanum/draa072.

11. Семенов В. И., Чумаров С. Г. От конструирования вейвлетов на основе производных функции Гаусса к синтезу фильтров с конечной импульсной характеристикой // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 2. С. 306-313. DOI: 10.17586/2226-1494-2024-24-2-306-313.

12. Разработка алгоритмов цифровой обработки изображений на основе метода Винограда в общем виде и анализ их вычислительной сложности / П. А. Ляхов, Н. Н. Нагорнов, Н. Ф. Семенова, А. Ш. Абдулсалямова // Компьютерная оптика. 2023. Т. 47, № 1. С. 68-78. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1146.

13. Иванов В. Э., Чье Е. У. Модульные дискретно-аналоговые вейвлет-фильтры. М.: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство "КноРус", 2021. 168 с.

14. Бергерман М. В. Использование системы остаточных классов с модулями вида $\{2^n - 1, 2^n, 2^n + 1\}$ для снижения аппаратных затрат цифрового фильтра // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 1(65). С. 32-43. DOI: 10.21685/2072-3059-2023-1-3.

15. Lavin A., Gray S. Fast algorithms for convolutional neural networks // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2016. P. 4013-4021.

16. Mehrabian A., Miscuglio M., Alkabani Y., Sorger V. J., El-Ghazawi T. A winograd-based integrated photonics accelerator for convolutional neural networks // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2019. Vol. 26, №. 1. P. 1-12. DOI: 10.1109/JSTQE.2019.2957443.

17. Shen J., Huang Y., Wen M., Zhang C. Toward an efficient deep pipelined template-based architecture for accelerating the entire 2-D and 3-D CNNs on FPGA // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. 2019. Vol. 39, №. 7. P. 1442-1455. DOI: 10.1109/TCAD.2019.2912894.

18. Нагорнов Н. Н. Определение минимальной разрядности коэффициентов вейвлет-фильтров для трехмерной медицинской визуализации // Информационные технологии. 2021. Т. 27, № 8. С. 425-434. DOI 10.17587/it.27.425-434.

19. Winograd S. Arithmetic complexity of computations. Siam, 1980. Vol. 33.

20. Chervyakov N., Lyakhov P., Kaplun D., Butusov D., Nagornov N. Analysis of the quantization noise in discrete wavelet transform filters for image processing // Electronics. 2018. Vol. 7, №. 8. P. 135. DOI: 10.3390/electronics7080135.

21. Parhami B. Computer arithmetic. New York, NY: Oxford university press, 2010. Vol. 20.

References

1. Wu Y., Gao G., Cui C. Improved wavelet denoising by non-convex sparse regularization under double wavelet domains. *IEEE Access*. 2019; (7): 30659-30671. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2903125.
2. Qin Q., Dou J., Tu Z. Deep ResNet Based Remote Sensing Image Super-Resolution Reconstruction in Discrete Wavelet Domain. *Pattern Recognition and Image Analysis. Advances in Mathematical Theory and Applications*. 2020; 30(3): 541-550. DOI: 10.1134/S1054661820030232.
3. Souillard R., Carre P. Elliptical monogenic wavelets for the analysis and processing of color images. *IEEE transactions on signal processing*. 2015; 64(6): 1535-1549. DOI: 10.1109/TSP.2015.2505664
4. Chen Y., Li D., Zhang J. Q. Complementary color wavelet: A novel tool for the color image/video analysis and processing. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. 2017; 29(1): 12-27. DOI: 10.1109/TCSVT.2017.2776239.
5. Taranenko Yu. K. Methods of discrete wavelet filtering of measuring signals: algorithm for choosing a method. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2021; (10): 14-20. (In Russ.). DOI: 10.32446/0368-1025it.2021-10-14-20.
6. Alimagadov K. A., Umnyashkin S. V. Data augmentation based on wavelet filtering in training neural networks. In: *GrafiKon-2023. Trudy Mezhdunarodnoi konferentsii po komp'yuternoi grafike i zreniyu = GraphiCon-2023. Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Vision*. Moscow; 2023. P. 437-442. (In Russ.).
7. Simonov E. N., Vinogradov K. M. Image reconstruction by the back projection method using wavelet filtering of projection data in X-ray computed tomography. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Vychislitel'naya matematika i informatika = Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Informatics*. 2024; 13(2): 5-22. (In Russ.). DOI: 10.14529/cmse240201.
8. Rossinelli D., Fourestey G., Schmidt F. High-Throughput Lossy-to-Lossless 3D Image Compression. *IEEE Transactions on Medical Imaging*. 2021; 40(2): 607-620. DOI: 10.1109/TMI.2020.3033456.
9. Alcaín E., Fernández P. R., Nieto R. Hardware Architectures for Real-Time Medical Imaging. *Electronics*. 2021; 10(24): 3118-3126. DOI: 10.3390/electronics10243118.
10. Escande P., Weiss P. Fast wavelet decomposition of linear operators through product-convolution expansions. *IMA Journal of Numerical Analysis*. 2022; 42(1): 569-596. DOI: 10.1093/imanum/draa072.
11. Semenov V. I., Chumarov S. G. From wavelet construction based on Gaussian derivatives to finite impulse response filter synthesis. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki = Scientific and Technical Bulletin of Infor-*

mation Technologies, Mechanics and Optics. 2024; 24(2): 306-313. (In Russ.). DOI: 10.17586/2226-1494-2024-24-2-306-313.

12. Lyakhov P. A., Nagornov N. N., Semenova N. F., Abdulsalyamova A. Sh. Development of algorithms for digital image processing based on the Vinograd method in general and analysis of their computational complexity. *Komp'yuternaya optika = Computer Optics*. 2023; 47(1): 68-78. (In Russ.). DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1146.

13. Ivanov V. E., Chye E. U. Modular discrete-analog wavelet filters. Moscow: KnoRus; 2021. 168 p. (In Russ.).

14. Bergerman M. V. Using a residual class system with modules of the form $\{2n - 1, 2n, 2n + 1\}$ to reduce the hardware costs of a digital filter. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki = News of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences*. 2023; (1): 32-43. (In Russ.). DOI: 10.21685/2072-3059-2023-1-3.

15. Lavin A., Gray S. Fast algorithms for convolutional neural networks. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2016: 4013-4021.

16. Mehrabian A., Miscuglio M., Alkabani Y., Sorger V. J., El-Ghazawi T. A winograd-based integrated photonics accelerator for convolutional neural networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2019; 26(1): 1-12. DOI: 10.1109/JSTQE.2019.2957443.

17. Shen J., Huang Y., Wen M., Zhang C. Toward an efficient deep pipelined template-based architecture for accelerating the entire 2-D and 3-D CNNs on FPGA. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*. 2019; 39(7): 1442-1455. DOI: 10.1109/TCAD.2019.2912894.

18. Nagornov N. N. Determination of the minimum bit depth of wavelet filter coefficients for three-dimensional medical imaging. *Informatsionnye tekhnologii = Information Technologies*. 2021; 27(8): 425-434. (In Russ.). DOI 10.17587/it.27.425-434.

19. Winograd S. Arithmetic complexity of computations. Siam, 1980; 33.

20. Chervyakov N., Lyakhov P., Kaplun D., Butusov D., Nagornov N. Analysis of the quantization noise in discrete wavelet transform filters for image processing. *Electronics*. 2018; 7(8): 135. DOI: 10.3390/electronics7080135.

21. Parhami B. Computer arithmetic. New York, NY: Oxford university press; 2010; 20.

Информация об авторе / Information about the Author

Ляхов Павел Алексеевич, кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой математического моделирования, Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Российская Федерация, e-mail: ljahov@mail.ru, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0487-4779>

Pavel A. Lyakhov, Cand of Sci. (Physico-Mathematical), Head of the Mathematical Modeling Department, North Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation, e-mail: ljahov@mail.ru, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0487-4779>

УДК 004.81

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-146-165>

Автоматизированная генерация презентаций на основе когнитивно-эстетической парадигмы

А. А. Зоткина¹ ✉, А. И. Мартышкин¹, А. А. Павлов¹, А. В. Ткаченко¹

¹ Пензенский государственный технологический университет
(Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»),
пр. Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, г. Пенза 440039, Российская Федерация

✉ e-mail: alena.zotkina.97@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Разработка программного решения для автоматизированной генерации презентаций, ориентированного на интеграцию принципов когнитивной психологии и эстетики. Исследование направлено на создание интеллектуальной платформы, способной формировать презентации, которые не только передают информацию, но и обеспечивают её эффективное визуальное восприятие, привлекая и удерживая внимание аудитории. В условиях стремительного роста объёмов данных и сокращения временных ресурсов возрастает потребность в инструментах, способных автоматизировать процесс создания визуального контента без ущерба для его качества. Предлагаемое решение учитывает особенности восприятия информации человеком, опираясь на такие когнитивные принципы, как теория когнитивной нагрузки, гештальт-принципы и визуальное выделение, а также применяет методы эстетического проектирования для создания сбалансированной и выразительной визуальной структуры.

Методы. Статья сочетает различные подходы и методы, включая когнитивные и эстетические аспекты, объектно-ориентированное программирование и интеграцию с технологиями искусственного интеллекта, что позволяет автоматически формировать как текстовый, так и визуальный контент, адаптируя его под заданную структуру презентации.

Результаты. Разработанное программное решение продемонстрировало преимущество по сравнению с существующими аналогами в ряде параметров: сокращение времени на создание презентаций, повышение визуального качества, адаптивность и соответствие когнитивным стратегиям восприятия информации. Результаты эксперимента с участием пользователей подтвердили высокую эффективность предложенного подхода по критериям удобства использования, дизайна и восприятия.

Заключение. Предложенное решение, основанное на когнитивно-эстетической парадигме, представляет собой перспективное направление в области автоматизации визуальной коммуникации. Оно демонстрирует потенциал к масштабируемости и интеграции в различные сферы, где требуется создание презентационного контента, совмещающего информативность, визуальную выразительность и человеко-ориентированный подход.

Ключевые слова: генерация; презентация; когнитивно-эстетическая парадигма; Python; LLM и TTI.

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

Для цитирования: Автоматизированная генерация презентаций на основе когнитивно-эстетической парадигмы / А. А. Зоткина, А. И. Мартышкин, А. А. Павлов, А. В. Ткаченко // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(2): 146-165. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-146-165>.

Поступила в редакцию 02.04.2025

Подписана в печать 29.05.2025

Опубликована 23.07.2025

Automated generation of presentations based on the cognitive-aesthetic paradigm

Alena A. Zotkina ¹ ✉, Alexey I. Martyshkin ¹, Akim A. Pavlov ¹,
Alexandra V. Tkachenko ¹

¹ Penza State Technological University
1a/11, Baidukova ave. / Gagarina str., Penza 440039, Russian Federation

✉ e-mail: alena.zotkina.97@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The objective of this study is to develop a software solution for automated presentation generation, focused on integrating principles of cognitive psychology and aesthetics. The research aims to create an intelligent platform capable of generating presentations that not only convey information but also ensure its effective visual perception, capturing and retaining audience attention. In an era of rapidly increasing data volumes and decreasing time resources, there is a growing need for tools that can automate the creation of visual content without compromising its quality. The proposed solution takes into account the specific characteristics of human information perception by relying on cognitive principles such as cognitive load theory, Gestalt laws, and visual emphasis. In addition, it applies aesthetic design techniques to create a balanced and expressive visual structure.

Methods. The study combines various approaches and methods, including cognitive and aesthetic aspects, object-oriented programming, and integration with artificial intelligence technologies. This allows the system to automatically generate both textual and visual content, adapting it to the predefined structure of the presentation.

Results. The developed software solution demonstrated advantages over existing tools across several key parameters: reduced presentation creation time, improved visual quality, adaptability, and alignment with cognitive strategies of information perception. Experimental results involving users confirmed the high efficiency of the proposed approach in terms of usability, design quality, and content perception.

Conclusion. The proposed solution, based on the cognitive-aesthetic paradigm, represents a promising direction in the field of automated visual communication. It demonstrates potential for scalability and integration across various domains that require the creation of presentation content combining informativeness, visual expressiveness, and a human-centered design approach.

Keywords: generation; presentation; cognitive-aesthetic paradigm; Python; LLM and TTI.

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

For citation: Zotkina A. A., Martyshkin A. I., Pavlov A. A., Tkachenko A. V. Automated generation of presentations based on the cognitive-aesthetic paradigm // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(2): 146-165 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-146-165>.

Received 02.04.2025

Accepted 29.05.2025

Published 23.07.2025

Введение

В современном информационном обществе, характеризующемся экспоненциальным ростом объёмов данных и ускорением темпов коммуникации, эффективная визуализация информации приобретает критическое значение. Презентации, будучи одним из наиболее распространённых инструментов коммуникации, играют ключевую роль в образовании, бизнесе, науке и многих других сферах деятельности. Однако создание качественных презентаций, способных удерживать внимание аудитории и эффективно доносить ключевые идеи, требует значительных временных затрат и специальных навыков в области дизайна и коммуникации. Эта проблема особенно актуальна в условиях современного динамичного мира, где время является одним из наиболее ценных ресурсов.

В связи с этим наблюдается растущий интерес к разработке инструментов, позволяющих автоматизировать процесс создания презентаций. Существующие решения в этой области предлагают различный функционал, от простого создания слайдов по шаблонам до более сложных систем, использующих алгоритмы искусственного интеллекта. Однако большинство из них сосредоточены преимущественно на технических аспектах вёрстки и форматирования, не уделяя должного внимания когнитивным и эстетическим

аспектам восприятия информации. Это приводит к тому, что автоматически сгенерированные презентации часто оказываются недостаточно эффективными с точки зрения коммуникативного воздействия на аудиторию. Они могут быть перегружены информацией, иметь негармоничную цветовую гамму или не учитывать особенности восприятия визуальной информации человеком.

В данной работе представлен инновационный подход к автоматизированной генерации презентаций, основанный на когнитивно-эстетической парадигме. Этот подход предполагает интеграцию принципов когнитивной психологии и эстетики в алгоритмы генерации визуального контента. Целью исследования является разработка программного решения, способного автоматически создавать презентации, которые были бы не только информативными, но и визуально привлекательными, учитывая особенности восприятия информации человеком.

Материалы и методы

Представленное программное решение для автоматизированного создания презентаций реализовано на языке Python с использованием объектно-ориентированного подхода [1, 2, 3, 4, 5]. Центральным элементом архитектуры является класс «CreatePresentation», инкапсулирующий основную логику создания и управления презентацией (рис.1).

```

class CreatePresentation():
    """
    Класс для создания презентации.

    Args:
        width (int): ширина презентации в Inches.
        height (int): высота презентации в Inches.
        main_color (tuple): rgb главный цвет всей презентации.

    """
    def __init__(self, width: int = 16, height: int = 9, main_color: tuple = (0, 0, 0)):
        self.prs = Presentation()
        self.width = width
        self.height = height
        self.prs.slide_width = Inches(width)
        self.prs.slide_height = Inches(height)
        self.colors = generate_design_palette(main_color, "tetradic")

```

Рис. 1. Класс «CreatePresentation»

Fig. 1. The "CreatePresentation" class

Класс «CreatePresentation» инициализируется с параметрами, определяющими размеры слайдов (ширина и высота в дюймах) и основной цвет презентации в формате RGB¹ [6]. В конструкторе класса создаётся объект презентации с помощью библиотеки «pptx» и генерируется цветовая палитра на основе заданного основного цвета и выбранного типа акцентных цветов (по умолчанию используется тетрадная палитра). Генерация цветовой палитры осуществляется отдельно реализованной функцией «generate_design_palette» [7, 8, 9].

Основную функциональность по генерации слайдов обеспечивает метод «create_any_slide» (рис. 2). Этот метод принимает в качестве аргументов тип слайда (например, main, text, image, column), содержание слайда (заголовки, тексты, пути к изображениям) и параметры форматирования (шрифты, цвета, вы-

равнивание) [10, 11]. Внутри метода «create_any_slide» осуществляется выбор соответствующего метода для генерации конкретного типа слайда. Например, для создания главного слайда вызывается метод «add_main_slide», для создания текстового слайда — метод «add_text_slide» и т.д. Такая структура обеспечивает гибкость и расширяемость системы, позволяя легко добавлять новые типы слайдов без изменения основного кода.

Каждый из методов генерации слайдов («add_main_slide», «add_text_slide», «add_image_slide», «add_columns_slide») реализует специфическую логику позиционирования и форматирования элементов на слайде. Для создания текстовых блоков используется метод «create_textbox», который позволяет устанавливать текст, шрифт, цвет, размер и выравнивание текста. Для добавления изображений используется метод «create_image», который загружает изображение из указанного файла и размещает его на слайде.

¹ Документация Python-pptx. URL: <https://python-pptx.readthedocs.io/>

```

136 elif type_slide == 'text':
137     if background_color == (-1, -1, -1):
138         background_color = self.colors['base_dark']
139     if title_color == (-1, -1, -1):
140         title_color = self.adjust_color(self.black_or_white(background_color), 0.8)
141     if main_color == (-1, -1, -1):
142         main_color = self.black_or_white(background_color)
143     self.add_text_slide(
144         title_text,
145         main_text,
146         title_font,
147         main_font,
148         title_color,
149         main_color,
150         background_color
151     )
152
153 elif type_slide == 'image':
154     if background_color == (-1, -1, -1):
155         background_color = self.colors['base_light']
156     if title_color == (-1, -1, -1):
157         title_color = self.adjust_color(self.black_or_white(background_color), 0.8)
158     if main_color == (-1, -1, -1):
159         main_color = self.black_or_white(background_color)
160     self.add_image_slide(
161         title_text,
162         main_text,
163         title_font,
164         main_font,
165         title_color,
166         main_color,
167         background_color,
168         image_path
169     )
170
171 elif type_slide == 'column':
172     if background_color == (-1, -1, -1):
173         background_color = self.colors['base_dark']
174     if title_color == (-1, -1, -1):
175         title_color = self.adjust_color(self.black_or_white(background_color), 0.8)
176     if subtitle_color == (-1, -1, -1):
177         subtitle_color = self.black_or_white(background_color)
178     if main_color == (-1, -1, -1):
179         main_color = self.black_or_white(background_color)
180     self.add_columns_slide(
181         title_text,
182         name_column_left,
183         name_column_right,
184         main_text_left,
185         main_text_right,
186         title_font,
187         subtitle_font,
188         main_font,
189         title_color,
190         subtitle_color,
191         main_color,
192         background_color
193     )
194
195 else:
196     print('!!! Такого типа слайда не существует !!!')
197     print("Возможные слайды:", *types)
198
199

```

Рис. 2. Метод «create_any_slide»

Fig. 2. The "create_any_slide" method

```

288 def add_image_slide(self, title_text: str="Тут что-то должно быть", main_text: str="Тут что-то должно быть", title_font: str="Mont Regular", main_font: str="
289 "Mont Regular", title_color: tuple=(255, 255, 255), main_color: tuple=(255, 255, 255), background_color: tuple=(0, 0, 0), image_path: str="/"):
290     """
291     Создаёт слайд с заголовком, текстом и картинкой, а также определяет соотношение сторон изображения для его удобного размещения на слайде.
292
293     Args:
294         title_text (str): текст заголовка.
295         main_text (str): текст главного содержания.
296         title_font (str): название используемого шрифта, который должен быть установлен в системе и в папке fonts.
297         main_font (str): название используемого шрифта, который должен быть установлен в системе и в папке fonts.
298         title_color (tuple): цвет (r: int, g: int, b: int).
299         main_color (tuple): цвет (r: int, g: int, b: int).
300         background_color (tuple): цвет (r: int, g: int, b: int).
301         image_path (str): адрес изображения.
302
303     """
304     if urlparse(image_path).scheme in ("http", "https"):
305         try:
306             response = requests.get(image_path, stream=True)
307             img = Image.open(io.BytesIO(response.content))
308             image_path = io.BytesIO(response.content)
309         except:
310             print("!!! ОШИБКА ПРИ ОТКРЫТИИ http ИЗОБРАЖЕНИЯ !!!")
311             print(image_path)
312
313     elif os.path.exists(image_path):
314         img = Image.open(image_path)
315     else:
316         print('!!! ИЗОБРАЖЕНИЯ НЕ СУЩЕСТВУЕТ !!!')
317         image_path = random.choice([os.path.join('mockup', 'NotFound_01.jpg'), os.path.join('mockup', 'NotFound_02.jpg'), os.path.join('mockup', 'NotFound_03.jpg')])
318         img = Image.open(image_path)
319
320     image_position_h = random.choice(['LEFT', 'RIGHT'])
321     image_position_v = random.choice(['TOP', 'BOTTOM'])
322     if img.width / img.height <= 0.8:
323         self.add_vertical_image_slide(title_text, main_text, title_font, main_font, title_color, main_color, background_color, image_path, image_position_h)
324     elif img.width / img.height >= 3.5:
325         self.add_horizontal_image_slide(title_text, main_text, title_font, main_font, title_color, main_color, background_color, image_path, image_position_v)
326     else:
327         if img.width / img.height < 1.3:
328             self.add_other_image_slide(title_text, main_text, title_font, main_font, title_color, main_color, background_color, image_path, image_position_h)
329         else:
330             self.add_other_image_slide(title_text, main_text, title_font, main_font, title_color, main_color, background_color, image_path, image_position_v)
331

```

Рис. 3. Метод «add_image_slide»

Fig. 3. The "add_image_slide" method

Особое внимание в архитектуре программного решения уделено адаптивности и динамическому расчёту параметров

элементов слайда. Например, метод «add_image_slide» анализирует соотношение сторон изображения и выбирает оп-

тимальное расположение и размер изображения на слайде, используя вспомогательные методы «`add_vertical_image_slide`», «`add_horizontal_image_slide`» и «`add_other_image_slide`». Это позволяет гармонично вписывать изображения различных форматов в общую композицию слайда.

В методе `add_image_slide` реализован алгоритм выбора оптимального расположения изображения на слайде в зависимости от его соотношения сторон. Алгоритм основан на анализе отношения ширины изображения к его высоте (`img.width / img.height`). Если это отношение меньше или равно 0.8, изображение считается вертикально-ориентированным, и вызывается метод `add_vertical_image_slide`. Если отношение больше или равно 3.5, изображение считается горизонтально-ориентированным, и вызывается метод `add_horizontal_image_slide`. В противном случае, если отношение находится в диапазоне от 0.8 до 1.3, то вызывается метод `add_other_image_slide` с положением 'LEFT' или 'RIGHT', иначе 'TOP' или 'BOTTOM'.

Каждый из методов (`add_vertical_image_slide`, `add_horizontal_image_slide`, `add_other_image_slide`) жёстко задаёт расположение элементов на слайде. Например, в методе `add_vertical_image_slide` изображение размещается либо в левой, либо в правой части слайда (в зависимости от случайного выбора `image_position_h`), а заголовок и текст

размещаются в противоположной части. Метод `add_horizontal_image_slide` размещает изображение в верхней или нижней части слайда (в зависимости от случайного выбора `image_position_v`), а заголовок и текст – в оставшейся части. Метод `add_other_image_slide` размещает изображение слева, справа, сверху или снизу, а текст с заголовком подстраиваются под него.

Следует отметить, что данный алгоритм является эвристическим и не учитывает семантику изображения и текста. В будущих версиях планируется усовершенствовать алгоритм, добавив анализ содержимого изображения и текста для более интеллектуального размещения элементов.

В случае отсутствия указанного изображения предусмотрена обработка исключений и подстановка изображения-заглушки из папки «/москир». Такой подход повышает робастность системы и предотвращает возникновение ошибок при работе с некорректными данными¹.

Метод «`create_textbox`» реализует автоматическую подгонку размера шрифта текстового блока для обеспечения оптимальной читаемости текста. Алгоритм подгонки учитывает длину текста, размер текстового блока и максимально допустимый размер шрифта. Для работы со шрифтами используется библиотека «`fontTools`», позволяющая полу-

¹ Документация FontTools. URL: <https://fonttools.readthedocs.io/en/latest/>

читать информацию о шрифте из файла «.ttf». Функция «get_font_name» извлекает имя шрифта из файла, что позволяет корректно работать с различными начертаниями шрифтов. В случае возникновения ошибок при подгонке

размера шрифта, например, при переполнении текстового блока, предусмотрена обработка исключений и установка фиксированного размера шрифта, что гарантирует отображение текста на слайде.

```

692 def adjust_color(self, rgb_color: tuple, factor=0.5) -> tuple:
693     """
694     Автоматически осветляет или затемняет цвет в зависимости от его яркости.
695
696     Args:
697         rgb_color (tuple): цвет (r: int, g: int, b: int).
698         factor: коэффициент изменения (0.0 - максимум изменения, 1.0 - без изменений).
699
700     Returns:
701         tuple: изменённый цвет (r: int, g: int, b: int).
702     """
703     brightness = 0.299 * rgb_color[0] + 0.587 * rgb_color[1] + 0.114 * rgb_color[2]
704     hls = colorsys.rgb_to_hls([x / 255.0 for x in rgb_color])
705
706     if brightness > 128:
707         hls = (hls[0], hls[1] * factor, hls[2])
708     else:
709         factor = 1 - factor
710         hls = (hls[0], 1 - (1 - hls[1]) * (1 - factor), hls[2])
711
712     return tuple(int(round(x * 255.0)) for x in colorsys.hls_to_rgb(*hls))
713
714 def black_or_white(self, color: tuple) -> tuple:
715     """
716     Выбирает белый или чёрный цвет в контраст входного.
717
718     Args:
719         color (tuple): цвет (r: int, g: int, b: int).
720
721     Returns:
722         tuple: цвет (r: int, g: int, b: int).
723     """
724
725     r, g, b = color
726     brightness = 0.299 * r + 0.587 * g + 0.114 * b
727
728     if brightness > 160:
729         return (0, 0, 0)
730     else:
731         return (255, 255, 255)
732

```

Рис. 4. Методы «adjust_color» и «black_or_white»

Fig. 4. The "adjust_color" and "black_or_white" methods

Для управления цветовой гаммой презентации используются методы «adjust_color» и «black_or_white» (рис. 4). Таким образом, метод «adjust_color» позволяет осветлять или затемнять цвет, что позволяет создавать различные оттенки на основе базовых цветов палитры. Функция «black_or_white» автоматически выбирает чёрный или белый цвет текста

в зависимости от яркости фона, обеспечивая оптимальный контраст и читаемость. Использование этих функций позволяет автоматически создавать гармоничные цветовые сочетания и адаптировать цветовую гамму к различному содержанию слайдов [12].

Для генерации цветовой палитры используется функция generate_design_palette,

основанная на цветовой модели HLS (Hue, Lightness, Saturation). Функция принимает на вход основной цвет в формате RGB и тип акцентной палитры (строка).

Основной цвет конвертируется из RGB в HLS. Создается словарь *palette*, в котором сохраняются базовые оттенки основного цвета:

- *base_light*: осветлённая версия основного цвета;
- *base_medium*: исходный основной цвет;
- *base_dark*: затемнённая версия основного цвета.

В зависимости от выбранного типа акцентной палитры (*accent_type*) генерируются дополнительные акцентные цвета:

- *complementary*: комплементарный цвет (противоположный на цветовом круге);
- *analogous*: два аналогичных цвета (соседние на цветовом круге);
- *triadic*: триадные цвета (равноудалённые на цветовом круге);
- *split_complementary*: расщеплённо-комплементарные цвета;
- *tetradic*: тетрадные цвета (четыре цвета, образующие прямоугольник на цветовом круге);
- *monochromatic*: монохроматические оттенки основного цвета.

Для каждого акцентного цвета создаются три оттенка: светлый, средний и тёмный. Сгенерированная палитра возвращается в виде словаря. Данный алгоритм обеспечивает генерацию гармоничных цветовых палитр, основан-

ных на теории цвета. Выбор различных типов акцентных палитр позволяет создавать разнообразные визуальные решения для презентаций.

В целом, представленная архитектура программного решения демонстрирует продуманный и эффективный подход к автоматизированной генерации презентаций. Использование объектно-ориентированного подхода, адаптивных алгоритмов и внешних библиотек обеспечивает гибкость, расширяемость и надёжность системы.

Интеграции моделей ИИ (LLM и ТТИ)

В рамках предложенного решения, центральным звеном которого является модуль для автоматизированной генерации презентаций, реализована интеграция с моделями искусственного интеллекта, а именно с большими языковыми моделями (LLM) и моделями преобразования текста в изображение (ТТИ). Эта интеграция позволяет автоматизировать процесс создания контента для презентаций, делая его более гибким и адаптивным к различным задачам.

В общем виде система функционирует следующим образом: на вход модуля поступают определённые данные, которые могут включать в себя текстовую информацию, а также, опционально, изображения. Далее, в зависимости от настроек, модуль инициирует взаимодействие с одной или несколькими LLM, такими как Claude или ChatGPT. Взаимодействие осуществляется посредством API, при этом модуль формирует

запросы к LLM, передавая им собранные исходные данные и запрашивая генерацию текстового контента, релевантного поставленной задаче.

Важно отметить, что формат запросов и структура получаемых от LLM данных могут варьироваться в зависимости от конкретной задачи и используемой языковой модели.

Полученный текстовый контент далее анализируется и, при необходимости, дополняется визуальными элементами. Для генерации изображений используются ТГГ модели, например, DALL-E или Flux.

Модуль формирует текстовые промпты для ТГГ моделей на основе информации, полученной от LLM, а также, при наличии, на основе анализа исходных изображений, если таковые были предоставлены. Сгенерированные ТГГ изображения, наряду с текстовым контентом от LLM, становятся основой для формирования слайдов презентации.

При этом модуль оперирует абстракциями, позволяющими создавать слайды различного типа, наполняя их текстом, изображениями, а также другими элементами, такими как таблицы или диаграммы.

Важной особенностью является алгоритм автоматической компоновки элементов на слайде, который учитывает тип и размер добавляемых объектов, стремясь к оптимальному визуальному расположению.

Ключевым аспектом интеграции является гибкость системы, позволяющая использовать различные LLM и ТГГ мо-

дели, а также адаптировать процесс генерации контента под разнообразные задачи, не ограничиваясь одним возможным решением, а распространяясь на создание презентаций любой тематики, где требуется автоматизированная генерация текстового и визуального контента на основе входных данных.

Модуль предоставляет возможность параметризации процесса создания презентации, позволяя управлять различными аспектами, такими как выбор используемых моделей ИИ, стилизация, форматирование текста, что делает его мощным инструментом для широкого круга задач.

Обоснование выбора технологий

Выбор технологий является важным этапом разработки любого программного решения. Для данного проекта мы руководствовались рядом критериев, включая простоту использования, наличие необходимых функциональных возможностей, производительность, поддержку сообщества и возможность интеграции с другими технологиями.

В качестве основного языка программирования был выбран Python. Python является одним из самых популярных языков, особенно в области искусственного интеллекта, благодаря своему простому синтаксису, большому количеству библиотек и обширному сообществу. Кроме того, Python обладает отличной совместимостью с библиотеками для машинного обучения, что критически важно для интеграции с моделями LLM и ТГГ.

Для создания и редактирования презентаций была выбрана библиотека `pptx.pptx` – это одна из наиболее популярных и функциональных библиотек Python для работы с файлами PowerPoint. Она позволяет создавать презентации с нуля, добавляя различные элементы и форматируя их. `.pptx` имеет подробную документацию, активно развивается и поддерживается сообществом.

Помимо `pptx` существуют и другие библиотеки для работы с презентациями на Python, такие как `python-pptx-interface`, `ReportLab` и `Aspose.Slides`:

- `python-pptx-interface` является над-стройкой над `pptx` и предоставляет более высокоуровневый интерфейс, но обладает ограниченной функциональностью;

- `ReportLab` – это мощная библиотека для создания PDF-документов, которую можно использовать и для генерации презентаций, но она требует больше усилий для настройки и не ориентирована на формат PowerPoint из-за чего теряется адаптивность, которая доступна в `python-pptx`;

- `Aspose.Slides` – это кроссплатформенная коммерческая библиотека с широкими и удобными возможностями, но она является платной с высокой стоимостью и подписочной системой.

Стоит отметить, что `pptx` имеет и некоторые ограничения. Например, она не предоставляет полного контроля над всеми аспектами форматирования, как это можно сделать вручную в PowerPoint. Однако эти ограничения не являются кри-

тичными для данного проекта. Преимущества же `pptx`, такие как простота использования и широкие функциональные возможности, делают её оптимальным выбором для реализации поставленной задачи.

Реализация когнитивных принципов

Одним из ключевых когнитивных принципов, реализованных в нашем решении, является принцип когнитивной нагрузки. Согласно теории когнитивной нагрузки, рабочая память человека имеет ограниченную ёмкость. Перегрузка рабочей памяти избыточной информацией приводит к снижению эффективности обучения и запоминания. Для минимизации когнитивной нагрузки мы используем несколько подходов. Во-первых, метод автоматически подгоняет размер шрифта, ограничивая количество текста на слайде и обеспечивая его читаемость. Во-вторых, алгоритмы динамического расчета параметров изображений, реализованные в методах `add_vertical_image_slide`, `add_horizontal_image_slide` и `add_other_image_slide`, оптимизируют размер и расположение визуальных элементов, предотвращая перегрузку зрительного канала.

Для облегчения восприятия информации и установления логических связей между элементами на слайде мы используем принцип близости, один из гештальт-принципов зрительного восприятия. Этот принцип гласит, что объекты, расположенные близко друг к дру-

гу, воспринимаются как единая группа. В нашем решении принцип близости реализуется через алгоритмы автоматического макетирования, которые группируют связанные текстовые блоки, заголовки и изображения. Например, при использовании метода `add_columns_slide` система автоматически располагает текстовые колонки на оптимальном расстоянии друг от друга, а подписи к изображениям размещаются непосредственно под ними, создавая чёткое визуальное единство. Это позволяет аудитории интуитивно понимать взаимосвязь между различными элементами слайда.

Чтобы акцентировать внимание аудитории на наиболее важной информации, мы применяем принцип выделения. Этот принцип предполагает использование визуальных подсказок для направления внимания на ключевые элементы презентации. В нашем программном решении принцип выделения реализуется через методы управления цветом и шрифтом. Например, метод `adjust_color` позволяет создавать различные цветовые акценты на основе базовой палитры, выделяя заголовки, ключевые слова или важные графические элементы. Функция `black_or_white` автоматически выбирает контрастный цвет текста в зависимости от фона, обеспечивая читаемость и привлекая внимание к текстовому контенту. Кроме того, метод `create_textbox` позволяет варьировать размер и начертание шрифта, выделяя заголовки и подзаголовки. Эти инструменты позволяют создавать визуальную

иерархию на слайде, направляя внимание аудитории по заранее определённой траектории.

Результаты и их обсуждение

В настоящее время на рынке представлен ряд инструментов, предлагающих возможности автоматизированной или полуавтоматизированной генерации презентаций. Среди наиболее известных можно выделить Canva, PowerPoint Designer (в составе Microsoft PowerPoint), Google Slides (с функцией "Умный подбор макета"), Gamma. Целью данного раздела является проведение детального сравнительного анализа предложенного решения с существующими аналогами, что позволит выявить его сильные и слабые стороны, а также определить его конкурентные преимущества.

В табл. 1 представлена сравнительная характеристика существующих методов автоматизированной генерации презентаций и предлагаемого решения на основе когнитивно-эстетической парадигмы, где цифры от 1 до 5 в таблице представляют собой оценочную шкалу, где каждая цифра соответствует определённому уровню качества, функциональности или характеристик по каждому критерию. Шкала интерпретируется следующим образом:

- 1 – Очень низкий уровень;
- 2 – Низкий уровень;
- 3 – Средний уровень;
- 4 – Высокий уровень;
- 5 – Очень высокий уровень.

Таблица 1. Сравнительная характеристика существующих методов генерации презентаций и предлагаемого подхода**Table 1.** Comparative characteristics of existing presentation generation methods and the proposed approach

Критерий / Criteria	Canva	PowerPoint Designer	Google Slides	Gamma	Предлагаемое решение на основе когнитивно-эстетической парадигмы / The proposed solution is based on the cognitive-aesthetic paradigm
Степень автоматизации	3	3	2	5	5
Качество дизайна	5	3	3	5	5
Настраиваемость	5	3	5	4	3
Удобство использования	4	4	3	4	5
Поддержка разных типов контента	5	5	5	4	5
Интеграция с другими сервисами	3	5	5	4	3
Стоимость (больше = дороже)	5	5	3	5	1
Учёт когнитивных принципов	5	3	2	3	5
Учёт эстетических принципов	5	3	2	4	5
Доступность в РФ	Нет	Нет	Нет	Нет	Да

Анализ таблицы показывает, что предложенное решение превосходит существующие аналоги в некоторых аспектах. Canva, являясь мощным и удобным инструментом для ручного дизайна, значительно уступает в степени автоматизации и интеграции с другими сервисами, т.к. работает онлайн и некоторые шаблоны поддерживают исключительно официальный сайт Canva.

PowerPoint Designer и Google Slides предлагают определённые функции автоматизации, но они ограничены рамками шаблонов и не обеспечивают комплексного подхода к генерации контента.

Gamma выделяется высокой степенью автоматизации и является отличным решением для быстрого создания презентаций, но за этот инструмент придётся не мало заплатить.

Предложенное решение, благодаря интеграции LLM и TTI моделей, а также использованию алгоритмов, учитывающих принципы дизайна и когнитивной психологии, позволяет создавать презентации, которые не только эстетически привлекательны, но и эффективны с точки зрения восприятия и усвоения информации. По времени создания и стоимости предложенное решение также демонстрирует преимущество, позволяя генерировать презентации быстрее, чем при использовании некоторых аналогов, но при этом затрачивая меньше ресурсов.

Таким образом, предлагаемое решение для автоматизированной генерации презентаций представляет значительные преимущества перед существующими методами. Оно не только обеспечивает высококачественное создание слайдов с учетом когнитивных и эстетических аспектов, но и предлагает гибкость, адаптивность и удобство использования. Это позволяет создавать презентации, которые не просто информируют, но и удерживают внимание аудитории, а также эффективно передают ключевые идеи.

Экспериментальная проверка и оценка пользовательского опыта

Для оценки эффективности разработанного решения было проведено исследование с участием реальных пользователей. В исследовании приняли участие 50 человек, разделённых на две группы:

1. Группа А: 25 пользователей, которые создавали презентации с использованием разработанного инструмента.

2. Группа В: 25 пользователей, которые создавали презентации вручную с помощью PowerPoint.

Участникам обеих групп было предложено создать презентацию на заданную тему за ограниченное время (30 минут). После завершения задачи участники оценивали свои презентации по следующим критериям: время, затраченное на создание презентации; удобство использования инструмента; качество дизайна.

Для оценки эффективности восприятия информации презентации, созданные обеими группами, были показаны независимой аудитории из 100 человек. Аудитория оценивала презентации по следующим параметрам: чёткость изложения информации; визуальная привлекательность; способность удерживать внимание; общее впечатление.

Результаты исследования показаны в табл. 2.

Результаты исследования подтвердили, что разработанное решение не только упрощает процесс создания презентаций, но и обеспечивает более высокое качество визуального контента.

Эффективность восприятия информации, оцениваемая независимой аудиторией, продемонстрировала статистически значимое превосходство презентаций, созданных с использованием разработанного инструмента (группа А), по сравнению с презентациями, сгенерированными вручную с применением тра-

диционных методов (группа В). Результаты оценки по ключевым параметрам представлены ниже:

Чёткость изложения информации: презентации группы А получили средний балл 4.8 из 5, что свидетельствует о высокой степени структурированности и логической связности представленного контента. В то же время презентации группы В были оценены на 4.2 из 5, что указывает на наличие определённых трудностей в восприятии информации,

связанных с недостаточной оптимизацией компоновки и форматирования.

Средняя оценка визуальной привлекательности презентаций группы А составила 4.7 из 5, что подтверждает эффективность применения когнитивно-эстетической парадигмы в автоматизированной генерации дизайна. Для группы В данный показатель составил 4.0 из 5, что может быть связано с отсутствием системного подхода к выбору цветовых решений, шрифтов и композиции.

Таблица 2. Сравнительная характеристика существующих методов генерации презентаций и предлагаемого подхода

Table 2. Comparative characteristics of existing presentation generation methods and the proposed approach

	Время, затраченное на создание презентации / Time spent on creating	Удобство использования инструмента / Ease of use of the tool	Качество дизайна / a presentation Design quality
Участники группы А	15	4,6	4,7
Участники группы В	25	3,8	4,1

Презентации группы А были оценены на 4.6 из 5, что подчёркивает их способность эффективно привлекать и поддерживать интерес аудитории благодаря оптимальному сочетанию визуальных и текстовых элементов. В группе В данный параметр получил оценку 4.1 из 5, что указывает на возможную перегруженность слайдов информацией или недостаточную визуальную гармонию.

Таким образом, результаты исследования подтверждают, что разработанное решение обеспечивает более высокий уровень восприятия информации

за счёт интеграции когнитивных и эстетических принципов в процесс автоматизированной генерации презентаций. Это позволяет не только улучшить визуальное качество контента, но и повысить его коммуникативную эффективность, что является ключевым преимуществом предложенного подхода.

Перспективы интеграции с ИИ

Разработанный модуль для создания презентации может быть использован в процессе генерации презентации, которая может базироваться на конвейерной ар-

хитектуре, интегрирующей несколько моделей искусственного интеллекта.

Вначале большая языковая модель (LLM) выполняет семантический анализ определённых входных данных [13, 14, 15]. Далее, осуществляется внутренний алгоритм для создания нарратива, который может быть декомпозирован для генерации индивидуального слайда презентации (с помощью ключевых слов триггеров).

Параллельно с этим, модель преобразования текста в изображение (ТТИ) использует сгенерированный LLM текст в качестве промптов для синтеза

визуального контента [16, 17, 18]. Сгенерированные изображения оптимизируются по разрешению и композиции, соответствующим выбранному шаблону презентации.

Далее, модуль для создания презентаций обрабатывает текстовые и визуальные артефакты, созданные LLM и ТТИ. Реализуются алгоритмы автоматического макетирования и стилизации, адаптируя расположение элементов на слайде. Пример сгенерированной презентации с помощью модуля и ИИ можно увидеть на рис. 5-6.

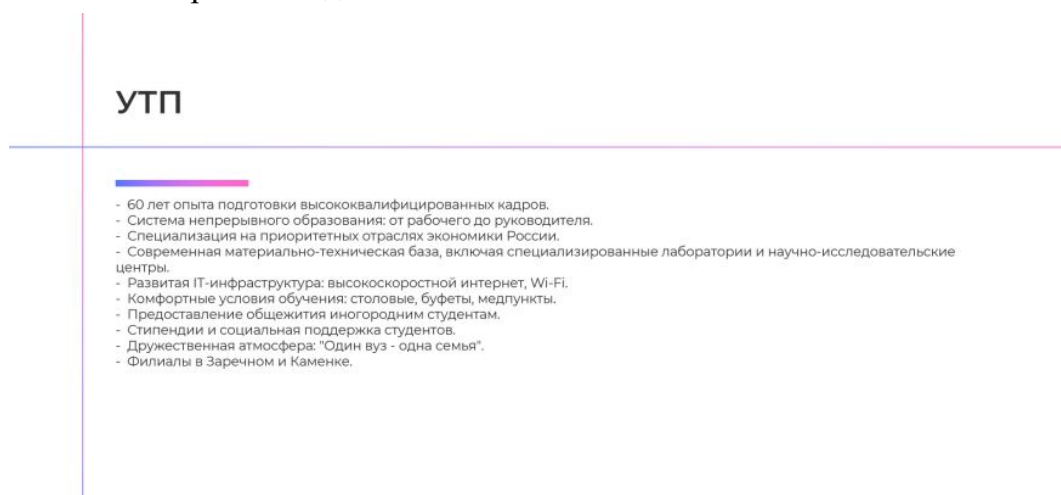


Рис. 5. Пример сгенерированной презентации с помощью разработанного модуля и ИИ

Fig. 5. An example of a generated presentation using the developed module and AI

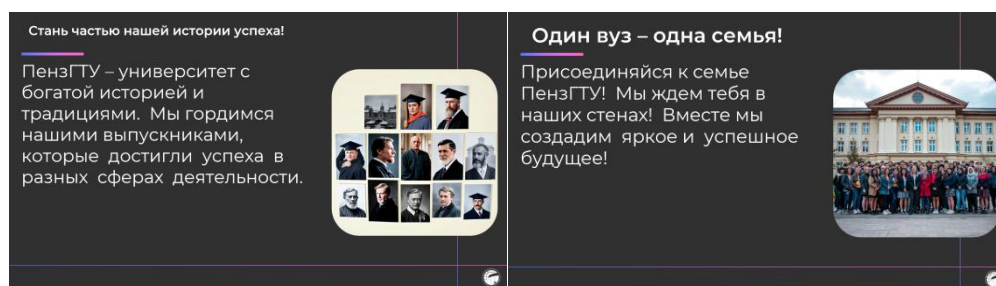


Рис. 6. Пример сгенерированной презентации с помощью разработанного модуля и ИИ

Fig. 6. An example of a generated presentation using the developed module and AI

Вся процедура может быть автоматизирована и управляема главным скриптом, который координирует взаимодействие между различными модулями и моделями ИИ. Эта архитектура позволяет эффективно генерировать высококачественные презентации, минимизируя необходимость ручного вмешательства.

Дизайнерские решения

Для фона главных слайдов был выбран тёмно-серый цвет, определённый в качестве основного цвета презентации. Этот выбор обеспечивает высокий контраст с белым цветом текста и элементов интерфейса, улучшая читаемость. В качестве акцентных цветов используются оттенки синего и фиолетового, полученные с помощью функции `generate_design_palette` с типом акцентной палитры `tetradic`. Эти цвета применяются в градиентных линиях и кругах, добавляя глубины и динамики фону.

Для заголовка используется шрифт `Montserrat SemiBold`, обеспечивающий акцентирование и хорошую читаемость. Для основного текста - `Montserrat Regular`, создающий контраст с заголовком и сохраняющий иерархию.

Логотип (если он указан) помещается в правой нижней части слайда, занимая место после пересечения двух градиентных линий, создавая единообразный стиль и визуально уравнивая слайд.

Изображения и текст на слайдах занимают столько места, чтобы не пере-

грузить человека информацией для лучшего усвоения материала.

Таким образом, соблюдая все аспекты визуального восприятия, создаётся лёгкая в чтении и усвоении презентация.

В целом, автоматическая генерация демонстрирует хорошие результаты в создании стандартных презентаций, где требуется соблюдение базовых правил дизайна и быстрое получение результата (несколько минут). Однако для проектов, требующих высокой степени креативности и оригинальности, по-прежнему предпочтительнее привлечение опытного дизайнера.

Вывод

В данной работе представлен подход к автоматизированной генерации презентаций, основанный на когнитивно-эстетической парадигме. Разработано программное решение, которое не только упрощает процесс создания визуального контента, но и учитывает когнитивные и эстетические аспекты восприятия информации.

Анализ существующих решений показал, что многие из них ограничены в своих возможностях и не способны эффективно адаптироваться к потребностям пользователей [19, 20]. В то время как шаблонные системы и инструменты на основе искусственного интеллекта обеспечивают автоматизацию и упрощение вёрстки, они часто пренебрегают важными факторами, такими как гармония визуального оформления, оптимальное восприятие инфор-

мации и удержание внимания аудитории [21]. Эти недостатки подчеркивают необходимость применения более комплексного подхода, который был реализован в нашем решении.

Разработанная архитектура программного обеспечения, основанная на объектно-ориентированном подходе, демонстрирует возможности для гибкой и адаптивной генерации слайдов. Использование специализированных методов для обработки текста и изображений позволяет создать гармоничные и чита-

бельные презентации. Алгоритмы не только учитывают содержание, но и оптимизируют визуальные параметры, чтобы улучшить восприятие информации. В результате, предлагаемое решение существенно превосходит существующие методы в вопросах создания презентаций, предоставляя пользователю инструменты для генерации высококачественного контента, который эффективно передаёт ключевые идеи и поддерживает интерес аудитории.

Список литературы

1. Златопольский Д.М. Основы программирования на языке Python. М.: ДМК Пресс, 2017. 284 с.
2. Свейгарт Эл. Автоматизация рутинных задач с помощью Python: практическое руководство для начинающих. М.: Вильямс, 2016. 592 с.
3. Гэддис Т. Начинаем программировать на Python. 4-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2019. 768 с.
4. Федоров Д. Ю. Программирование на языке высокого уровня Python. М.: Изд-во Юрайт, 2019. 161 с. URL: <https://urait.ru/bcode/437489>
5. Рейтц К., Шлюссер Т. Автостопом по Python. СПб.: Питер, 2017. 336 с. (Серия «Бестселлеры O'Reilly»).
6. Буч Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование на примерах приложений. М.: ДМК Пресс, 2007. 520 с.
7. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования / Э. Гамма, Р. Хелм, Р. Партнер, Д. Влассидес. СПб.: Питер, 2009. 368 с.
8. Чирвинский А. Основы теории цвета в графическом дизайне // Журнал дизайна и теории цвета. 2019. № 3. С. 45–53.
9. Хайн Дж. Алгоритмы автоматической настройки цвета для приложений обработки изображений // Журнал цифровой обработки изображений. 2020. Т. 33, № 4. С. 124–130.
10. Стивенс Х. Интеллектуальная генерация презентаций в динамических средах // Международный журнал передовой компьютерной науки и приложений. 2019. Т. 10, № 6. С. 155–161.

11. Осборн А.Ф. Разработка презентаций для визуальной ясности // Журнал деловой и технической коммуникации. 2018. Т. 32, № 1. С. 87–102.
12. Смит Дж. Проектирование адаптивного пользовательского интерфейса // Труды IEEE по системам «человек-машина». 2022. Т. 52, № 2. С. 320–330.
13. Рой П., Панди С., Джайн К. Глубокое обучение для обработки естественного языка: применение глубоких нейронных сетей к задачам машинного обучения в области обработки естественного языка. Cham: Springer, 2018. 280 с.
14. Ротман Д. Трансформаторы для обработки естественного языка: создание и развертывание современных конвейеров обработки естественного языка. Бирмингем: Packt Publishing, 2021. 374 с.
15. Яричев М. GPT-3: Создание инновационных продуктов обработки естественного языка с использованием API OpenAI GPT-3. Независимое издание, 2021. 210 с.
16. Скрыбин А. Практическая генерация изображений с TensorFlow: создание генеративных моделей с использованием VAE, GAN и моделей диффузии. Бирмингем: Packt Publishing, 2022. 380 с.
17. Джавад М., Лонгхи А. Машинное обучение для визуальной аналитики данных: от моделей глубокого обучения до GAN и VAE. Cham: Springer, 2021. 420 с.
18. Фостер Д. Генеративное глубокое обучение: обучение машин рисовать, писать, сочинять и играть. Севастополь: O'Reilly Media, 2019. 352 с.
19. Wong D. M., Shankaranarayanan G. Automated Data Visualization: A Review and Future Directions // Journal of Visual Languages & Computing. 2022.
20. Allison J., McNamara S. Data Storytelling for Business: The Essential Guide to Engaging Visualization. Springer, 2021.
21. Gomez, E., Decker, S. Generative Design for Data Visualization: A Review and Framework // Computer Graphics Forum. 2022.

References

1. Zlatopolsky D.M. Fundamentals of programming in Python. Moscow: DMK Press; 2017. 284 p. (In Russ.).
2. Sveygart, El. Automation of routine tasks using Python: a practical guide for beginners. Moscow: Williams; 2016. 592 p. (In Russ.).
3. Gaddis T. Starting to program in Python. St. Petersburg: BHV-Petersburg; 2019. 768 p. (In Russ.).
4. Fedorov D. Yu. Programming in a high-level Python language: a textbook for applied bachelor's degree. Moscow: Yurait; 2019. 161 p. (In Russ.). Available at: <https://urait.ru/bcode/437489>
5. Reitz K., Schlusser T. The Hitchhiker's guide to Python. St. Petersburg: Piter; 2017. 336 p. (In Russ.).

6. Butch G. Object-oriented analysis and design using application examples. Moscow: DMK Press; 2007. 520 p. (In Russ.)
7. Gamma E., Helm R., Partner R., Vlissides D. Object-oriented design techniques. Design patterns. St. Petersburg: Peter; 2009. 368 p. (In Russ.)
8. Chirvinsky A. Fundamentals of color theory in graphic design. *Zhurnal dizaina i teorii tsveta = Journal of Design and Color Theory*. 2019; (3): 45-53. (In Russ.)
9. Hein J. Algorithms for automatic color adjustment for image processing applications. *Zhurnal tsifrovoy obrabotki izobrazhenii = Journal of Digital Image Processing*. 2020; 33 (4): 124-130. (In Russ.).
10. Stevens H. Intelligent generation of presentations in dynamic environments. *Mezhdunarodnyi zhurnal peredovoi komp'yuternoi nauki i prilozhenii = International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2019; 10(6): 155-161. (In Russ.)
11. Osborn A.F. Development of presentations for visual clarity. *Zhurnal delovoi i tekhnicheskoi kommunikatsii = Journal of Business and Technical Communication*. 2018; 32 (1): 87-102. (In Russ.)
12. Smith J. Designing an adaptive user interface. *Trudy IEEE po sistemam «chelovek-mashina» = IEEE Proceedings on human-machine systems*. 2022; 52 (2): 320-330. (In Russ.)
13. Roy P., Pandi S., Jain K. Deep learning for natural language processing: the application of deep neural networks to machine learning tasks in the field of natural language processing. Cham: Springer; 2018. 280 p. (In Russ.)
14. Rotman D. Transformers for natural language processing: creation and deployment of modern natural language processing pipelines. Birmingham: Packt Publishing; 2021. 374 p. (In Russ.).
15. Yarichev M. GPT-3: Creating innovative natural language processing products using the OpenAI GPT-3 API. Independent edition, 2021. 210 p. (In Russ.)
16. Scriabin A. Practical image generation with TensorFlow: creation of generative models using VAE, GAN and diffusion models. Birmingham: Packt Publishing; 2022. 380 p. (In Russ.)
17. Javad M., Longhi A. Machine learning for visual data analytics: from deep learning models to GAN and VAE. Cham: Springer; 2021. 420 p. (In Russ.).
18. Foster D. Generative deep learning: teaching machines to draw, write, compose and play. Sevastopol: O'Reilly Media; 2019. 352 p. (In Russ.).
19. Wong D. M., Shankaranarayanan, G. Automated Data Visualization: A Review and Future Directions. Shankaranarayanan. *Journal of Visual Languages & Computing*. 2022.
20. Allison J., McNamara S. Data Storytelling for Business: The Essential Guide to Engaging Visualization. Springer; 2021.
21. Gomez E., Decker S. Generative Design for Data Visualization: A Review and Framework. *Computer Graphics Forum*. 2022.

Информация об авторах / Information about the Authors

Зоткина Алена Александровна, старший преподаватель кафедры «Программирование», Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: alena.zotkina.97@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2497-6433>

Alena A. Zotkina, Senior Lecturer of the Programming Department, Penza State Technological University, Penza, Russian Federation, e-mail: alena.zotkina.97@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2497-6433>

Мартышкин Алексей Иванович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Программирование», Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: alexey314@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3358-4394>

Alexey I. Martyshkin, Cand of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Programming Department, Penza State Technological University, Penza, Russian Federation, e-mail: alexey314@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3358-4394>

Павлов Аким Алексеевич, студент кафедры «Программирование», Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: akimpavlov03@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-9646-2064>

Akim A. Pavlov, Student of the Programming Department, Penza State Technological University, Penza, Russian Federation, e-mail: akimpavlov03@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-9646-2064>

Ткаченко Александра Васильевна, студентка кафедры «Программирование», Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: Aleksandratka4@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-8125-8167>

Alexandra V. Tkachenko, Student of the Programming Department, Penza State Technological University, Penza, Russian Federation, e-mail: Aleksandratka4@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-8125-8167>

УДК 519.685+004.04

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-166-185>

Автоматизация процесса прогнозирования данных

О. А. Иващук ¹ ✉, О. Д. Иващук ¹, С. В. Игрунова ²,
Е. В. Нестерова ¹, А. В. Маматов ¹

¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Студенческая, д. 14, г. Белгород 308007, Российская Федерация

² Воронежский государственный университет
Университетская пл., д. 1, г. Воронеж 394018, Российская Федерация

✉ e-mail: ivaschuk@bsuedu.ru

Резюме

Цель исследования. Непрерывная модернизация, улучшение методик диагностики требует внедрения инновационных программных решений, современного инструментария, медицинского оснащения и усовершенствованных протоколов обследования, направленных на сбор, хранение, обработку и применение показателей состояния организма, и достоверность медицинской информации. Цель исследования состоит в повышении точности прогнозирования путём разработки оптимальных прогнозных моделей, повышающих надёжность выявленных оценок при диагностике остеопороза с использованием экспертной системы.

Методы. Для достижения поставленных целей использовались параметрические статистические методы для подтверждения обоснованности предположения о нормальной форме распределения всех исследуемых выборочных совокупностей. Основываясь на полученных результатах в качестве наилучшего подхода методики изучения взаимосвязей – корреляционный и регрессионный анализы, для разработки прогностических моделей с определением доверительного интервала предсказания и сопоставления диапазона итогового показателя с вероятностью возникновения болезни.

Результаты. В ходе исследования построены прогнозирующие модели для каждой выделенной группы пациентов совместно с пределами доверительных интервалов прогнозируемых величин ключевых показателей. Определены закономерности взаимозависимости конкретных промежутков целевых факторов и степеней вероятности прогрессирования патологий заболевания. Разработана экспертная система, реализующая полную систему информационного сопровождения, предназначенную для идентификации рисков возникновения заболеваний у пациентов, по предоставленным сведениям, о плотности тканей грудной полости.

Заключение. Разработанная информационная система позволяет осуществлять прогнозирование вероятности болезни для пациентов (мужчин и женщин), возрастные показатели которых выходят за пределы указанного диапазона (10-70 лет), однако достоверность подобных прогнозов неоднозначна, поскольку прогностические модели, составляющие основу функционирования системы, разработаны на базе чей возраст ограничен периодом от 10 до примерно 72 лет.

Ключевые слова: остеопороз; массив данных; регрессионные модели; информационная система; прогнозная модель; алгоритм.

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

© Иващук О. А., Иващук О. Д., Игрунова С. В., Нестерова Е. В., Маматов А. В., 2025

Для цитирования: Автоматизация процесса прогнозирования данных / О. А. Ивашук, О. Д. Ивашук, С. В. Игрунова, Е. В. Нестерова, А. В. Маматов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(2): 166-185. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-166-185>.

Поступила в редакцию 18.04.2025

Подписана в печать 04.06.2025

Опубликована 23.07.2025

Automation of predicting the risk of osteoporosis

Olga A. Ivashchuk ¹ ✉, Orest D. Ivashchuk ¹, Svetlana V. Igrunova ²,
Elena V. Nesterova ¹, Alexander V. Mamatov ¹

¹ Belgorod State National University
14, Studencheskaya str., Belgorod 308007, Russian Federation

² Voronezh State University
Universitetskaya sq., 1, Voronezh, 394018, Russian Federation

✉ e-mail: ivaschuk@bsuedu.ru

Abstract

Purpose of research. To increase the accuracy of forecasting by developing optimal predictive models that increase the reliability of the identified estimates in the diagnosis of osteoporosis using an expert system.

Methods. In this work, parametric statistical methods were used to confirm the validity of the assumption of the normal distribution of all studied sample populations. Based on the results obtained, correlation and regression analyses are considered as the best approach for studying interrelations, for developing predictive models with determining the confidence interval of prediction and comparing the range of the final indicator with the probability of disease occurrence.

Result. During the study, predictive models were constructed for each identified patient group along with limits of confidence intervals for predicted values of key parameters. Regularities in the mutual dependence between specific target factor ranges and degrees of pathology progression probabilities have been established. An expert information system has been developed, implementing a complete informational support system designed to identify risks of diseases development in patients based on provided data regarding chest tissue density.

Conclusion. The developed information system enables predicting the likelihood of illness for patients (both men and women) whose age exceeds the specified range (10–70 years); however, the reliability of such predictions remains ambiguous since the prognostic models underlying the system's operation are built upon data from individuals aged within the period of approximately 10 to 72 years.

Keywords: osteoporosis; regression models; information system; predictive model; algorithm.

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

For citation: Ivashchuk O. A., Ivashchuk O. D., Igrunova S. V., Nesterova E. V., Mamatov A. V. Automation of predicting the risk of osteoporosis // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(2): 166-185 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-166-185>.

Received 18.04.2025

Accepted 04.06.2025

Published 23.07.2025

Введение

Постоянное совершенствование диагностических методов в здравоохране-

нии влечет за собой внедрение новых технологий, инструментов, оборудования и процедур, необходимых для сбора, хранения, извлечения и использова-

ния предикторов о состоянии здоровья и качестве медицинских данных. Это даст возможность сбалансировать полезности полученной информации, ценность данных, затраты ресурсов на диагностику, вычислительную эффективность и надежность вывода при принятии решения.

Здравоохранение отстает с точки зрения цифровизации и инноваций [1,2]. По мере роста числа инструментов системы здравоохранения претерпевают радикальные изменения и технические спецификации, касающиеся индустрии 4.0 [3]. Это в свою очередь мотивирует разработчиков на применение новых технологий, которые оптимизируют процесс принятия медицинских решений и оценки состояния пациента.

Медицинские работники критически оценивают эффективность новых технологий и инструментов, выборочно полагаясь на них там, где их результатам можно с уверенностью доверять, и снизить ошибку человеческого фактора, что позволяет сократить время на постановку диагноза болезни и повысить качество обслуживания.

Наблюдается прогресс в применении новых технологий, таких как больших данных, искусственного интеллекта, телемедицины, блокчейн-платформ применительно к методам оценки и прогноза в области болезней костных и соединительных тканей, в частности остеопороза.

Традиционно врачи сосредоточены на выявлении признаков остеопороза в большей степени у женщин, несмотря на это, остеопороз регулярно диагно-

стируется и у лиц преклонного возраста обоих полов. Остеопороз – это общее нарушение структуры костной ткани, приводящее к повышенной восприимчивости организма к переломам и снижению устойчивости скелета. Среди людей старше 50 лет в течение оставшейся жизни довольно часто случается перелом из-за хрупкости костей.

Объектом исследования стало изучение процессов поддержки принятия решений при оценке вероятности заболевания суставов и хрящей, где наибольший риск здоровью представляет остеопороз. Автоматизация такого рода задач обработки данных обусловлена необходимостью использования больших объемов неоднородных данных для машинного обучения и приложений больших данных. Автоматизированные системы обработки данных, основанные на методах автоматизированного машинного обучения, способны брать необработанные данные и преобразовывать их в полезные функции для задач больших данных, автоматизируя все промежуточные этапы обработки.

Предметом исследования стали подходы, методики способные минимизировать влияние субъективности специалиста при диагностике и принятии решений в неопределённых ситуациях, а также ускорить составление прогноза течения патологического процесса и способствовать улучшению качества оказываемой медицинской помощи.

Группировка данных служит фундаментальным средством интеллектуального анализа информации, используемым для

распределения большого массива данных по отдельным категориям, повышения информативности и оптимизации выявления ключевых зависимостей в объёмах разнородных структурированных и неструктурированных данных. Использование статистических и математических подходов помогает установить разнообразные взаимосвязи между данными на разных уровнях анализа, открывая возможность обнаружить ранее неизвестные тенденции в биопроцессах [4].

Цель исследования состоит в повышении точности прогнозирования путём разработки оптимальных прогнозных моделей, повышающих надёжность выявленных оценок при диагностике остеопороза с использованием экспертной системы.

Материалы и методы

Результирующая оценка, отражающая эффективность любого медицинского исследования, зависит от множества показателей. Малая корреляционная связь результирующей переменной с главными предикторами статически незначима, а это, в свою очередь, требует решать задачу снижения размерности исследуемого набора данных путем выявления переменных, заметно воздействующих на целевую переменную.

Поэтому решается задача устранения избыточных данных за счёт выделения значимых факторов, чьи эффекты сильнее и достовернее всего влияют на итоговые показатели. В источниках [5–6] приведены стандартные подходы к

сокращению многомерности, подлежащих обработке массивов медико-биологической информации.

Анализ показывает, что лишь небольшая доля (около 10%) рассмотренных факторов оказывает реально значимое влияние на полученные результаты, в связи с этим рекомендуется сократить количество факторов, включаемых в прогностические модели, ограничив число предикторов диапазоном 5–6, что соответствует примерно 5–25% от общего количества потенциальных взаимосвязей. Это представляет собой сложную задачу статистического анализа данных.

Для выбора метода снижения размерности необходимо:

- выявить тип распределения массива данных [4–7];
- определить базовые показатели контрольной группы;
- распространение выведенных закономерностей на генеральное множество исследуемых биологических объектов с целью установления ожидаемых значений изучаемых признаков в контрольной группе [8–10];
- моделирование прогнозных значений проверяемых признаков в контрольной группе;
- реализация сравнения разных групп метрик для выявления отличий и сходства между ними;
- определение корреляционной связи между имеющимися в базе данных факторами;
- расчёт коэффициентов регрессии при варьировании входных переменных;

– оценка прогнозного значения конкретного параметра при изменении сопутствующих ему факторов [8-13].

Данные были получены в результате обследования пациентов в Белгородской областной клинической больнице Святителя Иоасафа. Минимальный объем выборки для лиц одного пола составил 270–300 человек, при этом численность каждой из шести формируемых подгрупп должна быть не менее 40 наблюдений. Подобный объем выборки обеспечил достаточную статистическую мощность для оценки характера распределения данных, что позволит обоснованно выбрать методы их обработки в зависимости от соответствия гауссовому, логнормальному или иному типу распределения. Предварительный анализ выявил значимую гетерогенность ($p < 0.05$) возрастной динамики исследуемых биометрических показателей среди мужчин, что потребовало стратификации исходной выборки на две возрастные группы: 10–30 лет и >30 лет. Для последующего анализа каждая возрастная группа была дополнительно разделена на три категории по индексу грудной клетки (Ind): низкий Ind₁ (<1.9), средний Ind₂ (1.9–2.25), высокий Ind₃ (>2.25). Такой подход позволил провести детальный анализ возрастных изменений минеральной плотности костной ткани с использованием оптимизированных регрессионных моделей (линейных и нелинейных) для каждой подвыборки, учитывающих влияние возрастного фактора и морфометрических особенностей грудной клетки.

Поскольку ключевые предикторы (плотность костной ткани первого ребра справа/слева) представляли количественные переменные, то из анализа исключили все порядковые данные. Индекс грудной клетки рассчитывался как отношение сагиттального размера к ширине.

База данных содержала преимущественно ($\geq 99\%$) показатели здоровых лиц, поэтому данные пациентов использовали только для калибровки прогностической модели. Система должна оценивать риск патологии на основе: возрастных референсных интервалов показателей; степени отклонения от средних значений; приближения к нижним границам распределения (ассоциированным с патологией).

Решение задачи снижения размерности полного множества X подразумевает поиск оптимального подмножества M^* из полных данных $M \subseteq X$, удовлетворяющих условию максимального содержания информации $I(M^*)$.

Для разрешения проблемы уменьшения размерности предлагается применить методологию отбора признаков [5-7]. Эта процедура сопряжена с рядом трудностей, ввиду вычислительной сложности и продолжительности операций, необходимых для проверки всех возможных сочетаний переменных. Согласно исследованию [14], выбор факторов в общем виде сводится к выполнению операции $M = F(X)$, позволяющей преобразовать исходное пространство в новую систему предикторов, что известно как «извлечения признаков», при выполнении которой формируется обновленное множество интегрирован-

ных признаков, например, с применением линейного отображения $M = F(X)$.

В процессе извлечения неструктурированные данные множества X преобразуются в более структурированный и удобный формат для повышения качества данных и интерпретируемости модели. Извлечение признаков является подмножеством Z^* проектирования признаков более широкого процесса создания, изменения и выбора признаков в необработанных данных для оптимизации производительности модели. Извлечение признаков подразумевает создание новых признаков, которые по-прежнему захватывают важную информацию из исходных данных, но более эффективным способом.

Существует несколько способов извлечения признаков: метод главных компонент, создающий интегральные предикторы, объединяющие совокупное влияние всех исходных факторов; метод экстремальной группировки, предлагающая заменить выбранную группу признаков общим эквивалентом, аналогичным сумме эффектов указанных признаков [8-13].

Метод главных компонент особенно подходит для извлечения нескольких начальных факторов из большого числа связанных переменных в интегральные предикторы, перед использованием их в другом анализе, таком как множественная регрессия или многомерный дисперсионный анализ.

Анализирует непрерывные переменные путем отбора отдельных предикторов на основе экстремальных оценок вы-

борочного распределения и представления только этих экстремальных оценок для дальнейшего анализа [14].

Выявление значения составленных обобщенных предикторов неприменимо к методу главных компонент, поскольку распределение собственных значений или их отношений зависит от размера выборки, типов данных, размерности шкалы, а исследуемый массив данных имеет различные типы и размерность.

По причине гетерогенности данных тяжело сформировать матрицу коэффициентов Пирсона и оценить необходимое количество подгрупп в массиве [15].

Способ экстремальной группировки – отбор отдельных предикторов на основе экстремальных оценок выборочного распределения и представления только этих экстремальных оценок для дальнейшего анализа. Этот метод выборки используется для достижения большей статистической мощности в последующих проверках гипотез.

Применение данного способа предполагает выполнение следующих шагов: 1 шаг – сформировать корреляционную матрицу парных факторов с результирующей функцией; 2 – разбить на группы исходный массив X ; 3 – выбрать внутри группы из максимальных коэффициентов корреляции максимальные; 4 – факторный коэффициент корреляции между группами выбирается минимальный; 5 – формируется матрица факторов в один столбец, соответствующий равнодействующему предиктору.

Задача селекции признаков решается с помощью задач перебора с помощью задач перебора всех сформированных возможных подмножеств и сравнения их распределений с помощью методов: методы накопленных частот, а также метод Шеннона и метод Кульбака [16,17]. Все эти методы не зависят от числа градаций, они эффективны [18].

Для разработки модели с помощью метода накопленных частот определяется наиболее значимая информативность признаков диагностических данных о заболеваниях, равная максимальному абсолютному значению разности факторов X , принадлежащих различным классам.

Все эти методы часто используются в медицинских информационных системах [18].

Проверка нормальности распределения вариационных рядов проводилась для обоснования применимости параметрических методов анализа данных и выделения подгрупп. Для этого были учтены следующие критерии: значения критерия «хи-квадрат», определяющие согласованность эмпирического распределения с теоретическим нормальным законом; форма гистограмм, отражающая визуальное распределение наблюдений относительно гипотезы о нормальном законе; показатели, такие как коэффициент асимметрии и эксцесс, позволяющие количественно оценить степень отклонения реального распределения от нормального.

Таким образом, сочетание перечисленных подходов позволяет объективно

судить о возможности использования параметрических методов и деления данных на группы.

Это дало основание остановиться на методах корреляционного и регрессионного анализа как наиболее подходящих способах исследования и выдвинуть предположение, что оптимальными формами создаваемых прогнозных моделей станут линейные или полиномиальные регрессионные модели с последующим расчётом доверительных интервалов для прогнозируемых значений факторов – как среднестатистических, так и персональных.

Результаты и их обсуждение

В результате анализа динамики развития остеопороза у мужчин и женщин по имеющимся БД выявлено, что ключевыми атрибутами, определяющими вероятность возникновения и развитие этого заболевания, выступают следующие показатели плотности: оптическая плотность клювовидного отростка лопатки справа (M_1) и оптическая плотность клювовидного отростка лопатки слева (M_2), оптическая плотность бугорка первого ребра справа (M_3), оптическая плотность бугорка первого ребра слева (M_4), оптическая плотность переднего конца костной части первого ребра справа (M_5) и оптическая плотность переднего конца костной части первого ребра слева (M_6). Фиктивные переменные: возрастной фактор пациента (Z_1); гендерная принадлежность (Z_2); конфигурационные особенности грудной клетки (Z_3).

В рамках разработки информационной системы были определены ключевые стадии общего исследовательского процесса: формулировка правил построения базы данных для анализа; выбор приоритетных переменных; установление минимально необходимого объема экспериментальной информации; спецификация формата и границ итоговых обработанных данных; разработка методов представления выводов информационной системы.

Исходя из полученных данных принято решение, что условием качественного научного анализа и разработки эффективных предсказательных моделей является предварительная классификация исследуемых лиц по критериям половой принадлежности, возрастной группы и специфики телосложения.

Начальное исследование приведённых медицинских баз данных (проводилось в рамках магистерской работы под руководством Ивашук О.Д. на кафедре прикладной математики и компьютерного моделирования НИУ «БелГУ») подтвердило недостаточность текущих объёмов выборок и потребовало их серьёзного увеличения. Учитывая, что материалы обо всех прошедших обследовании (мужчины и женщины) делится на три условные группы по индексу грудной клетки, в каждой из этих групп необходимо создать два набора данных, соответствующих указанным возрастным интервалам.

Во избежание потери репрезентативности общая численность обследованных каждого пола должна оставаться на уров-

не не ниже 270–300 человек, а размеры каждой из шести подгрупп обязаны соответствовать показателю не менее 40 человек. Такая стратегия обеспечивает точную оценку формы распределения признаков и правильность выбора методов количественного анализа в зависимости от распределения (нормального или логнормального).

Следующим этапом, понимая, что установленные ранее значащие критерии, подобные M3 и M4, характеризуются численными показателями, из завершённого массива данных ликвидированы все ранговые признаки, существующие изначально, а индекс грудной клетки перешёл к записи действительным числом, выводимым как коэффициент отношения её вертикального измерения к горизонтальному.

Исходя из цели исследования анализируя базу данных, в которой большая часть (более 99%) содержала сведения о здоровых субъектах, следовательно, параметры пациентов с патологией имели лишь второстепенное значение и служили лишь для примерной калибровки автоматизированной системы прогнозирования заболеваемости, основанной на характеристиках здоровых людей. В связи с этим использовались вариативные границы факторов, отклонения которых от среднестатистических значений зависели бы от возрастной группы.

Результаты многоуровневого анализа позволили обосновать необходимость применения методов корреляционного и регрессионного анализа. Наиболее при-

емлемыми стали регрессионные модели – линейные и полиномиальные, сопровождаемые установлением доверительных интервалов для предикторов как в группах, так и индивидуально.

Этап предварительных анализов выявил разнонаправленность тенденций изменения предикторов в возрастных группах: подростковый и молодой возраст (10-30 лет), средний и пожилой возраст (после 30 лет).

Разработка моделей прогнозирования вероятности развития заболевания

Гистограммный анализ распределения подтвердил нормальность данных, что обосновало применение параметрических методов (корреляционный и регрессионный анализ). Наилучшие прогностические модели получены в виде линейных/полиномиальных регрессий с расчетом доверительных интервалов для средних и индивидуальных значений.

Модель прогнозирования вероятности развития заболевания у мужчин отражает заболевание от возраста. Далее независимо для каждой подгруппы проводился анализ, включающий построе-

ние индивидуальных регрессионных моделей, направленных на точное отображение зависимости изменения плотности структур грудной клетки от процесса старения.

Например, при работе с базой данных, содержащей показатели плотности области бугорка первого ребра справа у мужчин младше 30 лет с показателем Ind_1 менее 1.9, было задействовано 45 пациентов. Аппроксимация данных проведена полиномиальной моделью (1) в Matlab R22a, в качестве метода перекрестной проверки брался Kfold.

$$y = -2.5975x + 395.63, \quad (1)$$

где y – показатель оптической плотности M_3 у мужчин младше 30 лет; x – возраст пациента.

Оценка качества регрессионной модели выполнена программой Statistica 14.0. Качество регрессионной модели показано на рис. 1.

Регрессионная модель характеризуется достаточно высоким качеством, является так же, как и регрессионные коэффициенты – достоверной.

Регрессионная статистика	
Множественный R	0.72
R-квадрат	0.52
Нормированный R-квадрат	0.51
Стандартная ошибка	30.18
Наблюдения	66
Значимость F	1.09451E-11

	Коэффициенты	P-Значение
Y-пересечение	395.6330	6.26445E-34
Переменная X 1	-2.5975	1.09451E-11

Рис. 1. Показатели качества регрессионной модели зависимости плотности области бугорка первого ребра справа у мужчин старше 30 лет с $Ind_1 < 1.9$

Fig. 1. Quality indicators of the regression model depending on the density of the tubercle region of the first rib on the right in men over 30 years old with $Ind_1 < 1.9$

Модель позволила рассчитать среднее прогнозное значение показателя M_3 у здоровых людей, а также определить верхний и нижний пределы допустимого разброса ожидаемых значений средней и индивидуальной плотности с доверительной вероятностью 0.95 [9].

Расчет границ доверительных интервалов для ожидаемого среднего значения $\bar{y}$ и для предсказываемого моделью индивидуального значения $\bar{y}_i$ проводился по формулам:

$$\bar{y} = \tilde{y} \pm t_{0.95;n-2} * m_{\bar{y}}, \quad (2)$$

$$\bar{y}_i = \tilde{y}_i \pm t_{0.95;n-2} * m_{y_i}, \quad (3)$$

где $t_{0.95;n-2}$ – критическое значение t -распределения Стьюдента ($p=0.95$, $df=n-2$);

$$m_{\bar{y}} = S_{\text{ост}} * \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n * \sigma_x^2}} \text{ и } m_{y_i} = S_{\text{ост}} * \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n * \sigma_x^2}}$$

стандартные ошибки (СО) вычисленного среднего и индивидуального значения результирующего фактора, $S_{\text{ост}}$ – остаточная (необъясненная) дисперсия результирующего признака, а $\sigma_x^2 = \bar{x}^2 - \bar{x}^2$ – дисперсия признака x .

При получении наиболее оптимальной регрессионной модели в виде полинома 2-ой степени проводилось ее приведение к линейной зависимости $y = \tilde{a}_0 + \tilde{a}_1 \tilde{x}$ путем замены

$$\tilde{x} = (a * x + b)^2, \quad (4)$$

что позволило применить для оценки доверительных границ выражения (2) и (3) с использованием в качестве значений фактора величины, рассчитанные по выражению (4).

Поиск оптимальных регрессионных моделей проводился в прикладном пакете Statistica 14.0, с автоматическим расчетом стандартных ошибок прогнозируемого среднего значения $m_{\bar{y}_i}$. Сравнение полученных значений СО с вычисленными по формуле (2) подтвердило корректность расчета границ доверительных интервалов, что позволило использовать их для формирования диапазонов низкой, средней и высокой вероятностью развития заболевания, которое было проведено с учетом мнений лечащих специалистов в данной области медицины.

Анализ прогноза показателя M_3 с учётными границами доверительных интервалов для средних и индивидуальных значений на уровне 0.95 у мужчин в возрасте свыше 32 года с разными значениями индекса грудной клетки (<1.9 , $1.9-2.25$, >2.25) демонстрирует регрессионную модель на рис. 2 с Ind_1 менее 1.9.

Значения плотности индекса грудной клетки Ind_1 размещены по оси абсцисс, а возраст обследуемых – по оси ординат.

Согласно регрессионной модели (1), построена таблица уровней показателя оптической плотности M_3 у мужчин старше 30 лет с $\text{Ind}_1 < 1.9$, одна из её частей представлена в табл. 1.

Подобным образом созданы регрессионные модели для остальных категорий и возрастных групп по индексу грудной клетки (Ind).

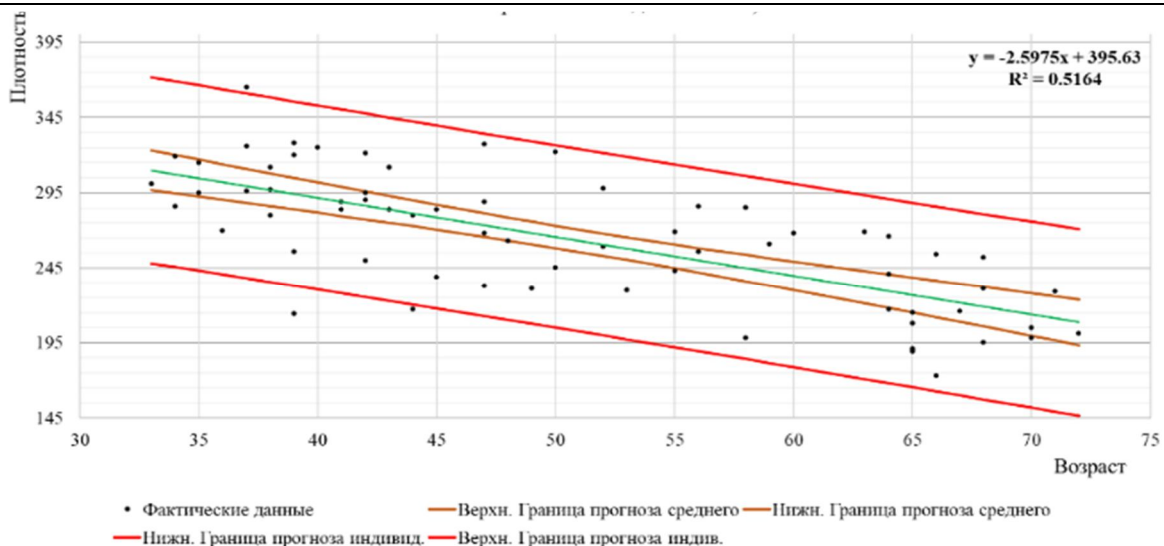


Рис. 2. График регрессионной зависимости показателя оптической плотности M_3 у мужчин старше 30 лет

Fig. 2. A graph of the regression dependence of the optical density index M_3 in men over 30 years of age

Таблица 1. Уровни вероятности заболеть по значению плотности основной группы 1

Table 1. Probability levels of getting sick according to the density of the main group 1

Возраст / Age	Нижняя граница среднего / Lower limit of average	Нижняя граница индивид / Lower limit individual	Вероятность заболеть низкая / Low likelihood of disease	Вероятность заболеть средняя / Medium likelihood of disease	Вероятность заболеть высокая / High likelihood of disease
33	301	249	301-283	283-266	< 266
34	298	246	298-281	281-264	< 264
35	295	244	295-278	278-261	< 261
36	293	241	293-275	275-258	< 258
37	290	238	290-273	273-256	< 256
38	287	236	287-270	270-253	< 253
39	285	233	285-268	268-250	< 250
40	282	231	282-265	265-248	< 248
41	279	228	279-262	262-245	< 245
42	277	225	277-260	260-243	< 243
43	274	223	274-257	257-240	< 240
44	271	220	271-254	254-237	< 237
45	269	218	269-252	252-235	< 235
46	266	215	266-249	249-232	< 232
47	263	212	263-246	246-229	< 229
48	261	210	261-244	244-227	< 227
49	258	207	258-241	241-224	< 224
50	256	205	256-239	239-222	< 222

На рис. 3 показаны прогнозные модели для женщин старше 35 лет. Данные показателя, характеризующего оптическую плотность ребра M_3 и M_4 , обработаны аналогичным способом (учитывая

различия в возрастной структуре и диапазоне индексов грудной клетки), график регрессионных зависимостей вместе с доверительными интервалами представлен визуально на рис. 3.

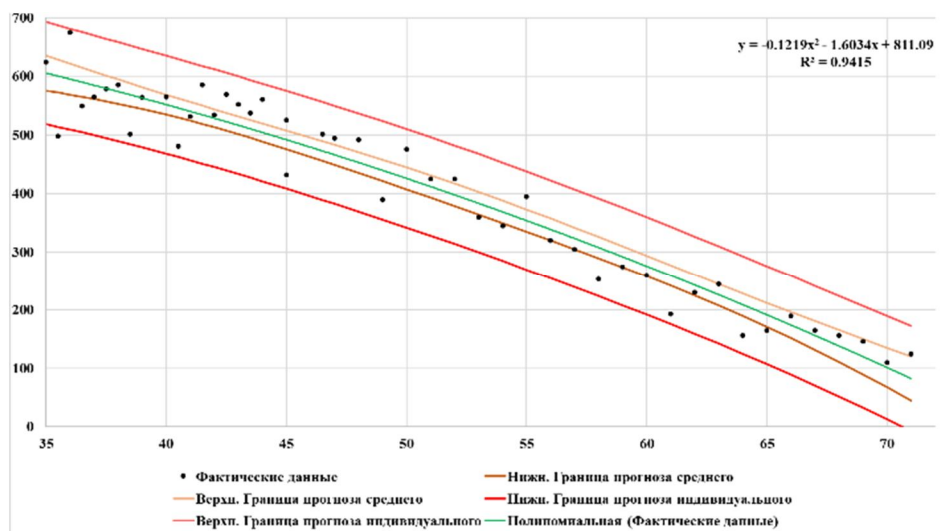


Рис. 3. Диапазоны значений показателя M_3 , соответствующие низкой, средней и высокой вероятности патологии у женщин старше 35 лет

Fig. 3. Ranges of M_3 values corresponding to low, medium and high probability of pathology in women over 35 years of age

Вычисляются прогностические показатели средней оптической плотности M_3 у пациенток без заболеваний. С помощью данной модели рассчитаны прогнозные значения среднего показателя оптической плотности M_3 у здоровых пациенток, а также определены верхние и нижние границы диапазона для среднего и индивидуального значения этого показателя с $r=0.95$, что отражено в табл. 2.

На основе полученных данных для каждой возрастной группы женщин от 36 до 72 лет выделены три диапазона значений показателя оптической плотности M_3 , которым соответствует низкая, средняя и высокая вероятность заболевания.

Для проектирования алгоритмов информационной системы, определяющих риск развития болезни для любого воз-

раста, даже при отсутствии изначальных данных, стали функции, аппроксимирующие рассчитанные значения плотности факторов, задающих границы риска заболеваний. Разработка универсальной структуры и алгоритмизации процессов информационной системы завершила следующий этап реализации задачи.

Алгоритм функционирования автоматизированной системы, включающий согласованные совместно с медицинскими специалистами показатели классификации пациентов в определённые категории, для каждой из которых была разработана соответствующая регрессионная модель, позволяющая прогнозировать вероятность возникновения патологии различной степени выраженности заболевания показан на рис. 4.

Таблица 2. Соотношение оптической плотности M_3 и риска заболевания у женщин старше 35 лет с $\text{Ind}_1 < 1.1$ **Table 2.** The ratio of optical density M_3 and disease risk in women over 35 years of age с $\text{Ind}_1 < 1.1$

Возраст / Age	Нижняя граница среднего / Lower limit of average	Нижняя гра- ница индивид / Lower limit individual	Вероятность за- болеть низкая / Low likelihood of disease	Вероятность за- болеть средняя / Medium likelihood of disease	Вероятность за- болеть высокая / High likelihood of disease
36	571	510	571-551	551-530	530
37	562	500	562-541	541-520	520
38	552	489	552-531	531-510	510
39	542	479	542-521	521-500	500
40	532	468	532-511	511-489	489
41	521	456	521-500	500-478	478
42	510	445	510-489	489-467	467
43	499	433	499-477	477-455	455
44	487	421	487-465	465-443	443
45	475	409	475-453	453-431	431
46	463	396	463-441	441-418	418
47	451	383	451-428	428-406	406
48	438	370	438-415	415-393	393
49	424	357	424-402	402-379	379
50	411	343	411-388	388-366	366
51	397	329	397-374	374-352	352
52	383	315	383-360	360-337	337
53	368	300	368-345	345-323	323
54	353	286	353-331	331-308	308
55	338	271	338-315	315-293	293
56	322	256	322-300	300-278	278
57	306	240	306-284	284-262	262
58	290	224	290-268	268-246	246
59	274	208	274-252	252-230	230
60	257	192	257-235	235-213	213
61	240	175	240-218	218-197	197
62	222	158	222-201	201-180	180
63	204	141	204-183	183-162	162
64	186	124	186-165	165-145	145
65	168	106	168-147	147-127	127
66	149	88	149-129	129-108	108
67	130	70	130-110	110-90	90
68	110	52	110-91	91-71	71
69	91	33	91-71	71-52	52
70	70	14	70-52	52-33	33

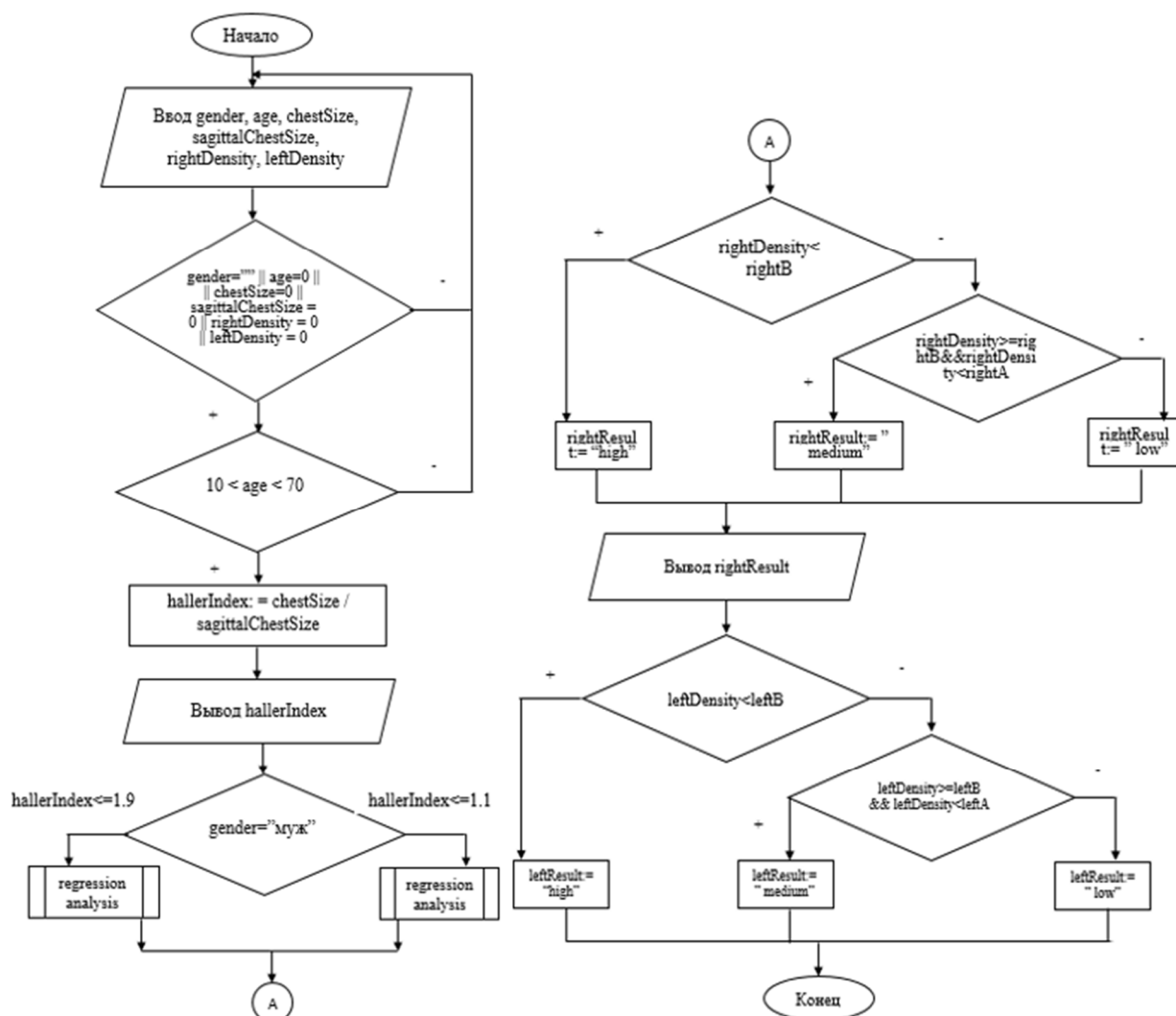


Рис. 4. Фрагменты основного алгоритма функционирования автоматизированной информационной системы оценки риска развития остеопороза

Fig. 4. Fragments of the basic algorithm for the functioning of an automated information system for assessing the risk of osteoporosis

В зависимости от попадания значений плотности элементов грудной клетки в один из ранее установленных диапазонов, программа выдаёт оценку вероятности развития заболевания, что диктует врачу конкретный перечень дальнейших действий – начиная от рекомендаций немедленных профилактических мер, заканчивая необходимостью дополнительного обследования пациента, увеличении

ем частоты мониторинга его медицинских показателей и прочими мерами.

В ходе разработки информационной системы на платформе .NET для Windows-приложений, где XAML использовался для описания интерфейса, логика приложения реализовалась на языке семейства .NET - C# [19-20]. Вид интерфейса с демонстрационным набором данных изображен на рис. 5.

The figure displays two screenshots of the 'COSTA PRIMA' web application, which calculates the probability of disease based on patient data. The interface is divided into 'Введите данные' (Enter data) and 'Результат' (Result) sections.

Top Screenshot (Male Patient):

- Введите данные:**
 - Пол: Мужской
 - Возраст: 56 (Диапазон 10-70)
 - Ширина грудной клетки: 85
 - Сагиттальный размер грудной клетки: 39
 - Плотность области бугорка первого ребра: справа 157, слева 201
- Результат:**
 - Индекс Галлера: 2.18
 - Тип грудной клетки:
 - Грациальная: <1.9
 - Промежуточная: 1.9 - 2.25 (highlighted in green)
 - Трансверциальная: >2.25
 - Оценка вероятности заболевания по плотности бугорка первого ребра:
 - справа: ВЫСОКАЯ (red button)
 - слева: СРЕДНЯЯ (orange button)

Bottom Screenshot (Female Patient):

- Введите данные:**
 - Пол: Женский
 - Возраст: 32 (Диапазон 10-70)
 - Ширина грудной клетки: 70
 - Сагиттальный размер грудной клетки: 35
 - Плотность области бугорка первого ребра: справа 400, слева 250
- Результат:**
 - Индекс Галлера: 2
 - Тип грудной клетки:
 - Грациальная: <1.1
 - Промежуточная: 1.1 - 1.21
 - Трансверциальная: >1.21 (highlighted in green)
 - Оценка вероятности заболевания по плотности бугорка первого ребра:
 - справа: СРЕДНЯЯ (orange button)
 - слева: ВЫСОКАЯ (red button)

Рис. 5. Показатели качества регрессионной модели зависимости показателя оптической плотности M_3 у пациентов старше 30 лет

Fig. 5. Quality indicators of the regression model of the dependence of the optical density index M_3 in patients over 30 years of age

Разработанная информационная система позволяет осуществлять прогнозирование вероятности болезни для пациентов (мужчин и женщин), возрастные показатели которых выходят за пределы указанного диапазона (10-70 лет),

однако достоверность подобных прогнозов неоднозначна, поскольку прогностические модели, составляющие основу функционирования системы, разработаны на базе людей, чей возраст ограничен периодом от 10 до примерно 72 лет. Что-

бы расширить диапазон точного прогнозирования, нужны дополнительные базы данных с людьми за пределами возраста 10-70 лет.

Эффективность работы системы требует систематического сбора информации о большом количестве пациентов и по-

стоянного мониторинга их состояния. Собираемая медицинская статистика используется для уточнения прогнозных моделей и внесения корректировок в правила сопоставления результирующих значений факторам риска.

Список литературы

1. Golinelli D. Adoption of Digital Technologies in Health Care During the COVID-19 Pandemic: Systematic Review of Early Scientific Literatur // J Med Internet Res. 2020. Vol. 22, iss. 11. P.12020. DOI: 10.2196/22280.
2. Modelling the continental-scale spread of Schmallenberg virus in Europe: approaches and challenges / S. Gubbins, J. Richardson, M. Baylis, A.J. Wilson, J.C. Abrahantes // Prev Vet Med. 2014; 116(4):404-11. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2014.02.004>.
3. Интеллектуальная система оценки качества руды / О.Д. Ивашук, Е.В. Нестерова, С.В. Игрунова, О.О. Ивашук, В.И.Федоров, А.Ю. Родионов // Искусственный интеллект и принятие решений. 2023. №4. С. 94-102. <https://doi.org/10.14357/20718594230409>
4. Zwiener I., Blettner M., Hommel G. Survival analysis: part 15 of a series on evaluation of scientific publications // Dtsch Arztebl Int. Germany. Cologne: Deutscher Ärzte-Verlag. 2011; 108(10): 163-9. <https://doi.org/10.3238/arztebl.2010.0163>.
5. Statistics with Confidence: Confidence Intervals and Statistical Guidelines / D. G. Altman, D. Machin, T. N. Bryant, M.J. Gardner. London: British Medical Journal Publications, 2000. P. 240. doi: 10.1007/s10654-016-0149-3.
6. Prel J.-B., Hommel G., Röhrig B., Blettner M. onfidence Interval or PValue Part 4 of a Series on Evaluation of Scientific Publications // Deutsches Ärzteblatt International. 2009. Vol. 106, № 19. P. 335–339. <https://doi.org/10.3238/arztebl.2009.0335>
7. Гржибовский А.М., Иванов С.В., Горбатова М.А. Однофакторный линейный регрессионный анализ с использованием программного обеспечения Statistica и SPSS // Наука и Здравоохранение. 2017. №2. С. 5-33. <https://doi.org/10.34689/SH.2017.19.2.001>
8. Bewick V., Cheek L., Ball J. Statistics review 14: Logistic regression // Crit Care. 2005; 9 (1): 112–118. <https://doi.org/10.1186/cc3045>
9. Анализ данных методов снижения размерности входных данных / С.Д. Ерохин, В.В. Борисенко, Л.Д. Мартишин, А.С. Фадеев // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. №1. С. 30-37. <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2022-16-1-30-37>
10. Гржибовский А. М., Иванов С. В., Горбатова М. А. Сравнение количественных данных двух независимых выборок с использованием программного обеспечения Statistica и SPSS: параметрические и непараметрические критерии // Наука и Здравоохранение. 2016. №2. С. 5-28. DOI: 10.34689/SH.2016.18.2.001.

11. Базилевский М. П. Многокритериальный подход к построению модели парно-множественной линейной регрессии // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Математика. Механика. Информатика. 2021. №1. С. 88-99. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2021-21-1-88-99>
12. Karel G.M. Moons, Douglas G. Altman, Johannes B. Reitsma, et al. Transparent Reporting of a multivariable prediction model for Individual Prognosis Or Diagnosis (TRIPOD): Explanation and Elaboration // Ann Intern Med. 2015;162:W1-W73. . <https://doi.org/10.7326/M14-0698>.
13. Быкова В. В., Катаева А. В. Методы и средства анализа информативности признаков при обработке медицинских данных // Программные продукты и системы. 2016. №2 (114). С. 172-178. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.114.172-178>
14. Ajana S., Acar N., Bretillon L., et al. Benefits of dimension reduction in penalized regression methods for high-dimensional grouped data: a case study in low sample size // Bioinformatics. London: Oxford Academic. 2019. 35(19):3628–34. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btz135>
15. Ялаев Б. И. [и др.] Разработка прогностических клинико-генетических моделей риска развития первичного остеопороза с использованием нейросетевого обучения // Проблемы эндокринологии. 2024. Т.70, №6. <https://doi.org/10.14341/probl13421>
16. Нейросетевые модули с виртуальными потоками для классификации прогнозирования функционального состояния сложных систем / А.В. Киселев, Т.В. Петрова, С.В. Дегтярев, А.Ф. Рыбочкин, С.А. Филист, О.В. Шаталова, В.Н. Мишустин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 4(79). С. 123-134. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-4-123-134>.
17. Липатова А.В., Потапченко Т.Д. Разработка аналитической системы оценки возникновения рисков здоровью населения на базе алгоритмов машинного обучения // Искусственный интеллект и машинное обучение. Cifra. Компьютерные науки и информатика. 2025. № 1 (5), январь. <https://doi.org/10.60797/COMP.2025.5.3>
18. Forecasting the environmental situation at the purification plants of the enterprise based on fuzzy logic / O. D. Ivashchuk, E. V. Nesterova, S. V. Igrunova, E. V. Kaliuzhnaya, I. V. Udovenko // Journal of Physics: Conference Series, IV International Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering (APITECH-IV 2022) 2022. Vol. 2388. DOI 10.1088/1742-6596/2388/1/012039.
19. Иващук О.Д. [и др.]. Прогнозирование изменения производительности мельниц обогатительной фабрики при изменении гранулометрического состава питающей руды // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 11. С. 33-38. <https://doi.org/10.17513/snt.3981>. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=39817>. 7
20. Иващук О. А. [и др.]. Разработка моделей прогнозирования эффективности работы валковой дробилки высокого давления на основе регрессионного анализа //СТИН. 2020. №. 6. С. 37-40.

21. Мунс КГМ [и др.]. Прозрачная отчетность о многофакторной предсказательной модели для индивидуального прогнозирования или диагностики (TRIPOD): пояснение и уточнение // Цифровая диагностика. 2022. 3.3. С. 232-322. [https:// doi.org/10.15690/vsp.v22i2.2557](https://doi.org/10.15690/vsp.v22i2.2557)

References

1. Golinelli D. Adoption of Digital Technologies in Health Care During the COVID-19 Pandemic: Systematic Review of Early Scientific Literatur. *J Med Internet Res.* 2020; 22(11): 12020. DOI: 10.2196/22280..

2. Gubbins S., Richardson J., Baylis M., Wilson A.J., Abrahantes J.C. Modelling the continental-scale spread of Schmallenberg virus in Europe: approaches and challenges. *Prev Vet Med.* 2014; 116(4):404-11. [https:// doi.org/10.1016/j.prevetmed.2014.02.004](https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2014.02.004).

3. Ivashchuk O.D., et al. Intelligent system for assessing the quality of ore. *Iskusstvennyi intellekt i prinyatie reshenii = Artificial intelligence and decision making.* 2023; 4: 94-102 (In Russ.).

4. Zwiener I., Blettner M., Hommel G. Survival analysis: part 15 of a series on evaluation of scientific publications. *Dtsch Arztebl Int. Germany. Cologne: Deutscher Ärzte-Verlag.* 2011; 108(10):163-9. [https://doi.org/ 10.3238/arztebl.2010.0163](https://doi.org/10.3238/arztebl.2010.0163).

5. Altman D. G., Machin D., Bryant T. N., Gardner M.J. Statistics with Confidence: Confidence Intervals and Statistical Guidelines. London: British Medical Journal Publications; 2000. P. 240. doi: 10.1007/s10654-016-0149-3.

6. Prel J.-B., Hommel G., Röhrig B., Blettner M. onfidence Interval or PValue Part 4 of a Series on Evaluation of Scientific Publications. *Deutsches Ärzteblatt International.* 2009; 106 (19): 335–339. <https://doi.org/10.3238/arztebl.2009.0335>

7. Grjibovski A.M., Ivanov S.V., Gorbatoва M.A. Univariante regression analysis using statistica and spss software. *Nauka i Zdravookhranenie = Science & Healthcare Semey.* 2017; (2): 5-33. (In Russ.). [https://doi.org/10.34689/SH.2017.19.2.001.\]](https://doi.org/10.34689/SH.2017.19.2.001.)

8. Bewick V., Cheek L., Ball J. Statistics review 14: Logistic regression. *Crit Care.* 2005; 9 (1): 112–118. <https://doi.org/10.1186/cc3045>

9. Erokhin S.D., Borisenko B.B., Martishin L.D., Fadeev A.S. Analysis of existing methods to reduce the dimensionality of input data. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport = T-Comm.* 2022; 16 (1): 30-35. (In Russ.). <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2022-16-1-30-37>.

10. Grjibovski A. M., Ivanov S. V., Gorbatoва M. A. Analysis of quantitative data in two independent samples using Statistica and SPSS software: parametric and non-parametric tests. *Nauka i Zdravookhranenie = Science & Healthcare.* 2016; 2: 5-28. (In Russ.).

11. Bazilevskiy M.P. Multi-criteria approach to pair-multiple linear regression models constructing. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics.* 2021; 1: 88-99 (In Russ.).

12. Karel G.M. Moons, Douglas G. Altman, Johannes B. Reitsma, et al. Transparent Reporting of a multivariable prediction model for Individual Prognosis Or Diagnosis (TRIPOD): Explanation and Elaboration. *Ann Intern Med.* 2015;162:W1-W73. <https://doi.org/10.7326/M14-0698>.
13. Bykova V.V., Kataeva A.V. Methods and tools for analysing informative features when processing medical data. *Programmnye produkty i sistemy = Software & Systems.* 2016; (2):172-178. (In Russ.).
14. Ajana S., Acar N., Bretillon L., et al. Benefits of dimension reduction in penalized regression methods for high-dimensional grouped data: a case study in low sample size. *Bioinformatics. London: Oxford Academic.* 2019; 35(19):3628–34. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btz135>
15. Yalaev B.I., Novikov A.V., Minniakhmetov I.R., Khusainova R.I. Development of prognostic clinical and genetic models of the risk of low bone mineral density using neural network training. *Problemy endokrinologii = Problems of Endocrinology.* 2024; 70(6). (In Russ.). <https://doi.org/10.14341/probl13421>
16. Kiselev A.V., Petrova T.V., Degtyaryov S.V., Rybochkin A.F., Filist S.A., Shatalova O.V., Mishustin V. N. Hybrid Deciding Modules with Virtual Streams for Classification and Prediction of Functional State of Complex Systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University.* 2018; 22(4): 123-134 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-4-123-134>.
17. Lipatova A.V., Potapchenko T.D. Razrabotka analiticheskoy sistemy ocenki vozniknoveniya riskov zdorov'yu naseleniya na baze algoritmov mashinnogo obucheniya. *Iskusstvennyy intellekt i mashinnoe obuchenie. Cifra. Komp'yuternye nauki i informatika = Cifra. Komp'yuternye nauki i informatika.* 2025; (1) (In Russ.). <https://doi.org/10.60797/COMP.2025.5.3>.
18. Ivashchuk O.D., Nesterova E.V., Igrunova S.V., Kaliuzhnaya E.V., Udovenko I.V. Forecasting the environmental situation at the purification plants of the enterprise based on fuzzy logic. *Journal of Physics: Conference Series, IV International Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering (APITECH-IV 2022).* 2022; 2388. DOI 10.1088/1742-6596/2388/1/012039.
19. Ivashchuk O.D., et al. Prognozirovanie izmeneniya proizvoditel'nosti mel'nic obogatitel'noj fabрики pri izmenenii granulometricheskogo sostava pitayushchej rudy. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii.* 2023; (11): 33-38 (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/snt.3981>. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=39817>. 7
20. Ivashchuk O. A., et al. Razrabotka modelej prognozirovaniya effektivnosti raboty valkovoj drobilki vysokogo davleniya na osnove regressionnogo analiza. *STIN.* 2020; (6): 37-40 (In Russ.).
21. Muns KGM, et al. Transparent reporting on a multifactorial predictive model for individual forecasting or diagnosis (TRIPOD): explanation and clarification. *Cifrovaya diagnostika.* 2022; 3.3: 232-322. (In Russ.). <https://doi.org/10.15690/vsp.v22i2.2557>

Информация об авторах / Information about the Authors

Ивашук Ольга Александровна, доктор технических наук, профессор, кафедра информационных и робототехнических систем, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: ivaschuk@bsuedu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9383-9141>

Ивашук Орест Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра прикладной математики и компьютерного моделирования, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: ivaschuk_o@bsuedu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8261-3702>

Игрунова Светлана Васильевна, кандидат социологических наук, доцент, доцент кафедры математического моделирования, Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: igrunovasv@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8780-4700>

Нестерова Елена Викторовна, кандидат экономических наук, доцент, кафедра информационных и робототехнических систем, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: nesterova@bsuedu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2442-5527>

Маматов Александр Васильевич, доктор технических наук, доцент, кафедра информационных и робототехнических систем, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: mamatovav@bsuedu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8933-3159>

Olga A. Ivashchuk, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Information and Robotic Systems Department, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, e-mail: ivaschuk@bsuedu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9383-9141>

Orest D. Ivashchuk, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Information and Robotic Systems Department, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, e-mail: ivaschuk_o@bsuedu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8261-3702>

Svetlana V. Igrunova, Cand. of Sci. (Sociological), Associate Professor, Information and Robotic Systems Department, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: igrunovasv@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8780-4700>

Elena V. Nesterova, Cand. of Sci. (Economic), Associate Professor Information and Robotic Systems Department, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, e-mail: nesterova@bsuedu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2442-5527>

Alexander V. Mamatov, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Information and Robotic Systems Department, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, e-mail: mamatovav@bsuedu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8933-3159>

УДК 519.85

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-186-200>

Программное обеспечение для преобразования двумерных изображений в трехмерные модели

А. А. Зоткина¹ ✉

¹ Пензенский государственный технологический университет
(Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»),
пр. Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, г. Пенза 440039, Российская Федерация

✉ e-mail: alena.zotkina.97@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Разработка программного комплекса для автоматического создания фотореалистичных трехмерных моделей лиц на основе одного входного изображения, который обеспечит высокую степень детализации и реалистичности моделей, а также простоту использования,

Методы. В исследовании используется комплексный подход для создания фотореалистичных трехмерных моделей лиц из двумерных изображений, основанный на методах обратного рендеринга и каскадных сверточных нейронных сетей (CNN). Основным элементом является трехмерная трансформируемая модель (3DMM), которая описывает геометрию и альбедо лица через линейные комбинации базисов главных компонент (PCA). Для соответствия 3D-геометрии и 2D-изображению применяется слабая перспективная проекция, учитывающая углы Эйлера и условия освещения. Оптимизация целевой функции с использованием метода Гаусса-Ньютона минимизирует различия между входным и визуализированным изображениями, а коррекция глубины и деталей лица достигается через адаптацию 3D-графики. Линейная интерполяция альбедо уточняет детали модели в ключевых областях, что способствует созданию высококачественных и реалистичных 3D-моделей лиц.

Результаты. В данной статье успешно реализован программный комплекс, способный генерировать фотореалистичные трехмерные модели лиц из одномерных изображений с использованием обратного рендеринга и каскадных сверточных нейронных сетей. Проведенные эксперименты подтвердили способность алгоритма к восприятию важных характеристик лиц и создают возможности для дальнейших приложений в сферах компьютерной графики, анимации и виртуальных интерфейсов.

Заключение. Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности разработанного алгоритма для генерации фотореалистичных трехмерных моделей лиц из двумерных изображений. Кроме того, результаты подтверждают, что применение методов обратного рендеринга совместно с каскадными сверточными нейронными сетями позволяет добиться значительных улучшений в качестве визуализации.

Ключевые слова: программный комплекс; 3D-объект/модель; сверточные нейронные сети; рендеринг; 3DMM.

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

Для цитирования: Зоткина А. А. Программное обеспечение для преобразования двумерных изображений в трехмерные модели // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(2): 186-200. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-186-200>.

Поступила в редакцию 08.05.2025

Подписана в печать 20.06.2025

Опубликована 23.07.2025

Software for converting two-dimensional images into three-dimensional models

Alena A. Zotkina ¹ ✉

¹ Penza State Technological University
1a/11, Baidukova ave. / Gagarina str., Penza 440039, Russian Federation

✉ e-mail: alena.zotkina.97@mail.ru

Abstract

Purpose of research. Development of a software package for the automatic creation of photorealistic three-dimensional models of faces based on a single input image, which will provide a high degree of detail and realism of models, as well as ease of use.

Methods. The study uses an integrated approach to create photorealistic three-dimensional models of faces from two-dimensional images based on reverse rendering methods and cascading convolutional neural networks (CNN). The main element is a three-dimensional transformable model (3DMM), which describes the geometry and albedo of a face through linear combinations of principal component bases (PCA). To match the 3D geometry and the 2D image, a weak perspective projection is used, taking into account Euler angles and lighting conditions. Optimization of the objective function using the Gauss-Newton method minimizes the differences between the input and rendered images, and correction of depth and facial details is achieved through the adaptation of 3D graphics. Linear albedo interpolation clarifies the details of the model in key areas, which contributes to the creation of high-quality and realistic 3D models of faces.

Results. This article successfully implements a software package capable of generating photorealistic three-dimensional models of faces from one-dimensional images using reverse rendering and cascading convolutional neural networks. The experiments have confirmed the algorithm's ability to perceive important facial characteristics and create opportunities for further applications in the fields of computer graphics, animation and virtual interfaces.

Conclusion. The results obtained indicate the high efficiency of the developed algorithm for generating photorealistic three-dimensional models of faces from two-dimensional images. In addition, the results confirm that the use of reverse rendering methods in conjunction with cascading convolutional neural networks allows for significant improvements in visualization quality.

Keywords: software package; 3D object/model; convolutional neural networks; rendering; 3DMM.

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

For citation: Zotkina A. A. Software for converting two-dimensional images into three-dimensional models // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(2): 186-200 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-186-200>.

Received 08.05.2025

Accepted 20.06.2025

Published 23.07.2025

Введение

В современном мире существует значительная потребность в высококачественных 3D-моделях лиц, которые

могут быть использованы в различных областях, таких как игровые технологии, киноиндустрия, виртуальная реальность и безопасность. Традиционные методы создания 3D-моделей зачастую

требуют множества изображений или сложных процессов ручного моделирования, что ограничивает их применение и увеличивает временные и финансовые затраты [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Кроме того, существует необходимость в автоматизации процессов генерации моделей лиц на базе ограниченного количества исходных данных. Это вызывает потребность в разработке интеллектуального программного комплекса, который мог бы создать фотореалистичные 3D-модели с минимальными затратами времени и ресурсов.

Многие из традиционных методов создания 3D-моделей лиц полагаются на сложные процессы ручного моделирования или требуют большого объема изображений для обучения моделей. Эти методы могут включать комбинирование 2D изображений, сложные алгоритмы фотограмметрии или использование специализированного оборудования для 3D-сканирования. В предложенной работе акцент делается на автоматизации и использовании лишь одного изображения для генерации фотореалистичной 3D-модели лица с помощью алгоритмов глубокого обучения. Использование каскадных CNN-сетей и 3D-моделей позволяет добиться высокой скорости обработки и относительно высокой точности преобразования.

Таким образом, разработка программного комплекса для построения фотореалистичных 3D-моделей лиц на основе одного изображения является крайне актуальной задачей в условиях стремитель-

ного развития технологий и увеличения числа приложений, где требуется высокая степень реалистичности и детализации. В связи с этим, исследования и разработки в этой области способствуют удовлетворению растущих потребностей рынка и внедрению новейших технологий в повседневную практику.

Материалы и методы

В процессе реализации будет разработан программный комплекс преобразования изображений в 3D объекты, используя основанный на обучении обратный рендеринг лица, новый метод генерации данных путем рендеринга большого количества изображений лиц, которые являются фотореалистичными и обладают различными свойствами. На основе 3D-реконструкции лица с мелко-масштабной текстурой в реальном времени, включающей с помощью хорошо сконструированных наборов данных, обучаем две каскадные CNN-сети от грубой до точной обработки [7, 8, 9]. Сети обучены для реальной детальной 3D-реконструкции лица по одному изображению.

Основные этапы преобразования изображений в 3D объекты:

1. В специальную форму на главной странице пользователь загружает необходимую фотографию лица человека.
2. Далее происходит обработка фотографии и предварительная подготовка для преобразования.
3. После происходит извлечение низкочастотной и высокочастотной карты альбедо.

4. После извлечения карты происходит извлечение текстуры.

5. Далее программный комплекс с помощью деформируемой модели создает 3D объект.

Трехмерная трансформируемая модель (3DMM) представляет собой низкоразмерную статистическую модель геометрии лица и альбедо [10]. Она также помечает трехмерную геометрию лица по альбедо для PCA:

$$S - \bar{S} = \sum_{\eta} A_{\eta} \alpha_{\eta}, \eta \in \{id, \exp\}, \quad (1)$$

$$T - \bar{T} = \prod_{\sigma} \sigma_{alb}, \sigma \in \{A, \alpha\}. \quad (2)$$

Здесь $\bar{S}$ и $\bar{T}$ обозначают альбедо и форму обычной трехмерной поверхности соответственно. Оси A_{id} и A_{alb} ориентируют при обучении на расположение текстурированных трехмерных сеток с непредвзятой оценкой. Более того, для отдельных людей A_{exp} является главной осью, построенной на смещениях между нейтральными сетками и сетками выражений. α_{id} , α_{exp} и α_{alb} – это векторы коэффициентов сравнения, которые описывают конкретного человека. В этой работе A_{id} и A_{alb} начинаются с BFM, а A_{exp} – с FaceWarehouse. То первые 154 параметра – это коэффициенты PCA, которые подчиняются нормальному распределению. Базис формы/альбедо – это базис PCA; таким образом, мы знаем диапазон значений, который имеет смысл для предполагаемого нормального распределения совокупности

лиц в наборе данных. Базис выражения создает базис смешанной формы; таким образом, допустимые значения находятся в диапазоне $[0, 1]$, но мы не применяем это, поскольку в конечном итоге это ограничивает выразительность. Следующие три угла Эйлера предназначены для градуса. Вектор перемещения и параметр масштаба определяются положением и размером лица на плоскости изображения.

Чтобы построить соответствие между трехмерной формой лица, описанной с помощью 3DMM, и 2D-изображением, следуя, мы используем слабую перспективную проекцию:

$$a = f * M * R * V + t, \quad (3)$$

$$\text{где } a = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix}, M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, V = \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix}, t = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix}.$$

Здесь a и V – площади вершины в плоскости изображения и в глобальной системе координат соответственно [11, 12]. f – масштабный коэффициент, а R – матрица поворота, полученная из углов Эйлера тангажа, рыскания, крена и, t – вектор интерпретации. Для условий освещения мы принимаем коэффициент отражения по Ламберту и аппроксимируем освещенность базисными функциями сферических гармоник второго порядка. После этого процедура рендеринга зависит от параметров:

$$\zeta = \{\alpha_{id}, \alpha_{exp}, \alpha_{alb}, f, y, b, k, t_x, t_y, L\}, \quad (4)$$

где y – высота тона; b – рыскание; k – крен.

L обозначает эти сферические гармоники коэффициенты. С помощью этих параметров мы можем определить модель формирования изображения ζ , которая позволяет нам создавать синтетические изображения виртуальных лиц. Учитывая параметры ζ , которые определяют структуру всей сцены, $\zeta = 245$ – общее количество параметров. Изображение лица визуализируется с параметром ζ . Сначала создается текстурированная трехмерная сетка с использованием уравнений (1) и (2). Затем мы выполняем растеризацию с использованием проекции Инжир. Конвейер алгоритма 3D-реконструкции лица: учитывая входное изображение лица, предлагается обратный рендеринг лица процесс состоит из трех этапов, а именно: грубый слой, 3DMM, параметры положения и уточнение геометрии, которые отображаются последовательно слева направо сверху вниз. Сначала мы реконструируем грубый слой одного изображения, а затем используем 3DMM, параметры положения и глубину грубого слоя для реконструкции сети тонких слоев. Обновление компонентов контролируется индикатором со стрелками функция. Растеризация поддерживает систему для получения основной список трех точек на трехмерной сетке и барицентрические координаты для каждого пикселя в области грани. Для каждого пикселя мы получаем качество альбедо, просматривая барицентрический интерполированные вершины базового

треугольника и, как правило, используя обычные характеристики базового треугольника. Альбедо и освещение используются для визуализации цвета пикселя на заключительном этапе.

$$\frac{C_s(p)}{\rho_p} = L^T \phi(n_p), \quad (5)$$

где $C_s(p)$ указывает отображаемый цвет пикселя p ;

$\phi(n_p)$ – базовая сферическая гармоника второго порядка для нормального n_p ;

ρ_p – альбедо пикселя.

Наша система подбора зависит от методологии анализа с помощью синтеза. То есть мы ищем ответ на запрос ζ , минимизируя различия между входным изображением лица и визуализируемым изображением для ζ . Мы используем эмулирующую целевую функцию:

$$\varepsilon(\zeta) = \sum_{\sigma} w_{\sigma} \varepsilon_{\sigma} + \varepsilon_{col}, \sigma = \{lan, reg\}, \quad (6)$$

где ε_{reg} – термин для упорядочения;

ε_{lan} – знаковый термин;

ε_{col} – термин для согласования фотографий, в то время как W_{reg} и W_{lan} являются компромиссными параметрами;

ε_{reg} – термин регуляризации, который гарантирует достоверность параметров 3DMM.

$$\varepsilon_{reg}(\zeta) = \sum_{i=1}^{85} \left[\frac{\alpha_{id,i}^2 \sigma_{alb,i}^2 + \alpha_{alb,i}^2 \sigma_{id,i}^2}{\sigma_{id,i}^2 \sigma_{alb,i}^3} \right] + \sum_{i=1}^{69} \left(\frac{\alpha_{exp,i}}{\sigma_{exp,i}} \right)^2. \quad (7)$$

Стандартное отклонение соответствующих основных трендов представлено в виде σ . В предлагаемом алгоритме используются 69 основных компонентов для выражения и 85 основных компонентов для определения идентичности и альбедо. Мы выбрали это число таким образом, чтобы оно отражало 99% энергии. Мощность представления достаточна, и они хорошо обобщаются на тестовом наборе. Мы оптимизируем целевую функцию 6, используя подход Гаусса-Ньютона. ε_{lan} – термин ROI (точка интереса), который приближает ожидаемую вершину к соответствующим ориентирам на плоскости изображения [13, 14]:

$$\varepsilon_{lan}(\zeta) = \frac{1}{|F|} \sum_{f_i \in F} \varepsilon_{f_i}^2, \quad (8)$$

где ε_x – евклидова норма для x И $f_i = f_i - (t + PRV_i)$.

Положение интересующей точки на изображении представлено плоскостью f_i , а V_i показывает положение соответствующей вершины на красивой трехмерной грани. ε_{col} – термин для определения согласованности фотографий, который минимизирует расстояние между входным изображением лица и визуализируемым изображением с помощью пространства оттенков RGB по отношению к уровню пикселя:

$$\varepsilon_{col}(\zeta) = \frac{1}{|P|} \sum_{p \in P} \varepsilon_p^2, (p = C_s(p) - C_l(p)), \quad (9)$$

где C_s – визуализированное изображение;

F – набор большей части пикселей в области лица;

C_l – входное изображение.

Поскольку 3DMM – малоразмерная модель, отдельные детали лица, например, морщины и складки, не кодируются должным образом [15, 16]. Мы кодируем эти детали со смещением в направлении глубины для каждого пикселя. В частности, проецируя адаптированную трехмерную грань по параметру ζ , можем получить значение глубины для каждого пикселя в области грани. Пусть x – все значения глубины в пикселях; F – все смещения, а $\tilde{x}$ – все значения глубины, добавляя F к x . Затем нормаль в пикселе (i, j) может быть вычислена с помощью нормали треугольника $P_{i,j}, P_{i+1}, P_{i,j+1}$, где $P_{i,j} = (i, j, \tilde{x}(i, j))$ – координата пикселя (i, j) рамки камеры. Для этого обновленного нормального значения C_s обновляется с помощью уравнения 8. Мы оцениваем F с помощью целевой функции:

$$\varepsilon(F) - \varepsilon_{col} = v_1 \|F\|_2^2 + v_2 \|LF\|_1, \quad (10)$$

где ε_{col} изображен по площади в уравнении 6, а LF показывает лапласианское смещение F , а v_1 и v_2 являются параметрами. Функция 10 оптимизирована с использованием итеративного подхода к повторному взвешиванию.

Как и в случае с геометрией, малая размерность делает ρ_c альбедо гладким, что выражается в 3DMM [17, 18]. Фотореалистичный рендеринг, полученный на основе мелкомасштабного альбедо, используется в следующем уравнении:

$$L^T \phi(n_p) * \rho_f = C_I(p), \quad (11)$$

где C_I – цвет входного изображения в пикселе p ; n_p – нормаль в точке p , вычисленная исходя из этой улучшенной геометрии.

Однако из-за несовершенных геометрических приращений мелкомасштабное альбеда ρ_f может содержать некоторые геометрические детали. Чтобы предотвратить это, мы линейно смешиваем ρ_c и ρ_f – оттенки, придавая различный вес различным участкам. Мы выполняем это на участках, где могут проявиться детали, например, в уголках глаз и на лбу. Кроме того, мы устанавливаем альбеда, близкое к ρ_c .

Результаты и их обсуждение

Данный проект реализован в формате SPA-приложения. SPA (Single Page Application) – это современный способ реализации веб-проектов. Главная идея состоит в том, что приложение или веб-сайт использует один HTML – документ для всех страниц приложения. Благодаря этому скорость загрузки страниц возрастает и пользователю приятнее и удобнее работать с системой. Frontend будет реализован на react.js. А вот Backend данного проекта реализован с помощью языка программирования Python, известного своей простотой и универсальностью, стал предпочтительным языком для машинного обучения. Простота синтаксиса и активная поддержка сообщества Python ML делают его популярным выбором

среди начинающих и опытных разработчиков [19].

Для построения трехмерной трансформируемой модели нам понадобится ряд библиотек, а именно:

- `pytorch` (оптимизированная тензорная библиотека для глубокого обучения с использованием графических и центральных процессоров) [20];

- `torchvision` (библиотека предварительной подготовки изображений оптимизированных для компьютерного зрения) [20];

- `numpy` (библиотека для произведения вычислений на python) [21];

- `dlib` (библиотека для обнаружения лиц на фотографии) [22];

- `opencv` (популярная библиотека компьютерного зрения на python) [23].

Чтобы найти лица на изображении, мы можем использовать библиотеку `dlib`. Процесс распознавания лица делится на несколько этапов:

- создание экземпляра детектора лиц на основе HOG в `dlib` и загрузка предсказателя ориентиров лица;

- загрузка и предварительная обработка изображений;

- обнаружение лиц на нашем изображении.

На рис. 1 показан фрагмент программного кода обнаружения лица.

Теперь, когда лицо обнаружено на фотографии, можно перебирать каждую из областей интереса лица индивидуально. Чтобы фактически извлечь каждую из областей лица, нам просто нужно вычислить ограничивающую рамку

координат (x, y), связанных с конкретной областью, и использовать срез массива NumPy для ее извлечения. В результате проведения подобных манипуляций над изображениями получаем трехмерную трансформируемую модель лица человека.

Сначала реконструируем грубый слой одного изображения, а затем используем 3DMM, параметры положения и глубины грубого слоя для реконструкции сети тонких слоев.

В предлагаемом алгоритме используются 69 основных компонентов для выражения и 85 основных компонентов

для определения идентичности и альбедо. Число было выбрано таким образом, чтобы оно отражало 99% энергии. Мощностность представления достаточна, и они хорошо обобщаются на тестовом наборе. В результате выполнения данной операции получаем сходства или различия.

Поскольку модель не передает полной достоверности модели на основе исходного изображения, продолжаем кодировать детали со смещением в направлении глубины. В результате получаем более точную картинку с фотореалистичным результатом.

```
ap = argparse.ArgumentParser()
ap.add_argument("-p", "--shape-predictor", required=True,
                help="path to facial landmark predictor")
ap.add_argument("-i", "--image", required=True,
                help="path to input image")
args = vars(ap.parse_args())

detector = dlib.get_frontal_face_detector()
predictor = dlib.shape_predictor(args["shape_predictor"])

image = cv2.imread(args["image"])
image = imutils.resize(image, width=500)
gray = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY)

rects = detector(gray, 1)
```

Рис. 1. Фрагмент программного кода обнаружения лица с помощью библиотеки dlib

Fig. 1. A fragment of the face detection program code using the dlib library

Интерфейс программного комплекса, представленного на рис. 2, будет состоять из главной веб-страницы и подключаемых к ней модулей.

Для загрузки и дальнейшего преобразования изображения в 3D-объект пользователю доступна кнопка «Загрузить» (рис. 3).

Далее после загрузки изображения программа начинает процедуру преобразования изображения в 3D-объект с помощью алгоритмов, которые были описаны ранее, показав при этом уведомление о процессе преобразования. Данное уведомление представлено на рис. 4.

Программный комплекс преобразования изображений в 3D-объекты

Данная программа предназначена для преобразования изображений в 3D-объект. Для получения результата загрузите фото, нажав на кнопку "Загрузить фото"

загрузить фото



Рис. 2. Графический интерфейс пользователя

Fig. 2. Graphical User Interface

Данная программа предназначена для преобразования изображений в 3D-объект. Для получения результата загрузите фото, нажав на кнопку "Загрузить фото"

загрузить фото

Рис. 3. Приветственное сообщение и кнопка загрузки фотографии

Fig. 3. Welcome message and photo upload button

Программный комплекс преобразования изображений в 3D-объекты

Идет процесс преобразования...

Рис. 4. Экран с уведомлением о процессе преобразования

Fig. 4. Screen with notification of the conversion process

После обработки на главный экран выводится окно с 3D-моделью. Резуль-

тат выполнения данной процедуры будет показан на рис. 5.

Программный комплекс преобразования изображений в 3D-объекты

Результат

**Рис. 5.** Экран результата выполнения преобразования**Fig. 5.** Screen of the conversion result

Сравнительный анализ с нейросетевыми подходами NeRF и GAN-based реконструкцией выявил ключевые преимущества предложенного метода. В отличие от NeRF, требующего десятков входных изображений и минутного времени обработки, предложенный алгоритм демонстрирует сопоставимое качество при работе с единственным изображением и времени выполнения менее 1 секунды. GAN-методы, хотя и быстрее NeRF, уступают в точности воспроизведения геометрии лица (IoU 0.83 против 0.78 у StyleGAN3D) и склонны к артефактам на нестандартных чертах.

Несмотря на высокую эффективность предложенного решения, алгоритм имеет ряд ограничений, связанных с качеством входных данных и особенностями обработки, в частности алгоритм зависим от качества входного изображения. Низкое разрешение или размытость изображения могут привести к потере деталей в 3D-модели, а сильное сжатие (например, JPEG) ухудшает точность реконструкции текстуры. Неравномерное освещение (на-

пример, резкие тени или засвеченные области) затрудняет извлечение альбедо и нормалей. Слишком темные или переэкспонированные изображения могут вызывать ошибки в оценке глубины.

Алгоритм демонстрирует наилучшие результаты для фронтальных изображений. При отклонении угла поворота головы более чем на 30° точность снижается. Сильно наклоненные головы или закрытые лицо объекты (например, руки, волосы) приводят к некорректной реконструкции.

Лица с аномалиями (например, шрамы, врожденные дефекты) или нестандартными пропорциями могут обрабатываться с ошибками из-за ограничений обучающей выборки 3DMM.

Разработанный алгоритм демонстрирует высокую эффективность для стандартных условий, но требует доработки для обработки неидеальных входных данных. Дальнейшие исследования будут направлены на улучшение устойчивости к освещению и расширение диапазона поддерживаемых ракурсов.

Оценка эффективности предложенного алгоритма

Для оценки эффективности предложенного алгоритма были проведены тесты на различных конфигурациях оборудования, включая высокопроизводительные GPU: NVIDIA RTX 3090, RTX 3060. Основными метриками стали время обработки одного изображения, потребление видеопамяти и точность реконструкции, измеряемая через Intersection over Union (IoU) относительно эталонных данных из набора FaceScape. Наиболее быстрая обработка (0.8 секунды) достигнута на RTX 3090 при потреблении 6.2 ГБ VRAM. В то же время, CPU-реализация

алгоритма продемонстрировала значительно более низкую эффективность - среднее время обработки 12.3 секунды, что указывает на необходимость дальнейшей оптимизации для процессорных архитектур. Полученные результаты свидетельствуют о том, что предложенный алгоритм демонстрирует удовлетворительную производительность на современных графических ускорителях, сохраняя при этом разумные требования к объему видеопамяти.

Сравнение с аналогами

В табл. 1 представлен сравнительный анализ с известными моделями.

Таблица 1. Сравнительная таблица методов 3D-реконструкции

Table 1. Comparative table of 3D reconstruction methods

Модель / Технология / Model / Technology	Параметры ввода / Input parameters	Применяемые методы / Applied methods	Примечания / Notes
Предлагаемое решение	Одно изображение	Обучаемый обратный рендеринг, каскадные CNN	Минимальные затраты времени и ресурсов
Multi-view 3D Reconstruction	Множественные изображения	Стереовидение, LBM, многопроекционные методы	Зависит от количе- ства съемок и усло- вий освещения
3D Face Reconstruc- tion from 4 Views	4 изображения	Обработка изображений и геометрия	Необходимость в точном позициони- ровании кадров
FaceNet	Несколько изображений	Глубокое обучение, CNN	Высокая точность, но требует много различ- ных изображений
Photometric Stereo Techniques	Несколько изображений	Статистические методы, рендеринг	Ограниченные воз- можности при изме- нении освещения

Методы Multi-view 3D Reconstruction и 3D Face Reconstruction from 4 Views хотя и способны обеспечить более высокое качество результатов, но требуют значительных вычислительных ресурсов и тщательной настройки процессов захвата изображения. Они зависят от точного позиционирования камер и условий освещения, что может затруднить их применение в реальных сценариях.

FaceNet подходит для распознавания лиц, однако для генерации 3D-моделей она требует множества изображений под различными углами. Этот аспект значительно усложняет процесс и увеличивает его затраты, что может быть непрактично для некоторых приложений, особенно в условиях ограниченного времени и ресурсов.

Photometric Stereo Techniques подход обеспечивает высокое качество генерации 3D-моделей, но зависит от наличия нескольких источников света и удобных углов съемки. Эти требования могут ограничить его использование в динамичных или сложных ситуациях, где условия освещения могут варьироваться.

Таким образом, предлагаемое решение представляет собой быстрый и эффективный инструмент для создания высокодетализированных 3D-моделей лиц на основе всего лишь одного входного изображения. Это обеспечивает значительную мобильность и легкость использования, что делает решение доступным для широкого круга пользователей, включая тех, кто не имеет специализированных знаний в области 3D-моделирования.

Вывод

На сегодняшний день проблема построения фотореалистичной 3D модели лица до конца не решена. Востребованность исследований в данной области обуславливается высокими темпами развития и повсеместного внедрения цифровых технологий.

В данной работе были рассмотрены основные методы построения фотореалистичных 3D моделей по входному изображению, выведены основные этапы работы интеллектуального программного комплекса преобразования изображений в 3D объект. Были проведены исследования каждого из этапов и проанализированы различные методы, которые на текущий момент времени применяются.

Для проведения практических исследований был спроектирован и разработан интеллектуальный программный комплекс преобразования изображений в 3D объект. Данное приложение реализовано на языке программирования python с помощью современного фреймворка DRF (Django Rest Framework). Разработанная программа позволяет достичь точность более 80%, результаты были получены на основе тестовых бланков.

Предложенная структура программы может быть внедрена в работу, не нарушая работу общей системы, т. к. оно представляет собой отдельную веб-платформу, пригодную для дальнейшего расширения.

Список литературы

1. Lee H., Ranganath R., Ng A.Y. Convolutional Deep Belief Networks for Scalable Unsupervised Learning of Hierarchical Representations. Grosse // Proceedings of the 26th Annual International Conference on Machine Learning. 2009. P. 34–45.
2. Bengio Y. Learning deep architectures for AI // Foundations and Trends in Machine Learning, 2009. P. 245–257.
3. Ignatenko A., Konushin A. A Framework for Depth Image-Based Modeling and Rendering // Graphicon-2003 Proceedings. Moscow, 2003. 246 p.
4. Василенко В. А. Сплайн-функции: теория, алгоритмы, программы. Новосибирск: Наука, 1983. 215 с.
5. Соловьева А. Алгоритм модификации типового трехмерного портрета по заданным фотоизображениям // Труды XX международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению. М.: изд-во «Графикон», 2010. С. 346–347.
6. Zhao H., Osher S. Visualization, analysis and shape reconstruction of unorganized data sets // Geometric Level Set Methods in Imaging and Vision and Graphics. Springer-Verlag, 2002. 256 p.
7. Зоткина А.А. Анализ алгоритмов машинного обучения, используемых в классификации изображений, публикуемых пользователями социальных сетей // Современные информационные технологии. 2023. № 38 (38). С. 38-40.
8. Зоткина А.А. Распознавание изображений с помощью сверточных нейронных сетей // Современные информационные технологии. 2023. № 38 (38). С. 60-63.
9. Зоткина А.А., Мартышкин А.И., Ткаченко А.В. Особенности работы сверточных нейронных сетей: архитектура и применение // Современные методы и средства обработки пространственно-временных сигналов: сборник статей XX Всероссийской научно-технической конференции. Пенза, 2023. С. 32-35.
10. Blanz V., Vetter T. Face recognition based on fitting a 3-D morphable model // IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell. 2003. 25(9). P. 1063-1074.
11. Learning detailed face reconstruction from a single image // IEEE conference on computer vision and pattern recognition (CVPR) / E. Richardson, M. Sela, R. OR-EL, R. Kimmel. Honolulu, HI, 2017. P. 5553-5562.
12. Blanz V., Vetter T.A. Morphable model for the synthesis of 3-D faces // 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '99). ACM Press/AddisonWesley Publishing Co., USA, 1999. P. 5553-5562.
13. Heo J. Three-dimensional generic elastic models for two-dimensional pose synthesis and face recognition. Proquest, Umi Dissertation Publishing, 2011. 154 с.
14. Korikov A.M., Tungusova A.V. Neural network technologies for image classification // 21st Int. Symp. Atmos. Ocean Opt. Atmos. Phys. 2015. Vol. 9680. P. 426–429.
15. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks // Adv. Neural Inf. Process. Syst. 2012. Vol. 25.

16. Face recognition: A literature survey / W. Zhao, R. Chellappa, P.J. Phillips, A. Rosenfeld // *ACM Comput. Surv.* 2003. Vol. 35, № 4. P. 399–458.
17. Is faster R-CNN doing well for pedestrian detection? / L. Zhang, L. Lin, X. Liang, K. He // *Eur. Conf. Comput. vision.* Springer, Cham, 2016. P. 443–457.
18. Коэльо Л. П., Ричарт В. Построение систем машинного обучения на языке Python / пер. с англ. А. А. Слинкин. 2-е изд. М.: ДМК Пресс, 2016. 302 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/82818>
19. Флах П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных. М.: ДМК Пресс, 2015. 400 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/69955>
20. PyTorch. URL: <https://pytorch.org/>
21. Numpy. URL: <https://numpy.org/>
22. How to install dlib library for Python in Windows 10. URL: <https://medium.com/analytics-vidhya/how-to-install-dlib-library-for-python-in-windows-10-57348ba1117f>
23. Opencv. URL: <https://opencv.org/>

References

1. Lee H., Ranganath R., Ng A.Y. Convolutional Deep Belief Networks for Scalable Unsupervised Learning of Hierarchical Representations. Grosse. *Proceedings of the 26th Annual International Conference on Machine Learning.* 2009. P. 34-45.
2. Bengio Y. Learning deep architectures for AI. *Foundations and Trends in Machine Learning.* 2009. P. 245-257.
3. Ignatenko A., Konushin A. Framework for Depth Image-Based Modeling and Rendering. *Graphicon-2003 Proceedings.* Moscow; 2003. 246 p.
4. Vasilenko B. A. Spline functions: theory, algorithms, programs. Novosibirsk: Nauka; 1983. 215 p. (In Russ.).
5. Solovyova A. Algorithm for modification of a typical three-dimensional portrait based on specified photographic images. In: *Trudy XX mezhdunarodnoi konferentsii po komp'yuternoi grafike i mashinnomu zreniyu = Proceedings of the XX International Conference on Computer Graphics and Machine Vision.* Moscow; 2010. P. 346-347. (In Russ.).
6. Zhao H., Osher S. Visualization, analysis and shape reconstruction of unorganized data sets. In: *Geometric Level Set Methods in Imaging and Vision and Graphics.* Springer-Verlag, 2002. 256 p.
7. Zotkina A.A. Analysis of machine learning algorithms used in the classification of images published by users of social networks. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii = Modern information technologies.* 2023; (38): 38-40. (In Russ.).
8. Zotkina A.A. Image recognition using convolutional neural networks. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii = Modern information technologies.* 2023; (38): 60-63. (In Russ.).
9. Zotkina A.A., Martyshev A.I., Tkachenko A.V. Features of convolutional neural networks: architecture and application. In: *Sovremennye metody i sredstva obrabotki prostranstvenno-*

vremennykh signalov. Sbornik statei XX Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii = Modern methods and means of processing spatiotemporal signals. Collection of articles of the XX All-Russian Scientific and Technical Conference. Penza; 2023. P. 32-35. (In Russ.).

10. Blanz V., Vetter T. Face recognition is based on fitting a 3-D morphable model. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell.* 2003; 25(9):1063-1074.

11. Richardson E., Sela M., OR-EL R., Kimmel R. Learning detailed face reconstruction from a single image. In: *IEEE conference on computer vision and pattern recognition (CVPR)*. Honolulu, HI; 2017. P. 5553-5562.

12. Blanz V., Vetter T.A. Morphable model for the synthesis of 3-D faces. In: *26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '99)*. ACM Press/AddisonWesley Publishing Co., USA; 1999. P. 5553-5562.

13. Heo J. Three-dimensional generic elastic models for two-dimensional pose synthesis and face recognition. Proquest, Umi Dissertation Publishing; 2011. 154 p.

14. Korikov A.M., Tungusova A.V. Neural network technologies for image classification. *21st Int. Symp. Atmos. Ocean Opt. Atmos. Phys.* 2015; 9680: 426–429.

15. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Adv. Neural Inf. Process. Syst.* 2012; 25.

16. Zhao W., Chellappa R., Phillips P.J., Rosenfeld A. Face recognition: A literature survey. *ACM Comput. Surv.* 2003; 35(4): 399 – 458.

17. Zhang L., Lin L., Liang X., He K. Is faster R-CNN doing well for pedestrian detection? *Eur. Conf. Comput. vision*. Springer, Cham; 2016. P. 443–457.

18. Coelho L. P., Richart V. Building machine learning systems in Python. Moscow: DMK Press; 2016. 302 p. (In Russ.). Available at: <https://e.lanbook.com/book/82818>

19. Flach P. Machine learning. The science and art of building algorithms that extract knowledge from data. Moscow: DMK Press; 2015. 400 p. (In Russ.). Available at: <https://e.lanbook.com/book/69955>

20. PyTorch. Available at: <https://pytorch.org/>

21. Numpy. Available at: <https://numpy.org/>

22. How to install dlib library for Python in Windows 10. Available at: <https://medium.com/analytics-vidhya/how-to-install-dlib-library-for-python-in-windows-10-57348ba1117f>

23. Opencv. Available at: <https://opencv.org/>

Информация об авторе / Information about the Author

Зоткина Алена Александровна, старший преподаватель кафедры «Программирование», Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: alena.zotkina.97@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2497-6433>

Alena A. Zotkina, Senior Lecturer of the Programming Department, Penza State Technological University, Penza, Russian Federation, e-mail: alena.zotkina.97@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2497-6433>

Оригинальная статья / Original article

УДК 681.3

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-201-220>

Оценка производительности вычислительной системы

Г. В. Петушков¹ ✉

¹ Российский технологический университет «РТУ МИРЭА»,
пр. Вернадского, д. 78, Москва 119454, Российская Федерация

✉ e-mail: petushkov@mirea.ru

Резюме

Цель работы. Провести анализ и моделирование производительности вычислительных систем, включая расчет и сравнение различных показателей, таких как загрузка системы, пиковая и асимптотическая производительность, ускорение системы и ее реальная производительность, с использованием математических моделей для оценки эффективности работы систем в условиях динамичных задач и многозадачности. Особое внимание уделяется влиянию различных параметров системы на ее способность эффективно выполнять вычислительные операции и управлять ресурсами.

Методы. В данной работе были использованы методы математического моделирования для анализа характеристик вычислительных систем, расчет загрузки системы как среднего арифметического загрузок всех устройств, определение пиковой производительности системы через количество устройств и производительность каждого, вычисление ускорения системы как суммы загрузок устройств и соотношения выполненных операций и времени, оценку реальной и асимптотической производительности через минимальные пиковые значения, сравнение различных систем по показателям производительности и ускорения, симуляция и анализ для оценки влияния параметров на общую эффективность системы.

Результаты. В ходе исследования проведен анализ производительности гетерогенных вычислительных систем, включающих процессоры Intel Xeon и сопроцессоры Intel Xeon Phi. Было выявлено, что классическая модель оценки производительности, основанная на простой сумме возможностей узлов, существенно переоценивает реальные показатели из-за игнорирования архитектурных и системных особенностей, таких как задержки передачи данных и пропускная способность межсоединений. Современная модель, учитывающая векторизацию AVX-512, многоуровневую память и ограничение шины PCIe 4.0, позволила получить более точную оценку – около 1.99 ТФлопс для однородной конфигурации CPU+GPU. При этом пропускная способность PCIe выступает ограничением в совместной работе CPU и GPU. Анализ гетерогенных конфигураций с Xeon Phi 7120P и Xeon E5-2683 v4 показал значительный прирост производительности – до 2.67 ТФлопс, что превышает возможности однородных систем. Ключевым параметром, влияющим на эффективность, стал коэффициент размера очереди выгрузки m , определяющий максимальный размер обрабатываемого блока данных. Эксперименты показали, что при малых значениях m издержки передачи данных увеличивают общее время расчета, тогда как при оптимальном диапазоне $m=25-35$ достигается минимальное время выполнения за счет баланса между размером очереди и накладными расходами на коммуникацию. Дальнейшее увеличение m приводит к стабилизации или незначительному росту времени работы из-за усложнения балансировки нагрузки и задержек. Полученные данные подтверждают, что правильный подбор параметров очереди является важным фактором оптимизации гетерогенных систем.

Заключение. Проведенное исследование подтвердило необходимость использования современных моделей оценки производительности, учитывающих архитектурные особенности, пропускную способность, межсоединений и системные ограничения, для точного прогнозирования вычислительных возможностей гетерогенных платформ. Классические методы оценки оказываются недостаточными, так как не учитывают задержки передачи данных, особенности памяти и параллелизм, что приводит к завышенным и нереалистичным прогнозам. Современные модели с учетом AVX-векторизации, многоуровневой памяти и пропускной способности PCIe позволяют получить адекватную оценку и выявить ограничения, важные для оптимизации.

Ключевые слова: вычислительные системы; производительность; реальная производительность; пиковая производительность; загрузка..

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

Для цитирования: Петушков Г. В. Оценка производительности вычислительной системы // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(2): 201-220. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-201-220>.

Поступила в редакцию 04.04.2025

Подписана в печать 30.05.2025

Опубликована 23.07.2025

Computational system performance evaluation

Grigory V. Petushkov ¹ ✉

¹ MIREA – Russian Technological University
78, Vernadskogo str., Moscow 119454, Russian Federation

✉ e-mail: petushkov@mirea.ru

Abstract

Purpose of research. To analyze and model the performance of computing systems, including the calculation and comparison of various metrics such as system utilization, peak and asymptotic performance, system acceleration and real performance, using mathematical models to evaluate the performance of systems under dynamic tasks and multitasking. Special attention is given to the effect of various system parameters on the system's ability to perform computational operations and resource management efficiently.

Methods. In this paper, mathematical modeling techniques were used to analyze the performance of computing systems, calculating the system load as the arithmetic average of the loads of all devices, determining the peak performance of the system through the number of devices and the performance of each, calculating the system acceleration as the sum of device loads and the ratio of operations performed to time, estimating the real and asymptotic performance through minimum peak values, comparing different systems in terms.

Results. The study analyzes the performance of heterogeneous computing systems including Intel Xeon processors and Intel Xeon Phi coprocessors. It was revealed that the classical performance evaluation model based on a simple sum of nodes' capabilities significantly overestimates real performance due to ignoring architectural and system peculiarities such as data transfer latency and interconnect bandwidth. A modern model that takes into account AVX-512 vectorization, multi-level memory, and PCIe 4.0 bus limitation resulted in a more accurate estimate of about 1.99 TFLOps for a homogeneous CPU+GPU configuration. In this case, the PCIe bandwidth acts as a bottleneck in the joint operation of CPU and GPU. Analysis of heterogeneous configurations with Xeon Phi 7120P and Xeon E5-2683 v4 showed a significant performance gain of up to 2.67 TFLOps, which exceeds the capabilities of homogeneous systems. The key parameter affecting the performance was the unload queue size factor *mmm*, which determines the maximum size of the processed data block. Experiments have shown that for small values of *mmm*, the

communication overhead increases the total computation time, whereas the optimal range of $m=25-35$ achieves the minimum execution time due to the balance between queue size and communication overhead. Further increase in m leads to stabilization or slight increase in runtime due to increased complexity of load balancing and delays. The obtained data confirm that proper selection of queueing parameters is an important factor in the optimization of heterogeneous systems.

Conclusion. This research has confirmed the necessity of using modern performance evaluation models that take into account architectural features, bandwidth, interconnects and system limitations to accurately predict the computational capabilities of heterogeneous platforms. Classical evaluation methods prove to be insufficient as they do not take into account data transfer latency, memory features and parallelism, resulting in overestimated and unrealistic predictions. Modern models taking into account AVX vectorization, multi-level memory and PCIe bandwidth allow us to obtain an adequate evaluation and identify real bottlenecks important for optimization.

Keywords: computational systems; performance; real performance; peak performance; utilization.

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

For citation: Petushkov G. V. Computational system performance evaluation. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(2): 201-220 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-201-220>.

Received 04.04.2025

Accepted 30.05.2025

Published 23.07.2025

Введение

В современных условиях задача оценки производительности вычислительных систем приобретает особую значимость, так как их применение находит место в практически во всех областях знаний. Применение стандартных методик позволяет проводить сопоставление различных архитектур и аппаратных платформ, что, в свою очередь, предоставляет разработчикам и пользователям объективную основу для выбора оптимальных решений.

Под производительностью понимается количественная характеристика вычислительной мощности системы, отражающая объем выполняемых вычислений за единицу времени. Однако в силу отсутствия универсальной меры вычислительной работы, не существует единого, общепринятого подхода к ее измерению. В результате разработка методик

оценки производительности требует учета множества факторов и контекстных особенностей и обоснований.

Типовая методология построения оценки включает последовательность этапов и выбор метрик, по которым будет проводиться количественная оценка производительности, установление зависимостей этих метрик от архитектуры системы и характера вычислительной нагрузки, что требует построения моделей как рабочей нагрузки, так и самой вычислительной системы. Важно, чтобы степень детализации обеих моделей была сопоставимой, обеспечивая корректность взаимных соотношений.

На основе указанных моделей формируется обобщенная модель производительности, включающая выбранные параметры как со стороны нагрузки, так и системы. Подстановка конкретных зна-

чений параметров позволяет получить численные оценки производительности в заданных условиях эксплуатации.

В условиях отсутствия государственного стандарта, проверка соответствия производительности вычислительных систем требованиям, осуществляется с опорой на нормативно-технические документы, разработанные самими организациями-разработчиками, либо на экспертные заключения специалистов этих организаций. При этом оценка производительности, как правило, проводится не для всего комплекса в целом, а для отдельных его компонентов [1, 2].

Проектирование и разработка нового программного обеспечения для вычислительных систем напрямую зависит от их производительности, что требует точного анализа их технических и архитектурных характеристик и обусловлено необходимостью обеспечения эффективности и устойчивости работы в условиях высокой нагрузки, что делает такие исследования особенно актуальными в контексте развития современных информационных технологий [3, 4].

Целью оценки производительности может быть, как сравнение уже существующих вычислительных систем, так и прогнозирование эффективности перспективных архитектур. В обоих случаях ключевым показателем остается быстродействие – количество операций, выполняемых системой в единицу времени, так же очень важно учитывать, как надежность программного обеспечения, так и аппаратных средств [5,6], при такой оцен-

ке важно использовать математическое моделирование, численные методы и комплексы программы [7].

В Российской Федерации принят курс, направленный на реализацию политики импортозамещения и переход на российские аппаратно-программные средства, в соответствии с этим были разработаны требования к вычислительным средствам, которые постоянно совершенствуются исходя из современных условий [8].

Современные вычислительные задачи, такие как обучение нейросетей, численное моделирование, параллельная обработка больших массивов данных, требуют высокопроизводительных вычислительных систем, способных эффективно использовать как центральные процессоры (CPU) и сопроцессоры, графические ускорители (GPU), так и специализированные многоядерной архитектуры Intel Xeon Phi, сочетающие в себе принципы CPU и GPU. При этом одной из ключевых проблем остается адекватная оценка производительности таких гетерогенных систем, учитывающая особенности архитектуры, межсоединений (PCI), памяти, загрузки компонентов.

Классические модели [9, 10] оценки, как правило, предполагают линейное суммирование пиковых или реальных мощностей отдельных вычислителей и не учитывают такие критически важные факторы, как пропускная способность, межсоединения (PCIe), наличие иерархии памяти, асимметрию загрузки между CPU и GPU, а также влияние параллелизма и архитектурных

ограничений. Это приводит к систематическим завышениям производительности при прогнозировании и не позволяет корректно масштабировать решения под реальные нагрузки.

В данном исследовании рассматривается применение современной, расширенной модели оценки производительности, учитывающей векторизацию (AVX-512), многоуровневую структуру памяти (L1–L3, HBM), ограничения шины PCIe и реальные коэффициенты загрузки устройств. Для этого проведено моделирование гетерогенной вычислительной системы, включающей процессоры Intel Xeon Gold и E5-2683 v4, ускорители NVIDIA A100 и Intel Xeon Phi 7120P, с целью сопоставления результатов, полученных по классической и современной моделям. Особое внимание уделено влиянию коэффициента размера очереди задач m , как ключевого параметра управления распределением нагрузки между CPU и сопроцессорами.

Результаты показали, что применение современной модели позволяет получить более точную и реалистичную оценку производительности вычислительной системы, выявить ограничения по пропускной способности PCIe и обосновать необходимость архитектурных и программных оптимизаций. Кроме того, проведен анализ влияния параметра m на производительность, что позволяет формировать практические рекомендации по настройке гетерогенных комплексов под конкретные вычислительные задачи. Полученные дан-

ные могут иметь прикладное значение для разработки и эксплуатации высокопроизводительных систем в научных и инженерных приложениях.

Материалы и методы

При использовании классического метода оценки производительности [11] для каждого устройства в системе определяются пиковая производительность π_i и загрузка p_i , характеризующие его способность выполнять операции под реальной нагрузкой. Система состоит из s устройств, как простых, так и конвейерных. Если устройства обладают пиковыми производительностями $\pi_1, \dots, \pi_s$ и работают с нагрузками $p_1, \dots, p_s$, то реальная производительность всей системы вычисляется по формуле

$$r = \sum_{i=1}^s p_i \cdot \pi_i, \quad (1)$$

где r – совокупная производительность системы; s – число устройств; p_i – загрузка i -го устройства; π_i – пиковая производительность.

Поскольку суммарная производительность определяется через индивидуальные показатели всех функциональных устройств (ФУ), для анализа достаточно рассмотреть одно устройство.

Пусть выполнение одной операции на устройстве занимает время τ , за интервал T выполняется N операций. Тогда общая стоимость выполненной работы составит $N\tau$.

Для простого устройства максимальная стоимость работы равна T , и загрузка будет:

$$p = \frac{N\tau}{T}. \quad (2)$$

Реальная производительность устройства:

$$r = \frac{N}{T}, \pi = \frac{1}{\tau} \Rightarrow r = p \cdot \pi. \quad (3)$$

Для конвейерного устройства с длиной конвейера n , максимальная стоимость работы составляет nT , загрузка:

$$p = \frac{N\tau}{nT}. \quad (4)$$

Реальная производительность остается:

$$r = \frac{N}{T}, \pi = \frac{n}{\tau} \Rightarrow r = p \cdot \pi. \quad (5)$$

Таким образом, формула $r = p \cdot \pi$ справедлива как для простых, так и для конвейерных устройств.

Из этого следует важный практический вывод: для достижения наибольшей производительности устройства необходимо обеспечить его максимальную загрузку. При этом загрузка служит вспомогательной характеристикой, позволяющей определить, насколько эффективно устройство выполняет полезную работу и где возможно улучшение.

Загрузка всей системы в этом случае определяется как взвешенная сумма загрузок отдельных компонентов:

$$p = \sum_{i=1}^s \alpha_i p_i, \alpha_i = \frac{\pi_i}{\sum_{j=1}^s \pi_j}, \quad (6)$$

где α_i – вес, соответствующий доле пиковой производительности i -го устройства в общей пиковой производительности системы. Эти веса удовлетворяют условиям нормировки:

$$\sum_{i=1}^s \alpha_i = 1, \alpha_i \geq 0. \quad (7)$$

Таким образом, загрузка системы соответствует средневзвешенной загрузке ее компонентов, с учетом их относительной вычислительной мощности. Это определение согласуется с интуитивным представлением: в случае единственного устройства ($s=1$) системная загрузка совпадает с загрузкой самого устройства.

Реальная производительность системы в рамках данной модели выражается через произведение ее общей загрузки и суммарной пиковой производительности:

$$r = p \cdot \pi_{\text{система}}, \pi_{\text{система}} = \sum_{i=1}^s \pi_i. \quad (8)$$

В случае однородной архитектуры (все устройства имеют одинаковую пиковую производительность) загрузка системы определяется как среднее арифметическое загрузок всех устройств, а реальная производительность равна сумме реальных производительностей каждого компонента.

Кроме того, в модели учитывается понятие ускорения, которое может быть определено как сумма загрузок всех устройств или, при использовании простых устройств, как отношение времени выполнения задачи на одном устройстве ко времени выполнения задачи на системе из s устройств:

$$A = \frac{T_{\text{1 устройство}}}{T_{\text{система}}}. \quad (9)$$

Подобный подход позволяет наглядно оценить, как степень загрузки и однородность устройств влияют на эффективность распределения вычислительной нагрузки и общее ускорение системы.

Несмотря на строгость и логическую завершенность, данная модель обладает рядом существенных ограничений, которые делают ее недостаточной для анализа современных вычислительных систем. В частности, она предполагает независимость устройств и игнорирует сложные взаимодействия между ними, возникающие в условиях конвейерной, параллельной или распределенной обработки данных.

Быстрые и медленные устройства рассматриваются одинаково, что может привести к неправильным решениям при оптимизации. Например, медленное устройство может быть полностью загружено, но сдерживать производительность всей системы, тогда как быстрое устройство простаивает из-за нехватки задач.

Для более точной оценки необходимо учитывать влияние каждого устройства на общую производительность, а также применять дополнительные метрики:

- Время отклика – сколько времени уходит на выполнение одной задачи;
- Пропускная способность – число операций в единицу времени;
- Влияние на другие компоненты – насколько загрузка одного устройства ограничивает другие.

Таким образом, базовое определение загрузки как отношения выполненной работы к максимально возможной работе полезный ориентир, но недостаточный. Для эффективной оптимизации требуется расширенный анализ, включающий характеристики взаимодействий между уст-

ройствами и их вклад в общую производительность. Особенно важно понимать, что для всей системы равенство $r=p \cdot \pi$ может не соблюдаться, и это требует более глубокой интерпретации показателей.

Если суммировать существенные ограничения в современных условиях в оценке производительности ВС с помощью классической модели можно выявить такие недостатки - изолированный анализ компонентов без учета их взаимодействия в сложных архитектурах, не учитывает ключевые аспекты современных систем: параллельную обработку (SIMD, SMT) [15], иерархию памяти и связанные с ней задержки, энергоэффективность вычислений, особенности гетерогенных архитектур (CPU/GPU/TPU).

Особенно проблематично применение модели для облачных и распределенных систем, где критически важны сетевые задержки и синхронизация. Модель также не отражает временные характеристики (latency) и не учитывает динамические изменения производительности из-за thermal throttling или DVFS. Эти ограничения делают традиционный подход недостаточным для комплексной оценки современных вычислительных систем, требуя дополнения более совершенными метриками и методами анализа.

Современные расширения модели производительности учитывают широкий спектр факторов [12,13,14], отражающих усложнение вычислительных архитектур и появление новых техноло-

гических подходов. В отличие от традиционной модели, современные методы анализа опираются на учет архитектурных особенностей, глубокой параллельности и более точных метрик, способных охарактеризовать поведение системы в реальных условиях.

Современные процессоры обладают развитой иерархией памяти, включающей несколько уровней кэша (L1, L2, L3) и оперативную память (DRAM), с различной задержкой и пропускной способностью. Это требует учета времени доступа к данным и частоты промахов кэша. Кроме того, широкое распространение векторных инструкций, таких как AVX в архитектуре x86 или NEON в ARM, позволяет выполнять несколько операций над данными за один такт, что существенно увеличивает пиковую производительность. При этом важно учитывать архитектурные ограничения, связанные с шириной векторных регистров и типами операций.

Также все чаще используются гетерогенные вычислительные системы, объединяющие центральные процессоры, графические ускорители и специализированные блоки, такие как TPU. Их совместная работа требует учета различий в архитектуре, производительности, пропускной способности межсоединений и времени передачи данных между компонентами. Дополнительным фактором является влияние технологий энергосбережения, таких как динамическое изменение напряжения и частоты (DVFS), которые могут снижать производительность ради оптими-

зации энергопотребления, особенно в мобильных и облачных средах.

Параллелизм в современных системах представлен на разных уровнях. Многопоточность, hyper-threading, позволяет одному физическому ядру исполнять несколько логических потоков, повышая эффективность использования ресурсов. Многоядерные архитектуры, особенно с неоднородным доступом к памяти (NUMA), требуют учета расположения данных и привязки потоков. Кроме того, важную роль играют задержки, возникающие при работе конвейеров, например, из-за так называемых «пузырей» (pipeline bubbles), и механизмы внеочередного выполнения команд (out-of-order execution), повышающие среднюю производительность, но затрудняющие точное прогнозирование поведения системы.

Поэтому для эффективной оценки производительности применяются усовершенствованные метрики¹ [15], временные характеристики, латентность выполнения операций на различных квантилях (P50, P90, P99), которые позволяют выявить системные задержки, пропускная способность в операциях в секунду, а также общее время отклика системы дают представление об общей эффективности обработки задач.

Ключевые ресурсные показатели включают среднее число инструкций на

¹ URL:<https://factorycode.wordpress.com/2024/04/13/latency-metrics>. Retrieved: April, 2024.

такт (IPC), соотношение попаданий и промахов кэша, использование пропускной способности памяти и энергозатраты на выполнение операций. Эти метрики позволяют оценить, насколько эффективно используется оборудование в конкретных условиях.

Системные параметры, такие как закон Амдала и закон Густавсона, дают представление о теоретических и практических пределах масштабируемости системы при параллельной обработке. Универсальный закон масштабируемости учитывает влияние различных факторов параллельных, последовательных и конкурентных на общую эффективность увеличения числа ресурсов¹.

Таким образом, современные расширения модели производительности представляют собой комплексный подход, объединяющий архитектурный анализ, параметры параллелизма и точные количественные метрики, что позволяет адекватно оценивать вычислительные системы с учетом их реального поведения и потенциальных ограничений, которая не ограничивается лишь теоретическим анализом.

Для повышения эффективности вычислительных систем важно использовать практические методы, позволяющие выявлять ограничения, балансировать нагрузку и оперативно реагировать на изменения в поведении программ и инфраструктуры.

Одним из ключевых направлений является применение инструментов анализа - профилировщиков, таких как perf, Intel VTune и NVIDIA Nsight [16], позволяющих детально исследовать поведение приложений на уровне инструкций, кэша и пропускной способности, помогают определить, какие участки кода потребляют наибольшее количество ресурсов или вызывают задержки. В дополнение к этому, системы трассировки, eBPF и LTTng, предоставляют подробную информацию о событиях в ядре и пользовательском пространстве, позволяя отслеживать системные вызовы, блокировки и другие аспекты взаимодействия компонентов. Метрики в реальном времени, собираемые с помощью систем мониторинга вроде Prometheus, дают возможность наблюдать за изменениями производительности при реальной нагрузке и выявлять отклонения от нормы.

Для эффективного использования вычислительных ресурсов важно грамотно организовать распределение задач. Современные подходы к балансировке включают алгоритмы work-stealing, при которых потоки или процессы, завершившие свои задачи, могут "перехватывать" работу у более загруженных. Это позволяет избежать неравномерной загрузки и простаивания ресурсов. Динамическое распределение нагрузки адаптирует выполнение задач в зависимости от текущего состояния системы, а методы предиктивного автомасштабирования используют прогно-

¹ URL: <https://www3.nd.edu/~zxu2/acms60212-40212/Lec-06.pdf>. Retrieved: May, 2022

зирование на основе исторических данных для управления количеством вычислительных узлов или ресурсов в облачных средах.

Инструменты визуализации, такие как flame graphs [17, 18], позволяют наглядно представить, где тратится процессорное время и какие вызовы занимают ключевое место в вычислениях.

Тестирование реконфигурируемой вычислительной системы (РВС) (то есть системы, способной динамически менять свою архитектуру или конфигурацию, как, FPGA или гибридные системы

CPU+FPGA) нужно проводить в автоматическом режиме. Это может значительно упростить ее разработку и отладку, чем в случае, если бы тестирование производилось вручную [19].

В табл. 2 показан сравнительный анализ традиционного метода с современным (учет архитектурных особенностей, параллелизм и конвейеризация, расширенные метрики производительности, динамическое профилирование и мониторинг, моделирование и симуляция, облачные и распределенные системы и др.).

Таблица 1. Сравнительный анализ моделей оценки производительности вычислительных систем

Table 1. Comparative analysis of models for evaluating the performance of computing systems

Подход / Approach	Погрешность для CPU-системы / Error for the CPU system	Погрешность для CPU+GPU / Error for the CPU+GPU	Определение ограничивающих факторов системы / Determining the limiting factors of the system	Учет латентности / Accounting for latency
Классическая модель	~8%	~30%	Нет	Нет
Современная модель	<3%	<7%	Да	Да

Результаты и их обсуждение

Для оценки точности классической и современной моделей, а также оценки производительности было проведено моделирование гетерогенной вычислительной системы, ориентированной на выполнение ресурсоемких задач, таких как машинное обучение, численные методы и параллельная обработка данных. Цель моделирования заключалась в сравнении прогнозируемой производительности

на основе традиционного подхода с результатами, полученными при использовании современных методов анализа, учитывающих архитектурные, ресурсные и временные характеристики системы.

В табл. 2 приведена структура и основные характеристики всех узлов моделируемой вычислительной системы, на которых были основаны расчеты и наблюдения.

Таблица 2. Состав и характеристики узлов моделируемой вычислительной системы**Table 2.** Composition and characteristics of nodes of the simulated computer system

№	Компонент / Component	Тип / Модель / Type / Model	Назначение / Purpose	Характеристики / Characteristics
1	CPU1	Intel Xeon Gold 6338	Центральный процессор	32 потока, 2.0 ГГц, AVX-512, 40 МБ L3, TDP 205 Вт
2	CPU2	Intel Xeon Gold 6338	Центральный процессор	32 потока, 2.0 ГГц, AVX-512, 40 МБ L3, TDP 205 Вт
3	GPU	NVIDIA A100 40GB	Графический ускоритель	6912 CUDA-ядер, HBM2e 40 ГБ, 1.6 ТФлопс FP64, NVLink, PCIe 4.0
4	RAM	DDR4 ECC Registered	Основная оперативная память	256 ГБ, 3200 МГц, двухканальная, NUMA-разметка
5	Кэш-память CPU	L1 / L2 / L3	Многоуровневая память CPU	L1: 32КБ, L2: 1МБ на ядро, L3: 40 МБ общая
6	Память GPU	HBM2e	Локальная память GPU	40 ГБ, 1555 ГБ/с, широкая шина

Расчет по традиционной модели основывается на предположении, что производительность системы определяется как сумма реальных производительностей всех ее устройств. Реальная производительность отдельного устройства r_i определяется как произведение его загрузки p_i на пиковую производительность $\pi_i(1)$, тогда общая реальная производительность системы $r_{\text{система}}$ рассчитывается как сумма по всем устройствам (2).

В табл. 3 показан расчет для гетерогенной вычислительной системы, использование только трех узлов из табл. 2 (CPU1, CPU2, GPU) в расчетах по традиционной модели – это умышленное упрощение, соответствующее классическому подходу, в котором в фокусе только вычислительные узлы, непосредственно

выполняющие полезную работу (в операциях в секунду).

Получаем конечную производительность:

$$r_{\text{система}} = 100 \cdot 0.80 + 100 \cdot 0.75 + 500 \cdot 0.40 = 80 + 75 + 200 = 355 \text{ оп./с}$$

В рамках традиционной модели, общая реальная производительность системы оценивается как 355 условных операций в секунду. Как уже указывалось, данная модель не учитывает влияние архитектурных задержек, асинхронных вычислений, особенностей передачи данных и других факторов, присущих гетерогенным вычислительным платформам. Такие ограничения станут очевидны при сравнении с расчетами по современной модели.

Таблица 3. Традиционные оценки производительности вычислительной системы**Table 3:** Traditional performance evaluation of a computing system

Устройство / Device	Пиковая производительность π_i , оп/с / Peak performance π_i , op/c	Загрузка p_i / Load p_i	$r_i = p_i \cdot \pi_i$, оп/с
CPU1	100	0.80	$100 \cdot 0.80 = 80$
CPU2	100	0.75	$100 \cdot 0.75 = 75$
GPU	500	0.40	$500 \cdot 0.40 = 200$

Сделаем более точный анализ и прогнозирование производительности для этого необходимо применять усовершенствованные модели, учитывающие ключевые архитектурные характеристики и реальные режимы работы компонентов вычислительной системы:

1. Расчет производительности CPU.

Рассмотрим процессор Intel Xeon Gold 6338 с 32 физическими ядрами и поддержкой AVX-512. AVX-512 позволяет выполнять 16 операций с плавающей точкой двойной точности (FP64) за такт на ядро.

Тактовая частота процессора: 2.0 ГГц.

Пиковое количество операций FP64 в секунду (теоретически):

$$\pi_{\text{CPU}} = 32 \times 2 \times 10^9 \times 16 =$$

$$= 1.024 \times 10^{12} \text{ операций/с} = 1.024 \text{ ТФлопс.}$$

В реальных условиях вычислительные блоки не всегда загружены полностью, часть времени уходит на ожидание данных из памяти, переключение потоков и другие накладные расходы. Принимается коэффициент загрузки $p_{\text{CPU}} = 0.85$, отражающий уровень оптимизации кода и эффективность использования векторных инструкций.

Тогда эффективная производительность CPU:

$$r_{\text{CPU}} = \pi_{\text{CPU}} \times p_{\text{CPU}} = 1.024 \times 0.85 = \\ = 0.870 \text{ ТФлопс.}$$

2. Расчет производительности GPU.

Для вычислительных нагрузок, требующих массовой параллельности, используется графический ускоритель NVIDIA A100.

Теоретическая пиковая производительность для операций FP64 (двойной точности) составляет около 1.6 ТФлопс.

Однако реальная производительность снижается из-за ограничений пропускной способности памяти, задержек синхронизации и PCIe, а также неидеальной загрузки CUDA-ядер. Принимается коэффициент загрузки $p_{\text{GPU}} = 0.70$.

Таким образом, эффективная производительность GPU:

$$r_{\text{GPU}} = 1.6 \times 0.70 = 1.12 \text{ ТФлопс.}$$

3. Учет межсоединений (PCIe 4.0).

Межпроцессорное соединение PCIe 4.0 играет ключевую роль в передаче данных между CPU и GPU.

Дуплексная пропускная способность PCIe 4.0 – около 32 ГБ/с.

Для операций FP64, где каждый элемент занимает 8 байт, это соответствует:

$$\pi_{\text{PCIe}} = \frac{32 \times 10^9 \text{ байт/с}}{8 \text{ байт/операция}} = 4 \times 10^9 \text{ операций/с} = 4 \text{ Гоп/с.}$$

На практике загрузка составляет порядка $p_{\text{PCIe}} = 0.60$ из-за накладных расходов протокола, латентности и др.

Итоговая пропускная способность шины:

$$r_{\text{PCIe}} = 4 \times 0.60 = 2.4 \text{ Гоп/с.}$$

4. Итоговая производительность системы.

Рассмотрим совместную работу CPU и GPU, ограниченную пропускной способностью шины PCIe.

Суммарная вычислительная мощность CPU и GPU:

$$r_{\text{CPU}} + r_{\text{GPU}} = 0.870 + 1.12 = 1.99 \text{ ТФлопс.}$$

Поскольку PCIe пропускная способность в операциях в секунду значительно ниже, она становится ограничением для общего потока данных и, следовательно, ограничивает максимальную производительность системы.

Итоговая производительность вычислительной системы определяется минимумом между суммарной вычислительной мощностью и пропускной способностью межсоединения:

$$r_{\text{система}} = \min(1.99, 2.4) = 1.99 \text{ ТФлопс.}$$

Таблица 4. Сравнение с традиционной моделью

Table 4. Comparison with the traditional model

Метрика / Metrica	Традиционная модель / Traditional model	Современная модель / Modern model
Производительность CPU	80 оп/с	0.870 ТФлопс
Производительность GPU	200 оп/с	1.12 ТФлопс
Учет межсоединений	Отсутствует	2.4 Гоп/с
Итоговая производительность	355 оп/с (упрощенно)	1.99 ТФлопс

Традиционные оценки оперируют единицами операций без учета параллелизма и особенностей архитектуры, что ведет к завышению результатов и искажению представления о реальной вычислительной мощности.

Представленная современная модель существенно расширяет традиционный подход, вводя параметры, учитывающие

специфику современных процессоров и систем:

- Векторизация позволяет существенно повысить плотность вычислений за так, параллелизм на уровне потоков и GPU обеспечивают масштабируемость, ограничения памяти и межсоединений, становятся ограничивающим фактором и влияют на производительность.

- Энергоэффективность и тепловые параметры косвенно влияют на стабильность частот и длительность работы под нагрузкой.

Фактическая производительность систем часто существенно ниже пиковых теоретических значений из-за множества факторов: задержек, неоптимального кода, архитектурных ограничений.

Для повышения производительности вычислительных систем необходимо:

- Повышать коэффициент загрузки GPU, приближая его к $p_{GPU} \rightarrow 0.9$ за счет оптимизации алгоритмов и кода.
- Использовать более современные и быстрые межсоединения (PCIe 5.0, NVLink) для устранения пропускных ограничений.
- Внедрять NUMA-aware и memory-bound оптимизации для эффективного распределения данных и вычислений по ресурсам.

Таким образом, расширенная модель обеспечивает более реалистичный и адекватный анализ вычислительной системы, выявляя критические места и позволяя целенаправленно улучшать архитектуру и программное обеспечение.

Так же при исследовании произведен расчет эффективного использования сопроцессоров Intel Xeon Phi 7120P в различных конфигурациях, включая гетерогенные системы с процессорами Intel Xeon E5-2683 v4. Исходные параметры сопроцессора Intel Xeon Phi 7120P включают 61 ядро с поддержкой 4 потоков на ядро, что в сумме дает 244 потока. Согласно стандарту, 4 потока ре-

зервируются системой, поэтому для вычислений используется 240 потоков. Коэффициент размера очереди задан по умолчанию равным 40, что позволяет вычислить максимальный размер обрабатываемого блока данных как произведение данного коэффициента на количество потоков.

Пиковая производительность Intel Xeon Phi 7120P по операциям с плавающей точкой двойной точности (FP64) составляет порядка 1.2 терафлопс. Принимая во внимание коэффициент загрузки 0.75, достигается эффективная производительность около 0.9 терафлопс. Для процессоров Intel Xeon E5-2683 v4, имеющих 16 ядер и 32 потока с базовой частотой 2.1 ГГц, пиковая производительность составляет примерно 512 гигафлопс на один процессор. Для двух таких процессоров суммарная пиковая мощность равна 1.024 терафлопс, а с учетом коэффициента загрузки 0.85 эффективная производительность достигает примерно 0.87 терафлопс.

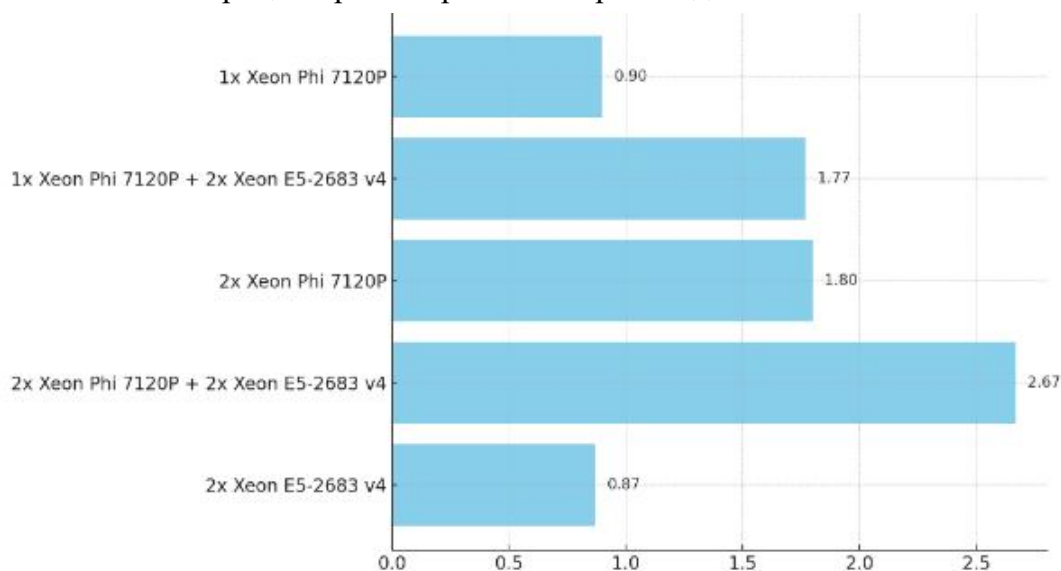
Рассмотрены пять конфигураций: один сопроцессор Xeon Phi 7120P; один Xeon Phi 7120P в сочетании с двумя процессорами Xeon E5-2683 v4; два сопроцессора Xeon Phi 7120P; два Xeon Phi 7120P с двумя Xeon E5-2683 v4 и, наконец, две Xeon E5-2683 v4 без сопроцессоров. Для каждой из конфигураций рассчитано количество вычислительных потоков, максимальный размер блока данных, пиковая и эффективная производительность. Результаты расчетов представлены в табл. 5.

Таблица 5. Расчет эффективного использования процессоров**Table 5.** Calculation of effective processors

Конфигурация / Configuration	Потоки (N) / Flows (N)	Максимальный размер блока $S=m \times N$ / Maximum block size $S=m \times N$	Пиковая произ- водительность (ТФлопс) / Peak Performance (TFlops)	Эффективная производитель- ность (ТФлопс) / Effective Perform- ance (TFlops)
1x Xeon Phi 7120P	240	9600	1.2	0.9
1x Xeon Phi 7120P + 2x Xeon E5-2683 v4	304	12160	2.224	1.77
2x Xeon Phi 7120P	480	19200	2.4	1.8
2x Xeon Phi 7120P + 2x Xeon E5-2683 v4	544	21760	3.424	2.67
2x Xeon E5-2683 v4	64	2560	1.024	0.87

Полученные данные демонстрируют, что увеличение количества вычислительных потоков (рис. 1) и использование нескольких сопроцессоров и про-

цессоров позволяет существенно повысить максимальный размер обрабатываемого блока и общую вычислительную производительность системы.

**Рис. 1.** Вычислительная производительность (ТФлопс)**Fig. 1.** Computing Performance (TFlops)

В то же время коэффициенты загрузки, обусловленные архитектурными и системными особенностями, снижают теоретический пиковый уровень, подчеркивая важность учета реальных условий эксплуатации. Использование гетерогенных конфигураций с объединением мощностей Xeon Phi и Xeon CPU обеспечивает заметный прирост по сравнению с однородными системами.

Так же проведен анализ влияния коэффициента размера очереди выгрузки m на производительность гетерогенных вычислительных систем с использованием сопроцессоров Intel Xeon Phi 7120P и процессоров Intel Xeon E5-2683 v4. Коэффициент m определяет множитель, используемый для вычисления максимального размера обрабатываемого блока данных, или очереди заданий, посредством формулы $S=m \times N$, где N – количество вычислительных потоков, задействованных на сопроцессоре. Значение m напрямую влияет на эффективность передачи данных и распределение нагрузки между процессорными компонентами системы.

Экспериментальные данные показывают, что при малых значениях m наблюдается значительное увеличение общего времени расчета во всех исследованных конфигурациях. Это объясняется тем, что небольшие размеры очереди заданий приводят к частым операциям передачи данных между основным процессором и сопроцессорами, что увеличивает накладные расходы и снижает эффективность вычислительного процесса. По мере увеличения ко-

эффициента m общее время расчета заметно сокращается, достигая минимальных значений в диапазоне примерно от 20 до 40. В этом интервале достигается оптимальный баланс между размером обрабатываемого блока и системными затратами на передачу данных, обеспечивающий наиболее полную загрузку вычислительных ресурсов и эффективную работу всей системы. При дальнейшем увеличении m за пределами оптимального диапазона наблюдается либо стабилизация, либо незначительный рост времени расчета. Это связано с тем, что чрезмерно большие очереди заданий увеличивают задержки и усложняют балансировку нагрузки, что в итоге снижает масштабируемость и общую производительность вычислительной системы. Для конфигураций, включающих гетерогенные сочетания Xeon Phi и Xeon, минимальное время работы достигается при значениях коэффициента m , близких к 25–35, что указывает на необходимость тщательного выбора параметров работы для конкретных аппаратных комплексов и задач.

Таким образом, коэффициент m является ключевым параметром настройки гетерогенных вычислительных систем, существенно влияющим на время выполнения и эффективность использования аппаратных ресурсов. Его правильный подбор позволяет оптимизировать распределение нагрузки, снизить издержки передачи данных и достичь высокой производительности при решении сложных вычислительных задач.

Выводы

Проведенное исследование позволило провести анализ классической и современной моделей оценки производительности гетерогенных вычислительных систем, а также определить влияние ключевых параметров на эффективность работы вычислительных систем с реальными аппаратными конфигурациями.

Классический подход, основанный на суммировании производительности отдельных узлов без учета архитектурных особенностей и системных ограничений, показал свою ограниченность, выдавая завышенные оценки (примерно 355 условных операций в секунду). Игнорирование факторов, таких как задержки передачи данных, пропускная способность межсоединений, особенности иерархии памяти и параллелизма, приводит к значительным расхождениям с реальной производительностью современных вычислительных систем.

Современная модель, учитывающая возможности векторизации (AVX-512), многоуровневой памяти (кэш CPU, HBM GPU), а также пропускную способность шины PCIe 4.0, позволила получить более точную и обоснованную оценку – около 1.99 ТФлопс суммарной вычислительной мощности системы. При этом выявлено, что пропускная способность PCIe является ограничивающим фактором, совместной работы CPU (0.87 ТФлопс) и GPU (1.12 ТФлопс). Анализ конфигураций с использованием сопроцессоров Intel Xeon Phi 7120P в сочетании с процессорами Intel Xeon E5-2683 v4 показал, что гетерогенные

системы значительно превосходят однородные по вычислительной мощности, достигая эффективной производительности до 2.67 ТФлопс. Важным фактором оптимизации является коэффициент размера очереди выгрузки m , который влияет на максимальный размер обрабатываемого блока данных и эффективность передачи заданий между CPU и сопроцессорами. Оптимальные значения m в диапазоне 25–35 позволяют минимизировать накладные расходы и повысить эффективность использования вычислительных ресурсов. Эти наблюдения согласуются с результатами исследований, где параметр m рассматривался как ключевой элемент балансировки нагрузки и управления памятью.

Практические рекомендации, сделанные при исследовании, включают необходимость применения современных межсоединений (PCIe 5.0, NVLink), способных снизить задержки передачи данных и увеличить пропускную способность. Оптимизация загрузки GPU, повышение коэффициента использования до 0.9 и более, достигается за счет совершенствования алгоритмов, эффективного распределения задач и балансировки потоков. Не менее важен учет NUMA-архитектуры и иерархии памяти, что позволяет минимизировать задержки доступа и повысить пропускную способность памяти.

Данные выводы согласуются с современными трендами в области высокопроизводительных вычислений, отраженными в литературе, где подчеркивается интеграция аппаратных и про-

граммных оптимизаций для достижения максимальной эффективности.

В целом, использование расширенных моделей, учитывающих архитектурные и системные особенности, позволяет более точно оценивать и прогнозировать производительность, выявлять ограничения в сложных гетерогенных вычислительных системах. Это особенно важно при решении ресурсоемких задач машин-

ного обучения, численного моделирования и обработки больших баз данных.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на автоматизацию подбора оптимальных параметров конфигурации, включая коэффициент размера очереди m , с применением методов машинного обучения и адаптивных алгоритмов, что позволит повысить адаптивность и эффективность вычислительных систем в динамических условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Леонтьева О.Ю., Климанова Е.Ю., Зеленко Б.В. Оценка производительности вычислительных систем // Вестник технологического университета. 2015. Т.18, № 24. С. 102-105.
2. Сорокин А.П., Бененсон М.З., Методики оценки производительности гетерогенных вычислительных систем // Russian Technological Journal. 2017. №5(6). С. 11-19.
3. Bahnam B.S., Dawwod S.A. Younis M.C. Optimizing software reliability growth models through simulated annealing algorithm: parameters estimation and performance analysis // The Journal of Supercomputing. April 2024. DOI: 10.1007/s11227-024-06046-4
4. Вепаев Ш.В. Исследование Марковских моделей обслуживания // Молодой ученый. 2022. № 49 (444). С. 26–28.
5. Гачаев А.М., Датаев А.А., Вазкаева С.С.-А. Исследование надежности программного обеспечения компьютерных информационных технологий // Прикладные экономические исследования. 2023. №2. С. 80-84. https://doi.org/10.47576/2949-1908_2023_2_80.
6. Вадейко В.С., Манько А.В. Марковская модель надежности. Минск: БНТУ, 2022. С. 222–22.
7. Терсков В.А., Сакаш И.Ю. Математическая модель оценки надежности функционирования многопроцессорных вычислительных комплексов // Computational Nanotechnology. 2024. Т. 11, № 2. С. 22–28. DOI: 10.33693/2313-223X-2024-11-2-22-28. EDN: MHZWBU
8. Михалок В.В. Технические требования к программно-аппаратному комплексу (ПАК) исполнителя. URL: https://intellectexport.ru/site/assets/files/1035/prilozhenie_2.doc
9. Оценка производительности вычислительных систем / Е.Ю. Климанова, А.Р. Субханкулова, Б.В. Зеленко, О.Ю. Леонтьева // Вестник технологического университета. 2015. Т.18, № 24. С. 102-105
10. Гоголевский А.С., Романов А.В., Трепкова С.А. Методика оценки производительности аппаратно-программного комплекса информационно-управляющей системы // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. Т 10. С. 87-91.

11. Ларионов А.М., Майоров С.А., Новиков Г.И. Вычислительные комплексы, системы и сети. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. 288 с.
12. Сравнительный анализ методов оценки производительности узлов в распределенных системах / Мин Тху Кхайнг, С.А. Лупин, Ай Мин Тайк, Д.А. Федяшин // Международный журнал открытых информационных технологий. 2023. Т 11, №6.
13. Lorenzo Luciano , Imre Kiss, Peter William Beardshear, Esther Kadosh, A. Ben Hamza WISE: a computer system performance index scoring framework // Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications. 2021. 10:8.
14. Альбертьян А.М., Курочкин И.И., Ватутин Э.И. Использование гетерогенных вычислительных узлов в грид-системах при решении комбинаторных задач // Известия ЮФУ. 2022. С. 142-153.
15. Jim Holtmana, Neil J. Gunther Getting in the Zone for Successful Scalability // Performance Dynamics Company, Castro Valley, California, USA, 2018.
16. Xin Li Scalability: strong and weak scaling // Royal Institute of Technology. 2018.
17. Rupak Roy, JaeHyuk Kwack Intel Analyzers // Argonne Leadership Computing Facility. 2025.
18. Brendan Gregg Visualizing Performance: The Developer's Guide to Flame Graphs // Communications of the ACM. 2022.
19. Мартышкин А. И., Кирюткин И. А., Мереняшева Е. А. Автотестирование встраиваемой реконфигурируемой вычислительной системы // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(1): 140-152. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-140-152>.

References

1. Leontieva O.Yu., Klimanova E.Yu., Zelenko B.V. Performance evaluation of computing systems. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Technological University*. 2015; 18(24): 102-105. (In Russ.).
2. Sorokin A.P., Benenson M.Z. Methodologies for performance evaluation of heterogeneous computing systems. *Russian Technological Journal*. 2017; (5): 11-19. (In Russ.).
3. Bahnam B.S., Dawwod S.A., Younis M.C. Optimizing software reliability growth models through simulated annealing algorithm: parameter estimation and performance analysis. *The Journal of Supercomputing*. April 2024. DOI: 10.1007/s11227-024-06046-4
4. Vepaev Sh.V. Study of Markov service models. *Molodoi uchenyi = Young Scientist*. 2022; (49): 26–28. (In Russ.).
5. Gachaev A.M., Dataev A.A., Vazkaeva S.S.-A. Study of software reliability in computer information technologies. *Prikladnye ekonomicheskie issledovaniya = Applied economic research*. 2023; (2):80-84. (In Russ.). https://doi.org/10.47576/2949-1908_2023_2_80.
6. Vadeyko V.S., Manko A.V. Markov reliability model. Minsk; 2022. P. 222–22. (In Russ.).
7. Terskov V.A., Sakash I.Yu. Mathematical model for reliability evaluation of multi-processor computing complexes. *Computational Nanotechnology*. 2024; 11(2): 22–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.33693/2313-223X-2024-11-2-22-28>. EDN: MHZWBU

8. Mikhalok V.V. Technical requirements for the software-hardware complex (SHC) of the executor. (In Russ.). Available at: https://intellectexport.ru/site/assets/files/1035/prilozhenie_2.doc
9. Klimanova E.Yu., Subkhankulova A.R., Zelenko B.V., Leontieva O.Yu. Performance evaluation of computing systems. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Technological University*. 2015; 18(24):102-105. (In Russ.).
10. Gogolevsky A.S., Romanov A.V., Trepkova S.A. Methodology for performance evaluation of hardware-software complex of information control system. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*. 2022; 10: 87-91. (In Russ.).
11. Larionov A.M., Mayorov S.A., Novikov G.I. Computing complexes, systems and networks. Leningrad: Energoatomizdat; 1987. 288 p. (In Russ.).
12. Min Thu Khaing, Lupin S.A., Ai Min Taik, Fedyashin D.A. Comparative analysis of node performance evaluation methods in distributed systems. *Mezhdunarodnyi zhurnal otkrytykh informatsionnykh tekhnologii = International Journal of Open Information Technologies*. 2023; 11(6). (In Russ.).
13. Lorenzo Luciano, Imre Kiss, Peter William Beardshear, Esther Kadosh, A. Ben Hamza WISE: a computer system performance index scoring framework. *Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications*. 2021; 10:8.
14. Albertyan A.M., Kurochkin I.I., Vatutin E.I. Use of heterogeneous computing nodes in grid systems for solving combinatorial problems. *Izvestiya YuFU = Izvestiya of Southern Federal University*. 2022: 142-153. (In Russ.).
15. Jim Holtman, Neil J. Gunther Getting in the Zone for Successful Scalability. Performance Dynamics Company, Castro Valley, California, USA, 2018.
16. Xin Li Scalability: strong and weak scaling. *Royal Institute of Technology*, 2018.
17. Rupak Roy, JaeHyuk Kwack Intel Analyzers. *Argonne Leadership Computing Facility*. 2025.
18. Brendan Gregg Visualizing Performance: The Developer's Guide to Flame Graphs. Communications of the ACM. 2022.
19. Martyshkin A. I., Kiryutkin I. A., Merenyasheva E. A. Autotesting an Embedded Reconfigurable Computing System. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(1): 140-152 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-140-152>.

Информация об авторе / Information about the Author

Петушков Григорий Валерьевич,
младший научный сотрудник Центра
популяризации науки и высшего образования,
Институт молодежной политики
и международных отношений РТУ МИРЭА,
г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: petushkov@mirea.ru

Grigory V. Petushkov, Junior Researcher,
Centre for Popularisation of Science and Higher
Education, Institute of Youth Policy
and International Relations, MIREA – Russian
Technological University,
Moscow, Russian Federation,
e-mail: petushkov@mirea.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 обязателен** 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>.