

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия
Юго-Западного
государственного
университета

Научный журнал

Том 27 № 4 / 2023



Proceedings
of the Southwest
State University

Scientific Journal

Vol. 27 № 4 / 2023



**Известия Юго-Западного
государственного университета
(Izvestiya Yugo-Zapadnoye gosudarstvennoye universiteta)**

Научный рецензируемый журнал

Основан в 1997 г.

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

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

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

Публикация статей в журнале для авторов бесплатна.

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

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

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

Машиностроение и машиноведение: 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);

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

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

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

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

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

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

Мещеряков Роман Валерьевич, д-р техн. наук, профессор, 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);

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);

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

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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);

Добрица Вячеслав Порфирьевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

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

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

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

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

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

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

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

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, 2023



Материалы журнала доступны под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Типография:

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

Подписка и распространение:
журнал распространяется
по подписке.

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

Периодичность: четыре выпуска в год

Свободная цена

Оригинал-макет подготовлен Е.В. Мельник

Подписано в печать 21.12.2023.
Дата выхода в свет 29.12.2023. Формат 60x84/8.
Бумага офсетная. Усл.печ.л. 19,1.
Тираж 1000 экз. Заказ 83.

16+

Proceedings of the Southwest State University



Peer-reviewed scientific journal

Published since 1997

Before 2011

“Proceedings of the Kursk State Technical University”

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

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

All papers are published free of charge.

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

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

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

Mechanical engineering and machine science: 2.5.4; 2.5.5; 2.5.8.

Construction: 2.1.1; 2.1.3; 2.1.9.

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

EDITOR-IN-CHIEF

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

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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);

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITORIAL COUNCIL

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

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

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);

Vyacheslav P. Dobritsa, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Southwest State University (Kursk, 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, Southwest State University (Kursk, Russia);

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

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

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

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
(ПИИ №ФС77-85895 от 04.09.2023).

ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

DOI Prefix: 10.21869

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

Printing office:

Printing Center

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, 2023



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

Singed to print 21.12.2023.
Release date 29.12.2023. Format 60x84/8.
Offset paper. Printer's sheets 19,1.
Circulation 1000 copies. Order 83.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Оригинальные статьи

Напряженно-деформированное состояние сварного соединения при приварке седлового отвода к полиэтиленовой трубе в условиях низких температур	8
<i>Старостин Н.П., Тихонов Р.С., Николаева М.А., Акимов М.П.</i>	

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Оригинальные статьи

Формирование комплектов эффективных алгоритмов распределения вычислительных ресурсов в гетерогенных динамичных вычислительных средах на основе онтологии.....	25
<i>Клименко А. Б., Алиева Э. М., Сальников А. Е.</i>	
Когнитивное моделирование и прогнозирование потребления электроэнергии.....	44
<i>Какурина А.В., Сизов А.С., Халин Ю.А.</i>	
Сегментация древовидных структур данных и их параллельная обработка в методах аутентификации, основанных на кодировании в режиме сцепления блоков	62
<i>Таныгин М.О., Чеснокова А.А.</i>	
Поиск треппин-сетов методом смешанного целочисленного линейного программирования с использованием априорного списка кодовых вершин	79
<i>Усатюк В.С., Егоров С.И.</i>	
К вопросу о моделировании процесса понимания текста с помощью систем искусственного интеллекта	98
<i>Кружилина Т. В.</i>	
Методика выбора управляющих решений при оптимизации технологических режимов переработки железорудного сырья с использованием электромагнитных воздействий	117
<i>Ананьева А.В.</i>	
Научно-методический подход к оценке своевременности оперативного управления маршрутизацией движения автомобиля в городской агломерации.....	132
<i>Белов А.С., Реформат А.Н., Трахинин Е.Л., Биркун Н.И.</i>	
Когнитивное моделирование управления рисками грузового порта	146
<i>Бондарева И.О.</i>	
К сведению авторов	164

CONTENT

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original articles

Stress-Strain State of a Welded Joint in Welding a Saddle Branch to a Polyethylene Pipe under Low Temperatures	8
---	----------

Starostin N. P., Tikhonov R. S., Nikolaeva M. A., Akimov M. P.

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Original articles

Efficient Algorithm Set Forming for the Computing Resources Distribution in Heterogeneous Dynamic Computational Environments Based on the Ontology Usage	25
---	-----------

Klimenko A. B., Alieva E. M., Salnikov A. Y.

Cognitive Modelling and Forecasting of Electricity Consumption	44
---	-----------

Kakurina A. V., Sizov A. S., Khalin Y. A.

Segmentation of Tree-Like Data Structures and Their Parallel Processing in Authentication Methods Based on Block Coupling Encoding	62
---	-----------

Tanygin M. O., Chesnokova A. A.

Trapping Sets Search Using the Method of Mixed Integer Linear Programming with a Priori List of Variable Nodes	79
---	-----------

Usatjuk V. S., Egorov S. I.

On Text Understanding Modeling by Means of Artificial Intelligence Systems.....	98
--	-----------

Kruzhilina T. V.

Technique for Selecting Control Decisions in Optimizing Technological Modes of Processing Iron Ore Raw Materials Using Electromagnetic Influences	117
--	------------

Ananeva A. V.

Scientific and Methodological Approach to Assessing Timeliness Operational Management of Vehicle Routing in an Urban Agglomeration	132
---	------------

Belov A. S., Reformat A. N., Trakhinin E. L., Birkun N. I.

Cognitive Modeling of Cargo Port Risk Management	146
---	------------

Bondareva I. O.

Information of the authors	164
---	------------

Напряженно-деформированное состояние сварного соединения при приварке седлового отвода к полиэтиленовой трубе в условиях низких температур

Н.П. Старостин ¹, Р.С. Тихонов ¹ ✉, М.А. Николаева ¹, М.П. Акимов ²

¹ Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН – обособленное подразделение
ФГБНУ ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения РАН»,
ул. Автодорожная, д. 20, г. Якутск 677007, Российская Федерация

² Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова,
ул. Кулаковского, д. 48, г. Якутск 677891, Российская Федерация

✉ e-mail: roman_tikhon@mail.ru

Резюме

Целью исследования является сравнительный анализ напряженно-деформированных состояний сварных соединений при приварке седловых отводов к действующим газопроводам в нормальных условиях по стандартной технологии и низких температурах по предлагаемой технологии.

Методы. Для достижения цели выполнена численная реализация математической модели термоупругого состояния методом конечных элементов. Динамика изменения температурного поля в процессе приварки седлового отвода к полиэтиленовой трубе описывалась нестационарным трехмерным уравнением теплопроводности с учетом фазовых превращений в интервале температур. Температурные напряжения при приварке седлового отвода к полиэтиленовым трубам рассматриваются в квазистационарной постановке, в которой напряжения зависят от решения тепловой задачи сварки в каждый расчетный момент времени. Вычислительные эксперименты проводились в среде программирования Python с использованием вычислительного пакета Dolphin/Fenics. Вычислительная сетка построена с использованием программы GMSH. Визуализация полученных результатов реализовывалась с помощью пакета Paraview.

Результаты. При приварке седлового отвода к полиэтиленовой трубе при температурах воздуха ниже нормативных расчетами определены технологические параметры сварки. На основе вычислительных экспериментов приварки седлового отвода к действующему газопроводу при допустимых и низких температурах окружающего воздуха динамики полей температур, напряжений и деформаций в зоне термического влияния практически идентичны.

Заключение. Результаты расчетов показали, что при приварке седловых отводов к полиэтиленовым трубам действующих газопроводов в условиях низких температур по предлагаемой технологии основные физические и механические процессы будут протекать как при сварке в нормальных условиях и обеспечат необходимую прочность.

Ключевые слова: математическое моделирование; сварка полиэтиленовых труб; напряженно-деформированное состояние; седловой отвод; метод конечных элементов.

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

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 122011100162-9.

Для цитирования: Напряженно-деформированное состояние сварного соединения при приварке седлового отвода к полиэтиленовой трубе в условиях низких температур / Н.П. Старостин, Р.С. Тихонов, М.А. Николаева, М.П. Акимов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(4): 8-24. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-4-8-24>.

Поступила в редакцию 12.09.2023

Подписана в печать 28.10.2023

Опубликована 21.12.2023

Stress-Strain State of a Welded Joint in Welding a Saddle Branch to a Polyethylene Pipe under Low Temperatures

Nikolay P. Starostin ¹, Roman S. Tikhonov ¹ ✉, Mariya A. Nikolaeva ¹,
Mir P. Akimov ²

¹ Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the RAS - Division of Federal Research Centre «Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences»,
20, Avtodorozhnaya str., Yakutsk 677007, Russian Federation

² North-East Federal University, Yakutsk
48, Kulakovskogo str., Yakutsk 677891, Russian Federation

✉ e-mail: roman_tikhon@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The aim of the study is a comparative analysis of the stress-strain states of welded joints during welding of saddle branches to existing gas pipelines under normal conditions using standard technology and low temperatures using the proposed technology.

Methods. To achieve the goal, a numerical implementation of the mathematical model of the thermoelastic state by the finite element method in the Python programming environment using the Fenics computing package was performed. The computational grid was built using the GMSH program. Visualization of the obtained results was implemented using the Paraview package.

Results. On the basis of computational experiments of welding a saddle branch to an existing gas pipeline at permissible and low ambient temperatures, the dynamics of the temperature fields, stresses and strains in the heat-affected zone are almost identical.

Conclusion. The calculation results showed that when welding saddle branches to polyethylene pipes of existing gas pipelines at low temperatures using the proposed technology, the main physical and mechanical processes will proceed as in welding under normal conditions and provide the necessary strength.

Keywords: mathematical modeling; welding of polyethylene pipes; stress-strain state; saddle branch; finite element method.

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

Funding: The work was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 122011100162-9.

For citation: Starostin N. P., Tikhonov R. S., Nikolaeva M. A., Akimov M. P. Stress-Strain State of a Welded Joint in Welding a Saddle Branch to a Polyethylene Pipe under Low Temperatures. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(4): 8-24 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-4-8-24>.

Received 12.09.2023

Accepted 28.10.2023

Published 21.12.2023

Введение

Седловой отвод представляет собой седловидную накладку из полиэтилена с коротким патрубком, устанавливаемую на полиэтиленовую трубу для приварки. Он используется для разветвления газопровода и приварки байпаса (обходного газопровода). В седловом отводе имеется вмонтированный в тело закладной нагреватель, представляющий спираль. Седелка закрепляется к месту приварки с помощью хомутов. При подаче напряжения на нагреватель происходит оплавление свариваемых поверхностей. Приварку седловых отводов к полиэтиленовым трубам, как и сварку, деталями с закладными нагревателями, рекомендуется проводить при температурах окружающего воздуха от -15 до 40 °С. При более низких температурах рекомендуется проводить сварку в укрытиях, в которых поддерживается температура воздуха из указанного интервала. Однако при такой сварке необходимо выдерживать трубы длительное время в укрытии для установления однородного распределения температуры в трубе в зоне приварки и

седелки, что неприемлемо при выполнении ремонтных работ в зимних условиях. Предложенная нами технология приварки при низких температурах седловых отводов к полиэтиленовым трубам без газа заключается в выполнении предварительного подогрева, выравнивания температур, оплавлении в регламентированном режиме и охлаждении соединения под слоем теплоизоляционного материала. Такая технология выполнения операций с рациональными параметрами (напряжения подогрева, времени подогрева, времени выравнивания, толщины теплоизоляции) приводит к протеканию теплового процесса в зоне термического влияния по закономерности, свойственной при приварке в условиях допустимой для сварки температуры [1]. Технология может применяться при строительстве газопроводов в зимних условиях регионов холодного климата. При разработке подобных технологий на основе методов математического моделирования тепловых процессов сварки, анализа полученных численных решений определяются параметры сварки при низких температурах, обеспечиваю-

щие необходимую скорость охлаждения соединения для формирования структуры материала прочного сварного шва.

Выполнение ремонтных работ на газопроводе зачастую выполняется под давлением газа. Особую важность имеет выполнение ремонтных работ на газопроводе под давлением газа при температурах воздуха ниже нормативных. Существуют различные технологии ремонта ПЭ газопроводов без отключения подачи газа, в том числе с использованием Стоп-Систем и запорных шаров и приварки байпаса. Байпас приваривается к газопроводу с помощью седлового отвода до прерывания подачи газа на поврежденный участок. В то же время, технологии приварки седловых отводов к действующим газопроводам из полиэтиленовых труб при низких температурах не разработаны.

При сварке полимерных труб деталями с закладными нагревателями давление в зоне сварки создается за счет теплового расширения свариваемых элементов. Естественно, при сварке в условиях допустимых и низких температур, несмотря на обеспечение идентичных динамик температурных полей в зоне термического влияния, напряженно-деформированные состояния сварных соединений будут различаться в силу неодинаковых температурных полей в периферийных зонах.

Математическое моделирование деформационных процессов при сварке полиэтиленовых труб с помощью муфт рассматривалось в работах [2-4]. При

приварке седловых отводов к полиэтиленовым трубам подобные задачи не рассматривались.

Постановка задачи

Расчетная область Ω для определения динамики температурных полей и напряженно-деформированного состояния в седловом отводе и трубы под давлением газа представлена на рис. 1. Учитывая достаточно плотное расположение витков в закладном нагревателе, примем допущение о равномерном распределении источника теплоты по области D_3 .

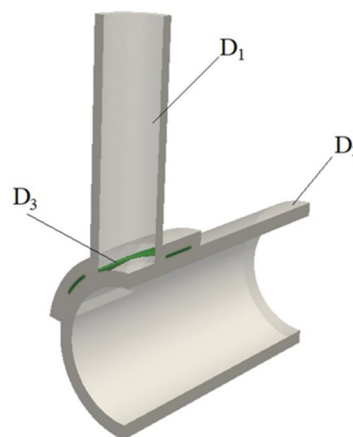


Рис. 1. Расчетная область седлового отвода и участка трубы: D_1 – седелка; D_2 – труба; D_3 – нагреватель

Fig.1. Computational area of saddle branch and pipe section: D_1 – saddle; D_2 – pipe; D_3 – heater

Термоупругая задача для седелки и труб рассматривается в несвязанной форме, в которой при действии на упругую систему внешней тепловой нагрузки не учитывается влияние скорости изменения объема на температурное поле. Термоупругая задача в такой постановке учитывает температурную зави-

симость физико-механических характеристик и возникновение тепловых деформаций и напряжений вследствие неравномерного нагрева сварного соединения. При численном решении термоупругой задачи на каждом временном шаге решается температурная задача, решение которой поставляется в уравнение термоупругости для определения напряженно-деформированного состояния.

Динамика температурного поля при предварительном подогреве, выравнивании температур, нагреве и охлаждении определяется решением трехмерного нестационарного уравнения теплопроводности в декартовой системе координат [5]:

$$\left(c(T) - \rho^- L^{100\%} \frac{dX_C}{dT} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda(T) \operatorname{grad} T) + Q(T) \gamma, \quad (1)$$

$$(r, z) \in \Omega, \quad 0 < t \leq t_m.$$

Уравнение (1) дополняется начальным и граничными условиями:

$$T(x, 0) = T_0, \quad (r, z) \in \Omega, \quad (2)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = \alpha_0 (T|_{\Gamma} - T_0), \quad (3)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_g} = \alpha_g (T|_{\Gamma_g} - T_{gas}), \quad (4)$$

$$T|_{\Gamma_T} = T_0, \quad (5)$$

где

$$X_C(T) = \begin{cases} X_C^{\infty}, & T \leq T_1, \\ X_C^{\infty} - \frac{\int_{T_1}^T q(u) du}{L^{100\%} v_T}, & T_1 < T < T_2, \\ 0, & T \geq T_2, \end{cases} \quad (6)$$

$$c(T) = \rho^+ c^+ + X_C(T) \times (\rho^- c^- - \rho^+ c^+),$$

$$\lambda(T) = \lambda^+ + X_C(T) \times (\lambda^- - \lambda^+);$$

T – температура; t – время; t_m – расчетное время; c^-, ρ^-, λ^- и c^+, ρ^+, λ^+ – удельная теплоемкость, плотность и теплопроводность для твердой и жидкой фазы материала трубы соответственно; $Q(t)$ – плотность теплового источника нагревателя; $L^{100\%}$ – удельная теплота фазового превращения полностью кристаллического полимера; X_C – степень кристалличности; X_C^{∞} – степень кристалличности материала трубы и седлки до начала сварки; T_1, T_2 – температуры солидуса и ликвидуса; $q(T)$ – зависимость теплового потока от температуры, отнесенная к единице массы вещества, регистрируемая дифференциальным сканирующим калориметром (ДСК); v_T – скорость изменения температуры; T_0 – температура окружающего воздуха; T_{gas} – температура газа внутри трубы; Γ – свободная боковая поверхность трубы и отвода; Γ_g – внутренняя поверхность трубы; Γ_T – поверхность торцов трубы; $\gamma = \begin{cases} 1, & (r, z) \in D_3 \\ 0, & (r, z) \notin D_3. \end{cases}$

На поверхностях сечений записываются условия равенства нулю тепловых потоков в силу симметрии.

Температурные напряжения при приварке седлового отвода к полиэтиленовым трубам рассматриваются в квазистационарной постановке, в которой напряжения зависят от решения

тепловой задачи сварки в каждый расчетный момент времени:

$$\operatorname{div} \sigma - \bar{\beta} \operatorname{grad}(T - T_p) = 0, \quad (7)$$

где $\bar{\beta} = \beta(3\lambda + 2\mu)$.

Соотношения Коши между тензором деформаций ε и вектором перемещений $\mathbf{u}$ имеют вид:

$$\varepsilon = 0,5(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T). \quad (8)$$

Поскольку термическое влияние учтено в уравнении равновесия (7) в виде объёмных напряжений, физические соотношения Гука между тензорами напряжений и деформаций напомним без учёта температурных деформаций

$$\sigma = \lambda \nabla \mathbf{u} \mathbf{I} + 2\mu \varepsilon, \quad (9)$$

в котором $\mathbf{I}$ – единичный тензор.

Принимая допущение, что слой теплоизоляционного материала не влияет на напряженно-деформированное состояние сварного соединения, на внешних поверхностях Γ_p , Γ_w трубы и отвода зададим граничное условие:

$$\sigma \mathbf{n} = \bar{\beta}(T - T_p), \quad x \in \Gamma = \Gamma_p \cup \Gamma_w. \quad (10)$$

На поверхностях сечений плоскостями yOz , xOy зададим условия:

$$\mathbf{u}_x = 0, \quad x \in \Gamma_{yz}, \quad \mathbf{u}_z = 0, \quad x \in \Gamma_{xy}. \quad (11)$$

На конце трубы:

$$\mathbf{u} = 0, \quad x \in \Gamma_T. \quad (12)$$

Внутри трубы:

$$\sigma \mathbf{n} = p_g, \quad x \in \Gamma_g. \quad (13)$$

Термоупругая задача (7)–(13) в вариационной постановке предполагает равенство энергии деформации и внутренних объёмных сил с энергией поверхностных сил

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \left(\sigma(\mathbf{u}) \varepsilon(\mathbf{v}) - \left(\bar{\beta} \operatorname{grad}(T - T_p), \mathbf{v} \right) \right) d\mathbf{r} d\mathbf{z} = \\ = \int_{\Gamma} \bar{\beta} (T - T_p) \mathbf{v} ds + \int_{\Gamma_g} p_g \mathbf{v} ds. \end{aligned} \quad (14)$$

Здесь $\mathbf{v}$ – пробная вектор-функция для вектора перемещений $\mathbf{u}$.

Результаты и их обсуждение

Рассматривалась приварка седлового отвода 110/63 к полиэтиленовой трубе ПЭ 100 SDR 11 110×10,0 при температуре окружающего воздуха минус 45 °С. При допустимой температуре приварка проводится с напряжением 39,5 В, время нагрева (оплавления) – 210 с, время охлаждения – 30 мин. Значения теплофизических характеристик материала полиэтиленовой трубы для расчётов брались следующими: для твердой фазы $c^- = 1900$ Дж/(кг·°С); $\rho^- = 950$ кг/м³; $\lambda^- = 0,38$ Вт/(м·°С); для жидкой фазы $c^+ = 2200$ Дж/(кг·°С); $\rho^+ = 800$ кг/м³; $\lambda^+ = 0,29$ Вт/(м·°С).

Мощность теплового источника вычислялась по формуле

$$Q(t) = \frac{U^2}{R \cdot (1 + \beta_R (T - 20))}.$$

Сопротивление спирали для рассматриваемого седлового отвода $R = 5,8$ Ом. Свойства нихрома: удельная теплоемкость $c = 460$ Дж/(кг·°С); плотность $\rho = 8400$ кг/м³, коэффициент теплопроводности $\lambda = 12,2$ Вт/(м·°С), температурный коэффициент сопротивления $\beta_R = 0,00017$ 1/°С.

При приварке седлового отвода к полиэтиленовой трубе при температурах воздуха ниже нормативных все опе-

рации выполняются с теплоизоляцией внешних свободных поверхностей участка трубы длиной 10 см и седелки. Для того, чтобы расчетная область оставалась неизменной при варьировании толщиной теплоизоляции на внешних поверхностях седлового отвода и труб вводился эффективный коэффициент теплообмена α_{eff} , значение которого зависит от коэффициента теплообмена поверхности с воздухом α_0 , толщины h_{iz} и теплопроводности λ_{iz} используемого теплоизоляционного материала. Значение α_{eff} определяется из формулы [6-7]: $\frac{1}{\alpha_{eff}} = \frac{1}{\alpha_0} + \frac{h_{iz}}{\lambda_{iz}}$. В качестве теплоизоляционного материала

был использован пенофол. Теплофизические параметры газа внутри газопровода брались из работы [8]. Скорость движения газа внутри трубы при ремонтных работах в газопроводе принималась равной 3 м/с, и при этом температура газа равна $T_{gas} = -7,5$ °С. Коэффициент теплообмена внутри трубы α_g вычислялся по известной формуле [9]:

$$\alpha_g = Nu \frac{\lambda_g}{2R_i}, Nu = 0,023 Pr^{1/3} Re^{0,8}. \quad (15)$$

Среднемесячные температуры газа представлены Якутским газоперерабатывающим заводом АО «Сахатранснефтегаз». На рис. 2 представлены значения среднемесячных температур газа.

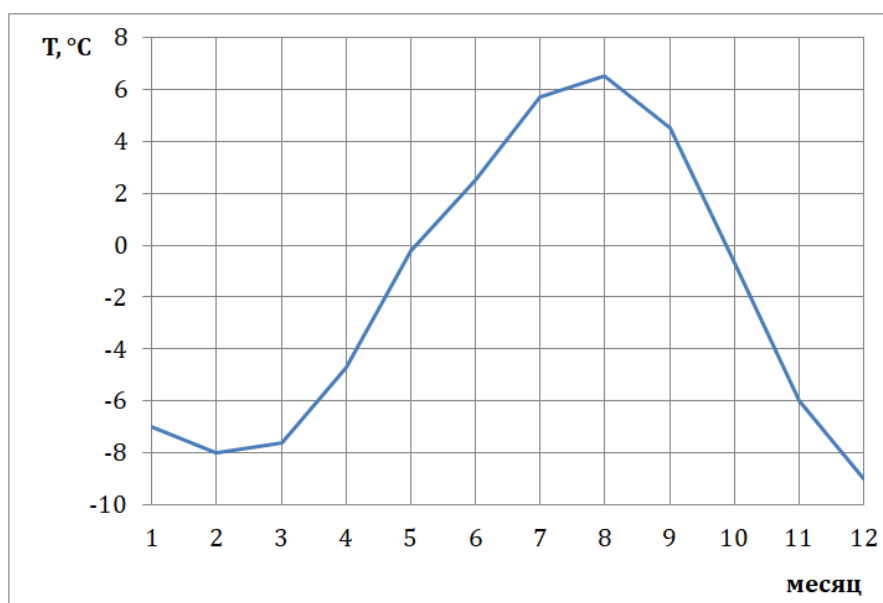


Рис. 2. Среднемесячные значения температуры газа в подземном магистральном газопроводе

Fig. 2. Monthly average values of gas temperature in the underground main gas pipeline

Задачи (1)-(5) и (7)-(13) решались методом конечных элементов с использованием программы свободного доступа Dolfin/FEniCS [10-11]. Триангуляция вычислительной расчетной обла-

сти Ω выполнялась с использованием генератора сетки Gmsh [12]. Визуализация полученных результатов реализовывалась с помощью пакета Paraview [13]. Приведем результаты расчетов

термоупругого состояния сварного соединения при приварке седлового отвода к рассматриваемой полиэтиленовой трубе при различных температурах окружающего воздуха. Равновесная температура $T_p = 20^\circ\text{C}$. При моделировании термоупругого состояния в условиях низких температур считается, что сварное соединение с равновесной температурой охлаждается свободно при -45°C в течение 3 часов. При полученном состоянии свободный торец трубы предполагается заземленным. Производится предварительный подогрев с выравниванием температур, затем производится нагрев по регламентированному режиму и охлаждение под слоем теплоизоляционного материала. При расчетах теплового состояния учитывается движение газа с температурой $-7,5^\circ\text{C}$. При температуре воздуха 20°C температура газа бралась равной $4,49^\circ\text{C}$. В расчетах также использовались следующие значения свойств материала трубы и седлового отвода: температурные коэффициенты линейного расширения полиэтилена $\beta^- = 0,9 \cdot 10^{-5}$; $\beta^+ = 2,8 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$; модули упругости $E^- = 250,0$; $E^+ = 12,5 \text{ МПа}$; коэффициенты Пуассона $\nu^- = 0,35$; $\nu^+ = 0,49$. Для нихрома $E = 100 \text{ ГПа}$; $\nu = 0,34$. Давление газа p_g на внутренние стенки труб бралось равным $0,3 \text{ МПа}$.

Расчетами определены следующие технологические параметры приварки при температуре окружающего воздуха

минус 45°C : толщина теплоизоляционного слоя при охлаждении – 2 см ; мощность закладного нагревателя для подогрева – $36,25 \text{ Вт}$; продолжительность подогрева – 10 минут ; продолжительность технологической паузы для выравнивания температур – $2,5 \text{ минуты}$. Температурные поля, рассчитанные при найденных технологических параметрах, сравним с температурными полями при приварке в условиях допустимых температур воздуха.

На рис. 3 представлены сравнения размеров зон сплавления, ограниченных изотермой со значением температуры 140°C , в сечении вертикальной плоскостью при сварке при температуре ОВ $+20$ и -45°C по существующему режиму приварки, а также при -45°C с использованием предлагаемой технологии в момент завершения нагрева. Показаны изотермы в момент завершения нагрева и через небольшой промежуток времени после выключения нагревателя. Видно, что после завершения нагрева оплавление продолжается в средней части расположения нагревателя. Зона сплавления представляет собой огибающую множества таких изотерм с максимально удаленными от нагревателя точками в различные моменты времени. Меньший размер зоны сплавления при низкой температуре ОВ свидетельствует о меньшем объеме полученного расплава, кристаллизация которого будет происходить по закономерности, нехарактерной для приварки седлового от-

вода при допустимой температуре. При такой закономерности кристаллизации невозможно гарантировать требуемую прочность соединения. Как видно из рис. 3, размеры зон сплавления при сварке при температуре $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ по регламентированному режиму и при $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ – по предлагаемой технологии отличаются незначительно.

Зона термического влияния (ЗТВ) расположена между границей зоны сплавления и огибающей изотерм $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, при которой начинается плавление полиэтилена. Расчеты распределения температур после плавления показали, что ЗТВ достигает максимального объема после завершения нагрева на третьей минуте охлаждения. Охлаждение соединения под слоем теплоизоляции с расчетной толщиной при низкой температуре ОВ протекает по закономерности, характерной при допустимой температуре на открытом воздухе. На рис.

4 показано сравнение температур в ЗТВ при приварке седлового отвода к полиэтиленовой трубе в условиях допустимой и низкой температуре после охлаждения в течение 3 минут. На десятой минуте охлаждения в обоих случаях температуры становятся ниже $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, т.е. процесс кристаллизации завершается.

На рис. 5 представлено сравнение временных зависимостей температур в точке между трубой и седелкой, расположенной в средней части по длине нагревателя, при приварке седлового отвода к трубе при температуре минус $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ по предлагаемой технологии и при допустимых для сварки температурах $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и минус $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ по регламентированному режиму. В начальный момент процесса температуры в рассматриваемой точке отличаются от температуры окружающего воздуха вследствие теплового воздействия газа, движущегося внутри трубы.

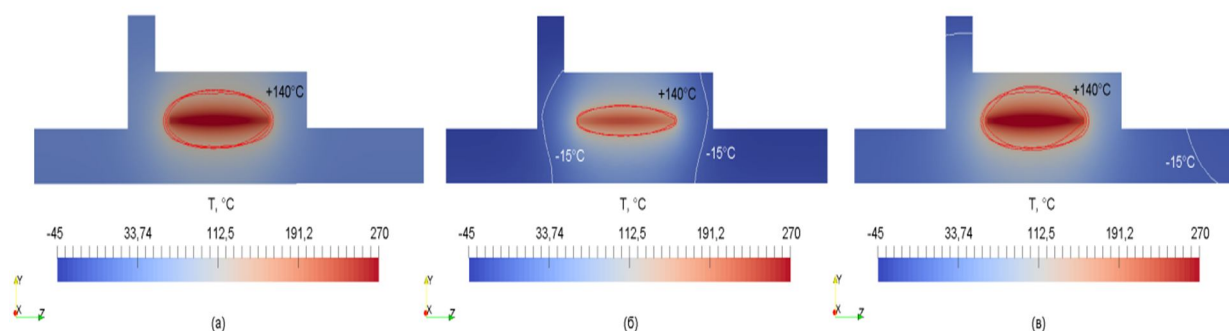


Рис. 3. Изотермы $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ в сечении седлового отвода и трубы в момент завершения нагрева ($t=210\text{ с}$) и на стадии охлаждения при температуре ОВ: **а** – $20\text{ }^{\circ}\text{C}$; **б** – $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ по режиму для допустимой температуры воздуха; **в** – $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ по предлагаемой технологии

Fig. 3. Isotherms of $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the cross section of the saddle branch and the pipe at the moment of completion of heating ($t=210\text{ s}$) and at the stage of cooling at the temperature of the RH: **a** – $20\text{ }^{\circ}\text{C}$; **b** – $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ according to the regime for the permissible air temperature; **v** – $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ according to the proposed technology

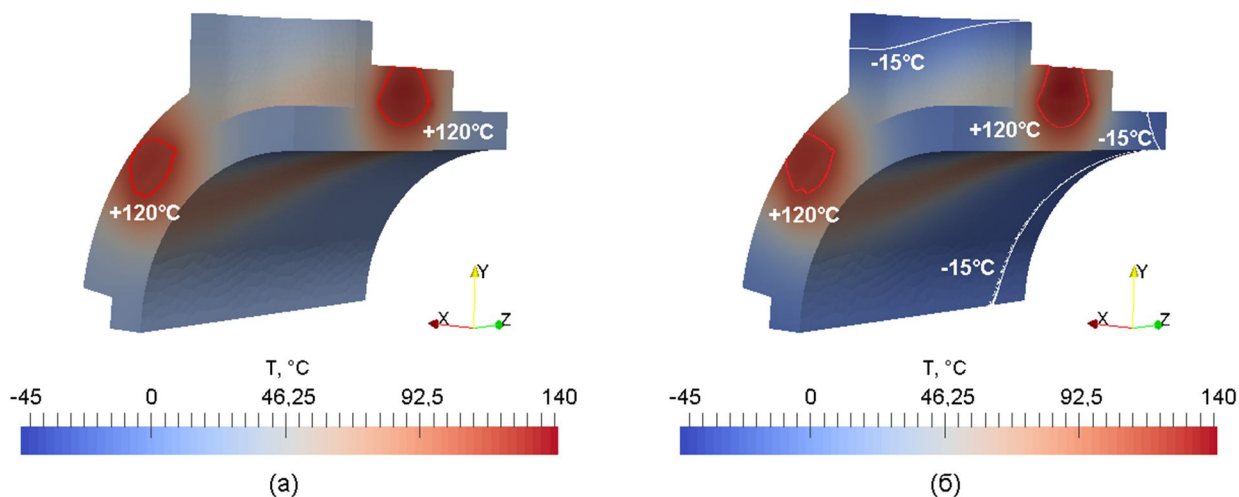


Рис. 4. Распределение температуры в зоне термического влияния в момент времени охлаждения 3 минут после завершения нагрева при температуре ОВ: **а** – +20 °С; **б** – – 45 °С с предварительным подогревом и охлаждением под теплоизоляцией

Fig. 4. Temperature distribution in the heat-affected zone at the time of cooling 3 minutes after completion of heating at the temperature of the RH: **a** – +20 °С; **б** – – 45 °С with preheating and cooling under thermal insulation

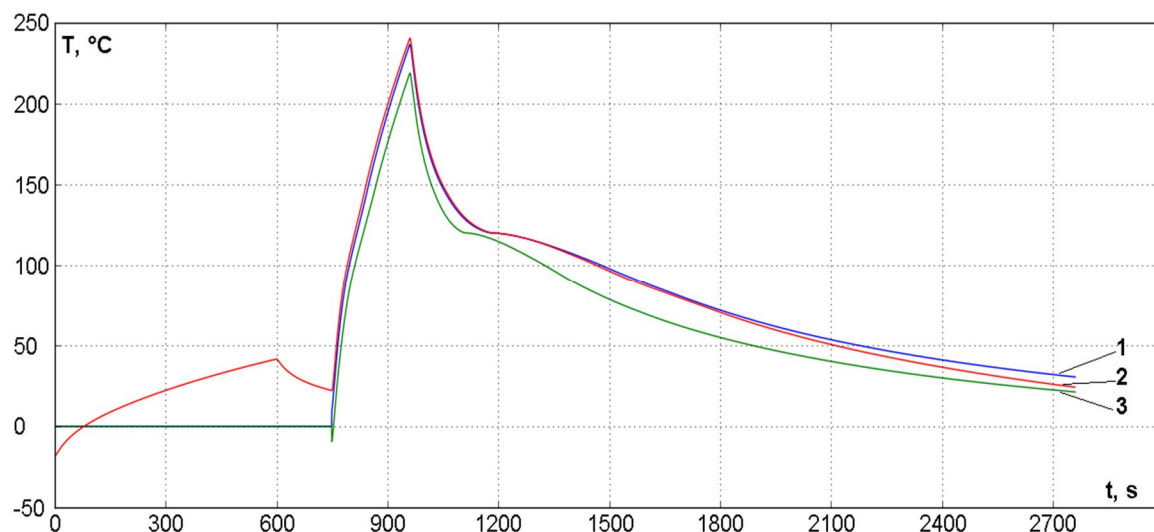


Рис. 5. Временные зависимости температур между трубой и седелкой при приварке седлового отвода к полиэтиленовой трубе в условиях температур окружающего воздуха: **1** – +20 °С; **2** – минус 45 °С по предлагаемой технологии; **3** – минус 10 °С

Fig. 5. Time dependences of temperatures between the pipe and the saddle branch when welding a saddle branch to a polyethylene pipe at ambient temperatures: **1** – +20; **2** – minus 45 according to the proposed technology; **3** – minus 10 °С

Формирование структуры материала сварного шва и ЗТВ происходит при снижении температуры от 120 °С до 100 °С. Считается, что сформировавшаяся структура материала сварного шва и ЗТВ, обеспечивают необходимую прочность соединения, если кривые временных зависимостей температур, в области, перенесшей структурные изменения, лежат в «коридоре» соответствующих температурных зависимостей, получающихся при допустимых для сварки температурах воздуха. Кроме того, скорости охлаждения в интервале фазового превращения должны быть близки. Из рис. 4 видно, что кривая 2 указанным условиям соответствует. Аналогичные зависимости получаются и для других точек ЗТВ соединения. Такая динамика температурного поля в зоне термического влияния будет способствовать формированию структуры материала сварного шва и ЗТВ, свойственной при сварке в условиях допустимой температуры.

Решение трехмерной термоупругой задачи в декартовых координатах усложняет анализ термомеханического состояния соединения, используя значения напряжений и деформаций по осям декартовой системы координат. Анализ напряженно-деформированных состояний сварных соединений проведем сравнением полей напряжений и деформаций в цилиндрической системе координат при приварке седлового отвода при температурах окружающего воздуха 20 °С по стандартной технологии и -45 °С по предлагаемой техноло-

гии. Напряжения и деформации в цилиндрической системе координат рассчитывались по значениям напряжений и деформаций в декартовой системе координат, используя известные формулы перехода [14].

Радиальные напряжения между трубой и седелкой определяют усилие прижатия свариваемых элементов. На рис. 6 представлены радиальные напряжения и деформации при приварке седловых отводов к полиэтиленовой трубе в момент завершения нагрева. Детализация распределений радиальных напряжений показывает, что в момент завершения нагрева по линии соединения трубы и седелки действуют сжимающие напряжения от 0,55 до 0,8 МПа в случае приварки в условиях комнатной температуры и от 0,53 до 0,88 МПа – по предлагаемой технологии. Распределения радиальных деформаций в ЗТВ при сварке в стандартных условиях и при низких температурах по предлагаемой технологии практически идентичны.

На рис.7 представлены распределения радиальных напряжений и деформаций при сравниваемых приварках в момент завершения охлаждения, т.е. после 10 минут охлаждения после нагрева. В момент завершения охлаждения, при котором кристаллизация завершилась, различия радиальных напряжений по линии соединения трубы и седелки незначительны. Если при стандартной приварке сжимающие радиальные напряжения изменяются в пределах 0,17 – 0,46 МПа,

то при низкой температуре с использованием теплоизоляции напряжения изменяются от 0,13 до 0,47 МПа. Распределения радиальных деформаций также сопоставимы.

На рис. 8 представлены кривые изменения во времени радиальных напряжений в процессе сварки в точке между трубой и седелкой, начиная с момента

начала нагрева. Абсолютные значения сжимающих напряжений возрастают на стадии нагрева (до 210 с) с повышением температуры. При охлаждении в интервале времени (210, 810) секунд – снижаются со временем. Заметные колебания значений радиальных напряжений обусловлены поглощением и выделением теплоты фазового превращения.

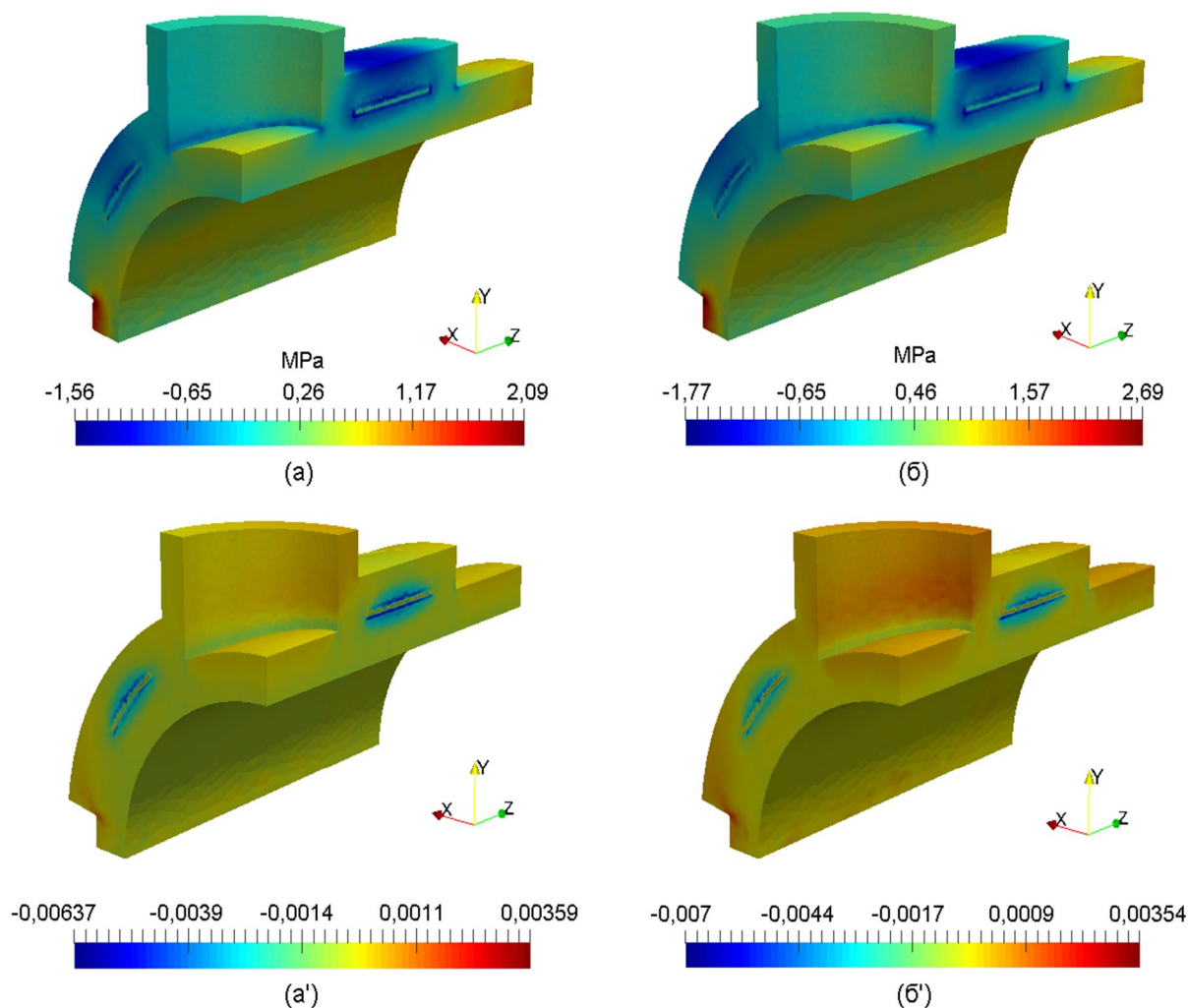


Рис. 6. Распределение радиальных напряжений (а, б) и деформаций (а', б') при приварке седлового отвода к трубе в момент завершения нагрева при температурах ОВ: 20 °С (а, а'); -45 °С по предлагаемой технологии (б, б')

Fig. 6. Distribution of radial stresses (а, б) and deformations (а', б') during welding of a saddle branch to the pipe at the moment of completion of heating at ambient temperatures of: 20 °С (а, а'); -45 °С according to the proposed technology (б, б')

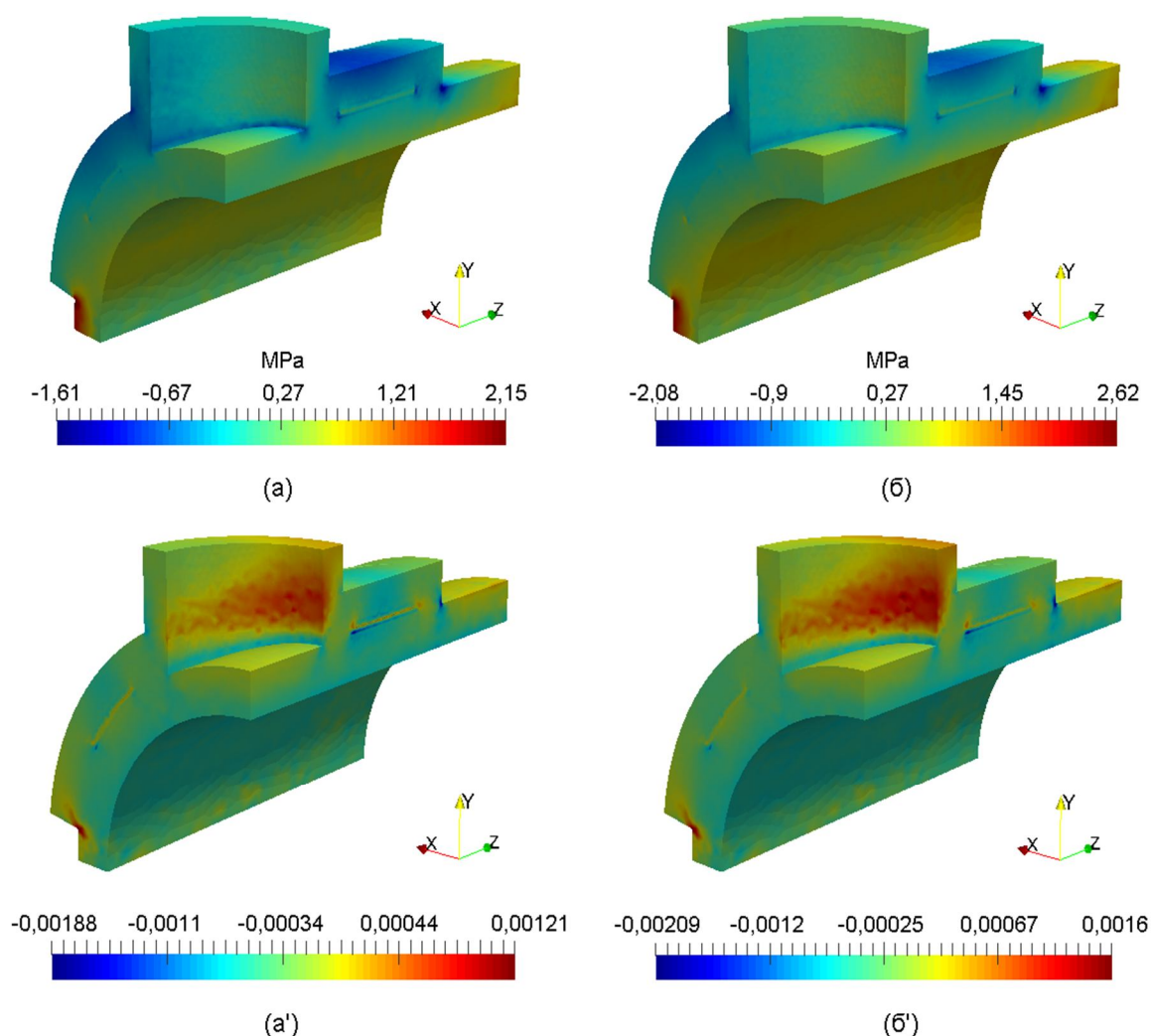


Рис. 7. Распределение радиальных напряжений (а, б) и деформаций (а', б') при приварке седлового отвода к трубе в момент завершения охлаждения при температурах ОВ: 20 °C (а, а'); -45 °C по предлагаемой технологии (б, б')

Fig. 7. Distribution of radial stresses (а, б) and deformations (а', б') during welding of a saddle branch to the pipe at the moment of completion of cooling at ambient temperatures of: 20 °C (а, а'); -45 °C according to the proposed technology (б, б')

Расчеты показывают, что сжимающие радиальные напряжения не ниже 0,2 МПа сохраняются до конца стадии охлаждения. При приварке седлового отвода в условиях низких температур по предлагаемой технологии на стадиях нагрева и охлаждения радиальные напряжения и деформации изменяются в

допустимых пределах. Изменения во времени температур, напряжений и деформаций в окрестности сварного шва в «коридоре» допустимых изменений будут обуславливать формирование в зоне термического влияния и сплавления надмолекулярной структуры, характерной для сварки в нормальных условиях.

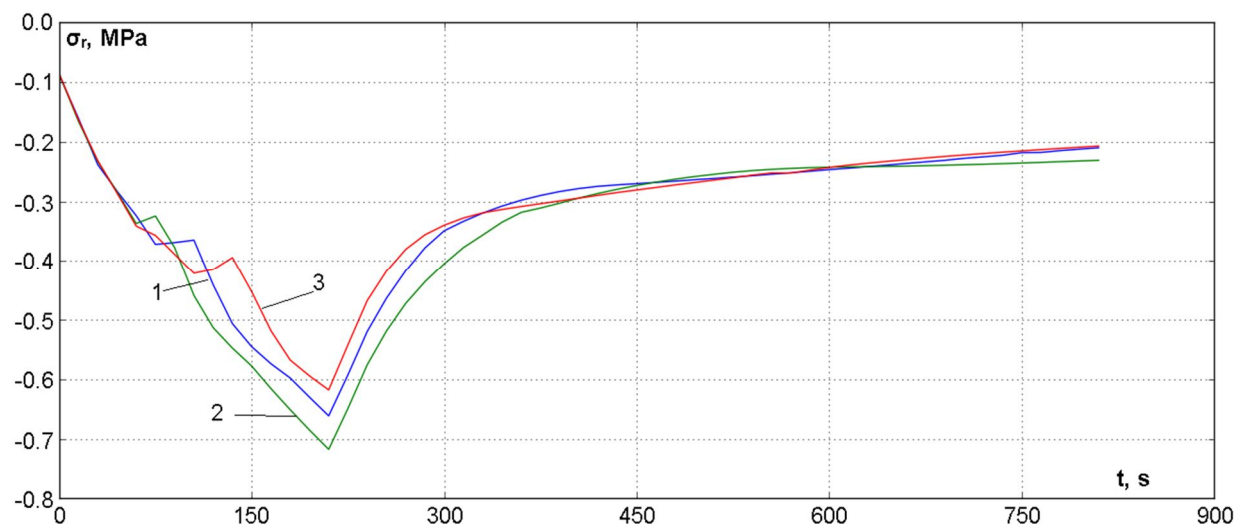


Рис. 8. Динамика радиальных напряжений в точке между трубой и седелкой в процессе приварки седлового отвода при температуре окружающего воздуха:

1 – минус 45 °С по предлагаемой технологии; 2 – +40 °С; 3 – минус 15 °С

Fig. 8. Dynamics of radial stresses at the point between the pipe and the saddle during welding of the saddle branch at ambient temperature: 1 – minus 45 °C according to the proposed technology; 2 – +40 °C; 3 – minus 15 °C

Выводы

Анализ термоупругих состояний показывает, что при приварке седлового отвода к полиэтиленовой трубе дей-

ствующего газопровода в условиях низких температур по предлагаемой технологии можно ожидать достижения прочности соединения не ниже, чем при приварке в стандартных условиях.

Список литературы

1. Васильева М.А., Старостин Н.П. Анализ температурных полей сварки полиэтиленовых распределительных трубопроводов с помощью седлового отвода при температурах воздуха ниже нормативных // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2022. № 1 (185). С. 54–58. DOI: 10.52190/2073-2597_2022_1_54
2. Математическое моделирование деформационных процессов при сварке полиэтиленовых труб / В.И. Махненко, Е.А. Великоиваненко, Г.Ф. Розынка, Е.Ш. Гисер // Автоматическая сварка. 1991. № 4. С. 1–6.
3. Труфанов Н.А., Сметанников О.Ю., Завьялова Т.Г. Численное решение краевых задач механики полимеров с учетом фазовых и релаксационных переходов // Математическое моделирование. 2000. Т. 12, № 7. С. 45–50.

4. Тихонов Р.С., Старостин Н.П., Аммосова О.А. Исследование влияния низких температур окружающего воздуха на термоупругое состояние электромуфтового сварного соединения полиэтиленовых труб // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2022. № 3 (187). С. 41–47. DOI: [10.52190/2073-2597_2022_3_41](https://doi.org/10.52190/2073-2597_2022_3_41)
5. Старостин Н.П., Николаева М.А. Приварка седлового отвода к полиэтиленовой трубе газопровода при низких температурах // Нефтегазовое дело. 2022. Т. 20, № 4. С. 133–140.
6. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Изд. 2-е. М: Энергия, 1969. 440 с.
7. Численное моделирование температурного поля многолетнемерзлого грунтового основания железной дороги / П. Н. Вабищевич, С. П. Варламов, В. И. Васильев, М. В. Васильева, С. П. Степанов // Математическое моделирование. 2016. Т. 28. № 10. С. 110–124.
8. Bondarev E.A., Rozhin I.I., Argunova K.K. Generalized Mathematical Model of Hydrate Formation in Gas Pipelines // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2019. Vol. 60. No. 3. Pp. 503-509. DOI: [10.1134/S002189441903012X](https://doi.org/10.1134/S002189441903012X)
9. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Изд. 5-е. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
10. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. М.: Мир, 1986. 318 с.
11. Logg A., Mardal K.A., Wells G. Automated Solution of Differential Equations by the Finite Element Method: The FEniCS Book. New York: Springer Sci. & Business Media. 2012. DOI: [10.1007/978-3-642-23099-8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-23099-8)
12. Software package GMSH. URL: <http://geuz.org/gmsh/> (дата обращения: 31.03.2023).
13. Software package ParaView. URL: <http://paraview.org/> (дата обращения: 31.03.2023).
14. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. М.: Наука, 1977. 416 с.

References

1. Vasileva M.A., Starostin N.P. Analiz temperaturnykh poley svarki polietilenovykh raspredelitel'nykh truboprovodov s pomoshch'yu sedlovogo otvoda pri temperaturakh vozdukhа nizhe normativnykh [Temperature field analysis in the welding of polyethylene distribution gaspipelines with the use of a saddle branch at ambient temperatures below standard]. *Informatsionnyye tekhnologii v proyektirovanii i proizvodstve = Information Technologies of CAD/CAM/CAE*, 2022, no. 1 (185), pp. 54–58. DOI: [10.52190/2073-2597_2022_1_54](https://doi.org/10.52190/2073-2597_2022_1_54).
2. Makhnenko, V. I., Velikoivanenko, E. A., Rozyinka, G. F., Giser, E. Sh. Matematicheskoye modelirovaniye deformatsionnykh protsessov pri svarke polietilenovykh trub [Mathematical modeling of deformation processes in the welding of polyethylene pipes]. *Avtomaticheskaya svarka = Automatic Welding*, 1991, no. 4, pp. 1–6.

3. Trufanov, N. A., Smetannikov O. Yu., Zav'yalova T. G. Chislennoye resheniye kraevykh zadach mekhaniki polimerov s uchetom fazovykh i relaksatsionnykh perekhodov [Numerical solution of boundary value problems of polymer mechanics with allowance for phase and relaxation transitions]. *Matematicheskoye modelirovaniye = Mathematical Modeling*, 2000, vol. 12, no. 7, pp. 45–50.

4. Tikhonov R.S., Starostin N.P., Ammosova O.A. Issledovaniye vliyaniya nizkikh temperatur okruzhayushchego vozdukha na termouprugoye sostoyaniye elektromuftovogo svarnogo soyedineniya polietilenovykh trub [Investigation of the effect of low ambient temperatures on the thermoelastic state of electrofusion welded joint of polyethylene pipes]. *Informatsionnyye tekhnologii v proyektirovanii i proizvodstve = Information Technologies of CAD/CAM/CAE*, 2022, no. 3 (187), pp. 41–47.

5. Starostin N.P., Nikolayeva M.A. Privarka sedlovogo otvoda k polietilenovoy trube gazoprovoda pri nizkikh temperaturakh [Welding of tapping saddle to a polyethylene pipe of the gas pipeline at low temperatures]. *Neftegazovoye delo = Petroleum Engineering*, 2022, vol. 20, no. 4, pp. 133–140.

6. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer. Edit.2] Moscow, Energiya Publ., 1969, 440 p.

7. Vabishchevich P.N., Varlamov S.P., Vasiliev V.I., Vasilieva M.V., Stepanov S.P. Numerical simulation of the temperature dynamics of railway foundation material in permafrost. *Matematicheskoe modelirovanie = Mathematical Models and Computer Simulations*, 2017, no. 9, pp. 292–304.

8. Bondarev E.A., Rozhin I.I., Argunova K.K. Generalized Mathematical Model of Hydrate Formation in Gas Pipelines. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2019, vol. 60, no. 3, pp. 503-509. DOI: 10.1134/S002189441903012X

9. Kutateladze S.S. *Osnovy teorii teploobmena* [Fundamentals of the theory or heat transfer]. Moscow, Atomizdat Publ., 1979, 416 p.

10. Zenkevich O., Morgan K. *Konechnyye elementy i approksimatsiya* [Finite elements and approximations]. Moscow, Mir Publ., 1986, 318 p.

11. Logg A., Mardal K.A, Wells G. *Automated Solution of Differential Equations by the Finite Element Method: The FEniCS Book*. New York: Springer Sci. & Business Media. 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-23099-8

12. *Software package GMSH*. Available at: <http://geuz.org/gmsh/> (accessed: 31.03.2023).

13. *Software package ParaView*. Available at: <http://paraview.org/> (accessed: 31.03.2023).

14. Lekhnitskiy S.G. *Teoriya uprugosti anizotropnogo tela* [Theory of elasticity of an anisotropic body]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 416 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Старостин Николай Павлович, доктор технических наук, профессор, г.н.с., и.о. зав.лабораторией климатических испытаний, Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН – обособленное подразделение ФГБНУ ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения РАН», г. Якутск, Российская Федерация, e-mail: nikstar56@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5686-1817>, AuthorID 7004125992

Nikolay P. Starostin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Chief Scientific Officer, Acting Head Climate Testing Laboratory, Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the RAS - Division of Federal Research Centre «Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», Yakutsk, Russian Federation, e-mail: nikstar56@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5686-1817>, AuthorID 7004125992

Тихонов Роман Семенович, кандидат технических наук, с.н.с., Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН – обособленное подразделение ФГБНУ ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения РАН», г. Якутск, Российская Федерация, e-mail: roman_tikhon@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9930-3305>, AuthorID 56763891300

Roman S. Tikhonov, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher, Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the RAS - Division of Federal Research Centre «Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», Yakutsk, Russian Federation, e-mail: roman_tikhon@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9930-3305>, AuthorID 56763891300

Николаева Мария Александровна, кандидат физико-математических наук, с.н.с., Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН – обособленное подразделение ФГБНУ ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения РАН», г. Якутск, Российская Федерация, e-mail: eowa@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1805-1776>, AuthorID 36867667000

Mariya A. Nikolaeva, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the RAS - Division of Federal Research Centre «Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», Yakutsk, Russian Federation, e-mail: eowa@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1805-1776>, AuthorID 36867667000

Акимов Мир Петрович, кандидат технических наук, доцент, Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация, e-mail: mir_akimov@mail.ru, AuthorID 57214972589

Mir P. Akimov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, North-East Federal University, Yakutsk, Russian Federation, e-mail: mir_akimov@mail.ru, AuthorID 57214972589

Формирование комплектов эффективных алгоритмов распределения вычислительных ресурсов в гетерогенных динамических вычислительных средах на основе онтологии

А. Б. Клименко ¹ ✉, Э. М. Алиева ¹, А. Е. Сальников ¹

¹ Институт информационных наук и технологий безопасности
Российского государственного гуманитарного университета,
ул. Академика Янгела, д. 25, к. 2, г. Москва 117534, Российская Федерация

✉ e-mail: anna_klimenko@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Цель данного исследования – разработка структуры онтологии как основы базы данных/базы знаний для выбора эффективных метаэвристических алгоритмов решения задачи распределения нагрузки в гетерогенных распределенных динамических вычислительных средах с учетом накладных расходов на передачу данных по сети.

Методы. Основными научными методами, применяемыми в рамках данного исследования, являются анализ предметной области, методы построения предметных онтологий, численные методы оптимизации и компьютерное моделирование. Поскольку в литературе не представлены модели планирования выделения ресурсов, которые бы учитывали географическую распределенность, наличие промежуточных маршрутов передачи данных, динамику топологий и нагрузки, а также гетерогенность системы в аспекте критериев оценивания качества распределения нагрузки, в данной статье предложена новая модель, учитывающая перечисленные особенности. Трудоемкость решения задачи планирования становится одним из варьируемых параметров, который при этом оказывает значительное влияние на результат планирования: с уменьшением трудоемкости вычислений, соответственно ухудшается результат. Поэтому в качестве метода решения предлагается жадная стратегия: из подлежащих рассмотрению методов оптимизации выбрать такой наименее трудоемкий, который бы позволял получить наилучший результат за выделенное время. Тестовые запуски алгоритмов имитации отжига демонстрируют различную эффективность на различных исходных условиях задачи, следовательно, целесообразно для выделенных классов задач выбрать эффективные в смысле качества решения и трудоемкости алгоритмы.

Результаты. Результатом исследования является структура онтологии эффективных алгоритмов. Также результатами являются вошедшие в состав онтологии экземпляры алгоритмов имитации отжига и задач, связанные отношением «эффективности».

Заключение. В данной статье предложены структура онтологии эффективных алгоритмов оптимизации и подход к решению задачи распределения вычислительной нагрузки с учетом трудоемкости процедуры распределения посредством «жадного» выбора наиболее эффективных алгоритмов оптимизации.

Ключевые слова: распределенные вычисления; онтология; методы оптимизации; метаэвристики; распределение нагрузки.

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

Для цитирования: Клименко А. Б., Алиева Э. М., Сальников А. Е. Формирование комплектов эффективных алгоритмов распределения вычислительных ресурсов в гетерогенных динамических вычислительных средах на основе онтологии // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(4): 25–43. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-4-25-43>.

Поступила в редакцию 05.10.2023

Подписана в печать 17.11.2023

Опубликована 21.12.2023

Efficient Algorithm Set Forming for the Computing Resources Distribution in Heterogeneous Dynamic Computational Environments Based on the Ontology Usage

Anna B. Klimenko ¹ ✉, Elvira M. Alieva ¹, Andrey Y. Salnikov ¹

¹ Institute of IT and Security Technologies of Russian State University for the Humanities
25, building 2 Academician Yangel str., Moscow 117534, Russian Federation

✉ e-mail: anna_klimenko@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The purpose of this research is to develop an ontology structure as the basis of a database/knowledge base for selecting effective metaheuristic algorithms for solving the problem of load distribution in heterogeneous distributed dynamic computing environments, taking into account the overhead of data transmission over the network.

Methods. The main scientific methods used in this study are domain analysis, methods for constructing subject ontologies, numerical optimization methods and computer modeling.

Since the literature does not present resource allocation planning models that would take into account geographic distribution, the presence of intermediate data transmission routes, the dynamics of topologies and load, as well as system heterogeneity in terms of criteria for assessing the quality of load distribution, this article proposes a new model that takes into account these features. The complexity of solving a planning problem becomes one of the variable parameters, which has a significant impact on the planning result: with a decrease in the complexity of calculations, the result deteriorates accordingly. Therefore, a greedy strategy is proposed as a solution method: from the optimization methods to be considered, select the least labor-intensive one that would allow obtaining the best result in the allotted time. Test runs of simulated annealing algorithms demonstrate different effectiveness under different initial conditions of the problem; therefore, it is advisable for selected classes of problems to choose algorithms that are effective in terms of solution quality and labor intensity.

Results. The result of the study is the structure of the ontology of effective algorithms. Also, the results are instances of simulated annealing algorithms and tasks included in the ontology, related by the “efficiency” relation.

Conclusion. This article proposes the structure of an ontology of effective optimization algorithms and an approach to solving the problem of distributing the computational load, taking into account the complexity of the distribution procedure through the “greedy” selection of the most effective optimization algorithms.

Keywords: *distributed computing; ontology; optimization methods; metaheuristics; workload distribution.*

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

For citation: Klimenko A. B., Alieva E. M., Salnikov A. Y. Efficient Algorithm Set Forming for the Computing Resources Distribution in Heterogeneous Dynamic Computational Environments Based on the Ontology Usage. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(4): 25-43 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-4-25-43>.

Received 05.10.2023

Accepted 17.11.2023

Published 21.12.2023

Введение

В настоящее время одним из трендов в области распределенных вычислений является частичный отказ от «чистых» облачных вычислений и их расширение путем перехода к концепциям «туманных» и «краевых» вычислений. Это объясняется недостаточностью «облачной» концепции в ситуации, когда пользовательские приложения имеют достаточно жесткие ограничения на время выполнения пользовательских операций, а географическая удаленность датацентра и наличие транзитных (и, как правило, гетерогенных) участков сети делают проблематичным гарантированный временной интервал обслуживания [1]. Последнее негативно сказывается на качестве сервиса (Quality of Service) и качестве опыта использования (Quality of Experience), что, в свою очередь, ведет к финансовым потерям [2].

Однако использование туманных и краевых вычислений имеет существенные и весомые отличия от облачных, а именно: высокая степень гетерогенности вычислительных устройств, высокая степень гетерогенности каналов

связи, а также относительно высокая динамика как сетевых топологий, так и номенклатуры пользовательских задач. Кроме того, вычислительные устройства в туманной среде, как правило, менее производительны, чем устройства в датацентрах и распределены географически [3].

Географическая распределенность устройств в составе туманного слоя является причиной возникновения дополнительной нагрузки на устройства, в тех случаях, когда они используются для передачи данных соседним узлам.

Высокая динамика туманной вычислительной среды актуализирует вопрос о частой смене конфигурации системы распределенных вычислений, то есть, закрепления задач за узлами (в случае появления новых задач), а также перераспределения задач (например, в том случае, когда пользователь изменяет географическую позицию). В качестве примера можно привести ситуацию пользовательского приложения, работающего в едущем поезде, который следуем мимо вышек 5G сотовой связи, либо вычислений, которые могут про-

изводиться в группах низколетящих спутников с ретрансляцией.

Гетерогенность вычислительной среды, в свою очередь, ставит вопрос о необходимости рассмотрения задачи распределения вычислительных ресурсов не только как многокритериальной задачи оптимизации, но и как задачи, где, возможно, отдельно взятые вычислительные узлы, помимо общего критерия оптимизации, будут иметь свои собственные.

Таким образом, постепенное формирование и интенсификация использования вычислительных сред, обладающих ярко выраженными свойствами гетерогенности (в том числе, гетерогенности критериев эффективности распределения ресурсов), динамичности и географической распределенности, является новым этапом в развитии области распределенных вычислений, делая необходимым разработку комплекса методов управления ресурсами с учетом перечисленных особенностей.

Данная статья является результатом исследований, проводимых в области моделей и методов распределения вычислительных ресурсов. На основе аналитического обзора литературы сделаны выводы о моделях и методах управления ресурсами гетерогенных динамичных распределенных вычислительных сред как о частных реализациях, и представлена модель общей задачи управления вычислительными ресурсами. На основе анализа сформулированной задачи сделан вывод о том, что блок

подбора процедуры смены конфигурации вычислительной системы может быть реализован посредством применения технологий искусственного интеллекта, где самым простым подходом является использование продукционных правил. При этом принятие решения о выборе того или иного алгоритма оптимизации осуществляется путем выбора вариантов из сформированного портфолио эффективных алгоритмов. Последнее реализуется на основе онтологической модели предметной области решения задач распределения нагрузки.

Цель данной статьи – разработка структуры онтологии предметной области выбора эффективных алгоритмов для распределения вычислительных ресурсов в распределенных гетерогенных динамичных вычислительных средах.

Материалы и методы

Формализация задач распределения нагрузки

От начала своего появления в 2012 г. и до нынешних дней задачи управления ресурсами в туманных вычислительных средах не утратили актуальности. В рамках распределенных вычислений туманные вычисления воплощают наиболее сложный случай с точки зрения управления ресурсами по сравнению, например, с ГРИД-системами [4] – потому, что к свойствам гетерогенности и распределенности добавляется свойственное облачным сервисам критерии экономической выгоды, непосредственно с «облаком» - в силу гетерогенности коммуни-

кационной среды, наличия транзитных узлов и, в целом, более низкой пропускной способности. Если сравнивать с мультимпьютером [5], то системы туманных вычислений также существенно усложняются относительно высокой степенью географической распределенности, а также потенциальной динамикой топологии. Эти особенности – гетерогенность структурная и критериев, динамика нагрузки и топологий, географическая распределенность – фактически делают ранее разработанные модели и методы малоэффективными по следующим причинам:

– если речь идет о составлении расписаний или распределении нагрузки, то, для статичных систем расписание составляется однократно, либо, если подразумевается реконфигурирование системы, то как реакция на изменения среды, без учета, собственно, сложности процедуры;

– также не учитывается специфика коммуникационной среды, а именно – наличие транзитных участков сети, объединенных устройствами, которые получают дополнительную нагрузку и, соответственно, тратят определенные ресурсы;

– как правило, гетерогенный характер сети учитывается в качестве ограничений, за исключением некоторых работ, где предложено использовать аддитивную свертку разнообразных критериев.

Среди фундаментальных работ, посвященных распределенным вычислениям, но не учитывающих перечисленное, можно выделить следующие [6-10].

Анализ направлений в рамках управления ресурсами туманных вычислений показал, что в основном выбраны следующие направления [11]:

- Обеспечение ресурсами.
- Размещение приложений.
- Разгрузка задач.
- Планирование.
- Балансировка нагрузки.
- Выделение ресурсов.

При этом рассмотрение работы [11] позволяет выделить следующие критерии и методы решения задач распределения нагрузки:

- Время завершения решения комплекса задач.
- Стоимость комплекса вычислительных устройств.
- Энергопотребление.
- Время реакции системы на внешнее воздействие.
- Балансировка нагрузки.

Имеются как однокритериальные постановки задач, так и многокритериальные, а именно: в [12] рассмотрена постановка задачи двухкритериальной оптимизации, где критерии – время выполнения задач и стоимость.

В работе [13] производится оптимизация распределения нагрузки по критериям времени выполнения и энергопотребления.

В [14] рассмотрена постановка задачи с оптимизацией по критериям времени выполнения комплекса задач и балансировки нагрузки.

Авторы [15] также рассматривают задачу оптимизации времени выполнения и потребляемой задачами памяти.

Авторы [16] представили постановку задачи и метод решения для трех критериев: время реакции системы, время выполнения задач и стоимости.

Работы [17-20] посвящены также одно- и двухкритериальной оптимизации распределения вычислительной нагрузки.

Следует отметить, что в перечисленных работах также представлены методы решения, как правило, являющиеся реализацией того или иного метаэвристического метода, адаптированного для наиболее эффективного решения поставленной задачи.

Использовались генетические алгоритмы, алгоритм «кукушкин поиск», оптимизация «серых волков», муравьиных колоний, имитации жизни пчел и др.

Рассмотренные задачи были решены без учета, собственно, времени на решение задачи, а также без учета того времени, которое потребуется для перемещения программного кода задач и данных с узла на узел, в то время как время решения задачи в условиях динамики системы может приводить к тому, что будут нарушены ограничения на время выполнения пользовательских задач.

Таким образом, по результатам аналитического обзора могут быть сделаны следующие выводы:

– представленные модели задач управления ресурсами и методы их решения не отражают таких особенностей современных систем распределенных вычислений, как: распределенность, гетерогенность и динамика;

– метод изменения конфигурации вычислительной системы влияет как на эффективность результирующего распределения нагрузки, так и на время, потребляемое на реконфигурацию, и должен быть учтен при выборе метода распределения ресурсов.

Общая постановка задачи управления ресурсами системы распределенных вычислений и формирование комплектов эффективных алгоритмов распределения нагрузки

Для распределения нагрузки по фрагменту географически распределенной сети используются следующие входные данные.

- Граф задач, предназначенных к решению: $G_1 = \{ \langle g_i, r_i \rangle, R \}$, где g_i – вычислительная сложность задачи; r_i – требования к ресурсам устройства, на котором будет происходить размещение, включая: требования к объему памяти, требования к пропускной способности канала, к производительности и т.д. Данный граф – ациклический и направленный, где ребра R взвешены объемом передаваемых данных между задачами.

- Граф сети представляется произвольным направленным мультиграфом, где вершины взвешены характеристиками узлов сети (производительность, объем памяти, энергопотребление и т.д.), ребра взвешены скоростями передачи данных по каналам связи. То есть: $G_2 = \{ M, C \}$, $M = \{ m_j \}$ – ресурсы, которыми располагает узел, $C = \{ c_j \}$ – каналы связи.

- Имеются общие критерии оценивания качества распределения задач $S_0 = \{s_k\}$.

- Гетерогенность сети и специфика используемых устройств продуцирует индивидуальные критерии качества распределения, специфичные отдельным узлам, и составляет множество: $p_0 = \{p_l\}$.

- Имеются общие ограничения $\text{constr} = \{\text{constr}_k\}$.

- Процедура управления характеризуется параметрами $\langle g_r, r_r, t_r \rangle$, где g_r – вычислительная сложность задачи перепланирования; r_r – требования к ресурсам узла, где выполняется расчет нового закрепления; t_r – время выполнения перепланирования (перемещение данных).

- Остатки ресурсов транзитных узлов определяется как:

$$\forall i, k, L \quad m_{i_ост} = m_i - \sum_{k=1}^L r_k, \quad \text{где } L - \text{количество задач, для которых узел } i \text{ включен в маршрут передачи данных.}$$

- Таким образом, управление системой РВ будет заключаться в решении следующей задачи: необходимо для графов G_1 и G_2 найти такие закрепление задач за устройствами и $\langle g_r, t_r \rangle$, чтобы при имеющихся ограничениях: $r_i \leq m_j$, constr_j , $r_r \leq m_j$ обеспечить $S_0 \rightarrow \max$, $P_0 \rightarrow \max$, $m_{i_ост} \rightarrow \max, \forall i \in \{Ro_\alpha\}$, где $\{Ro_\alpha\}$ – множество маршрутов.

При такой постановке задачи решение ее классическими методами оптимизации не представляется возможным, потому что, если вести речь об итерационных методах, то результат решения

задачи распределения нагрузки улучшается с увеличением количества итераций (поколений/популяции). При этом увеличивается время собственно получения такого решения. Также, несмотря на имеющиеся оценки времени сходимости тех или иных алгоритмов, при уменьшении времени их работы заранее неизвестно, насколько хорошим или плохим будет полученное решение.

Поэтому предлагается в качестве стратегии выбрать «жадный» способ выбора алгоритмов решения задачи распределения нагрузки, а именно: в зависимости от признаков задачи осуществлять выбор того метаэвристического метода с такими параметрами, который бы позволял получить наилучшее решение при наименьшем количестве итераций. Такой подход требует проведения экспериментального исследования наборов метаэвристик, опираясь на множество выбранных признаков, и формирования комплектов эффективных алгоритмов для заданной задачи. Рациональным подходом к решению такой задачи представляется анализ предметной области, разработка онтологии и затем, на базе полученной онтологии, формирования отношений между экземплярами задач и экземплярами метаэвристических методов их решения.

Эффективность алгоритмов
в решении поставленной задачи

Различная эффективность алгоритмов для задач распределения нагрузки с

различными параметрами подтверждается экспериментально, например: производится распределение нагрузки по узлам сети топологии «решетка» с увеличением количества узлов по свертке индивидуальных показателей вероятности безотказной работы (ВБР) узлов, взятой в произвольный момент времени $t=100$ ч., и производится сравнение ре-

зультатов работы простого генетического алгоритма, случайного поиска (метод Монте-Карло), метода имитации отжига с температурной схемой тушения.

Как видно из табл. 1, получены значения свертки одного порядка, при этом время, затраченное на поиск решений, существенным образом различается, что показано в табл. 2.

Таблица 1. Сравнение результатов распределения задач по узлам

Table 1. The comparison of tasks distribution results

Кол-во узлов сети / Number of network nodes	Кол-во задач / Number of tasks	Результат работы ГА / Result of GA work	Результат работы СП / Result of JV work	Результат работы ИО / Result of IO work
100	10	0.98552	0.97349	0.96091

Таблица 2. Сравнение времени работы алгоритмов

Table 2. The comparison of algorithms time consumption

Кол-во узлов сети / Number of network nodes	Кол-во экспериментов / Number of experiments	Время работы ГА (с) / GA operating time (s)	Время работы СП (с) / SP operating time (s)	Время работы ИО (с) / IO operating time (s)
100	10	79.27919	68.62277	1.27247

В качестве примера также рассмотрим результаты тестов с различными типами алгоритмов имитации отжига.

Еще один эксперимент, демонстрирующий различия в эффективности применения метаэвристик на различных входных данных, описан ниже. Исследованы алгоритмы имитации отжига со следующими параметрами:

1. Закон изменения температуры:

– геометрическое понижение температуры:

$$T_{\text{new}} = \alpha * T_n, \text{ где } \alpha \in (0,1);$$

– экспоненциальное понижение температуры:

$$T_{\text{new}} = T_n * e^{-B/n}, \text{ где } B = \frac{-\ln(\frac{T_{\text{min}}}{T_n})}{k},$$

где $k > 0$;

– логарифмическое понижение температуры:

$$T_{\text{new}} = T_n - k * \log(n+1);$$

– квадратичное понижение температуры:

$$T_{\text{new}} = T_n - k * n^2.$$

2. Формулы вероятностного перехода:

– линейная функция Больцмана:

$$P = 1 - \frac{\Delta E}{T_n};$$

– экспоненциальная функция Больцмана:

$$P = e^{\frac{-\Delta E}{k \cdot T_n}}.$$

Для первого эксперимента было взято пять вычислительных узлов про-

извольной производительности и 50 задач с небольшой амплитудой изменения трудоемкостей [40;50].

В заданных условиях независимо от способа изменения температуры и количества итераций лучшие результаты показал алгоритм, использующий экспоненциальную функцию Больцмана (табл. 3, рис. 1).

Таблица 3. Средние значения ЦФ эксперимента 1

Table 3. Mean values of the objective function in simulation 1

Вер. Итер.	Геом. пониж.		Экспон. пониж.		Лог. пониж.		Квадр. пониж.	
	ЛФБ	ЭФБ	ЛФБ	ЭФБ	ЛФБ	ЭФБ	ЛФБ	ЭФБ
100	1,945	1,558	1,558	1,558	2,411	1,558	1,918	1,558
1000	1,671	1,558	1,558	1,558	1,726	1,558	1,849	1,558
5000	1,558	1,558	1,558	1,558	1,558	1,558	1,766	1,558

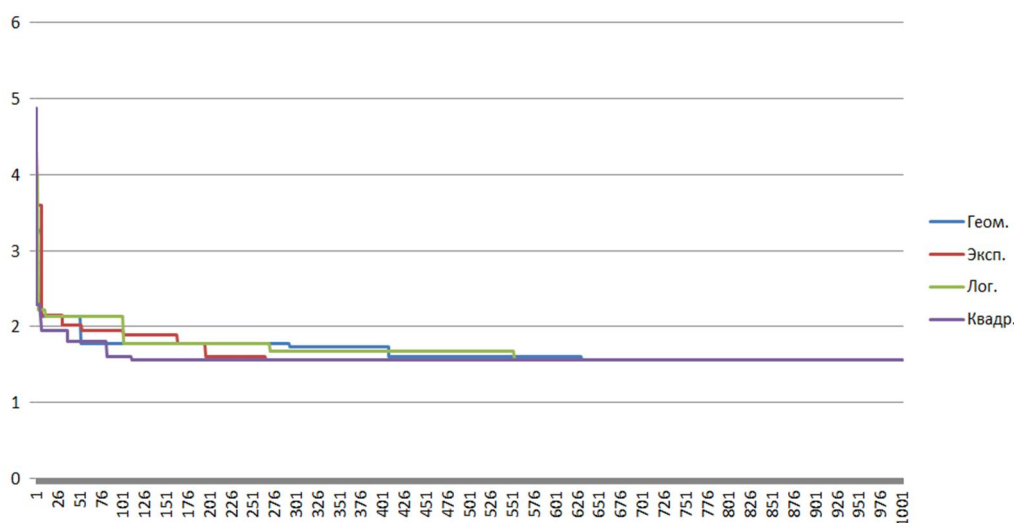


Рис.1. Пример результатов эксперимента с применением линейной функции Больцмана, 1000 итераций

Fig.1. The example of simulation results with the usage of Boltzmann function, 1000 iterations

В ходе следующего эксперимента была рассмотрена система, в состав которой входило 20 вычислительных узлов и 100 задач с двумя вариантами интервалов значений трудоемкостей: [40,50] и

[40,100]. Количество тестов для каждого эксперимента – 100. Полученные средние показатели значений ЦФ приведены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты эксперимента с различными интервалами значений трудоемкостей задач**Table 4.** Simulation results with the various computational complexities of tasks

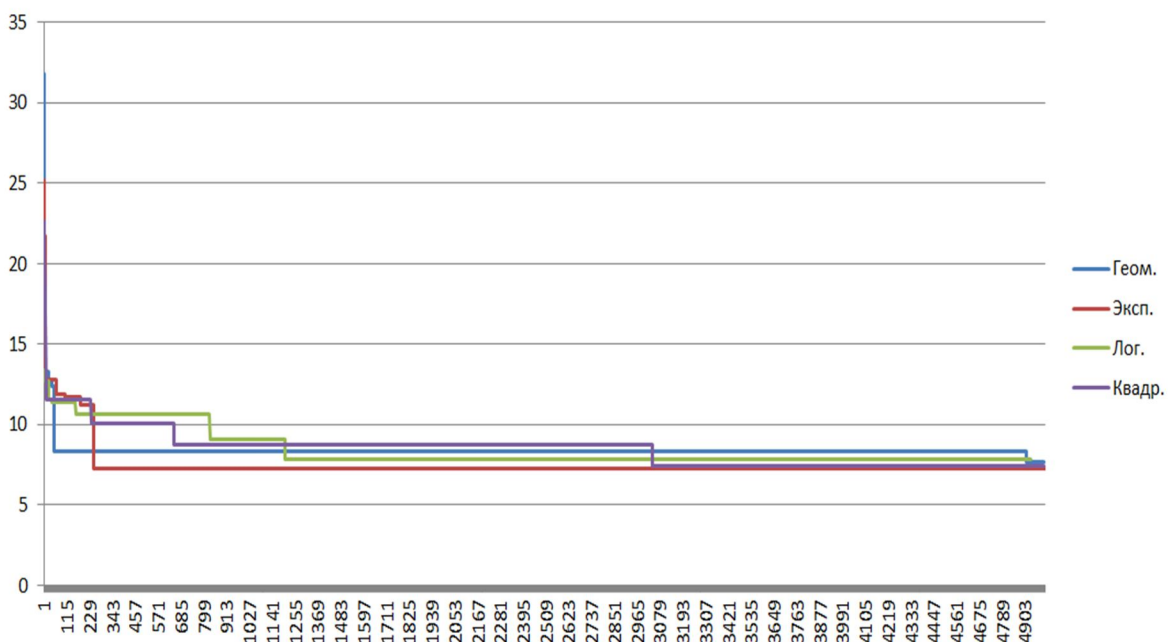
	Темп.	Геом. пониж.		Экспон. пониж.		Лог. пониж.		Квадр. пониж.	
Ампл.	Вер. Итер.	ЛФБ	ЭФБ	ЛФБ	ЭФБ	ЛФБ	ЭФБ	ЛФБ	ЭФБ
Мал.	100	8,93	6,44	8,6	8,2	9,33	9,33	9,27	9,07
	1000	6,47	6,61	6,97	7,87	8,8	7,13	8,65	6,5
	5000	6,23	5,87	6,97	6,57	6,71	6,57	6,14	6,22
Бол.	100	8,37	9,38	9,77	8,7	9,52	8,74	10	9,86
	1000	7,06	7,7	8,20	8,14	9,79	8,4	9,37	8,14
	5000	7,52	7,65	7,84	7,23	8,93	7,8	9,52	7,41

То есть, по результатам экспериментов на одном и том же временном интервале функционирования процедуры поиска возможно улучшение найденного решения до 30%.

Пример, иллюстрирующий изменение значений ИО с экспоненциальной

вероятностной формулой Больцмана, показан на рис. 2.

Видно, что в зависимости от изменений исходных условий задачи, менялась и эффективность применения тех или иных типов алгоритмов ИО в условиях ограничения на время.

**Рис. 2.** Изменение значений целевой функции в зависимости от количества итераций ИО, с использованием экспоненциальной вероятностной формулы, 5000 итераций**Fig. 2.** The objective function values change depending on the SA iterations number, with the exponential law and 5000 iterations usage

То есть, в условиях малой вариативности трудоемкостей задач, на малом количестве итераций (100) наиболее эффективной комбинацией параметров является понижение температуры по геометрическому закону при использовании экспоненциальной функции Больцмана, в то время как при большой вариативности трудоемкостей задач наилучший результат на аналогичном количестве итераций позволило получить использование линейной функции Больцмана в совокупности с геометрическим законом понижения температуры.

Таким образом, располагая результатами экспериментальных исследований эффективности различных алгоритмов, применяемых в данной области, имеется возможность, на основе онтологии, и в рамках этой онтологии, на основе отношений между экземплярами задач и методов их решения, создание комплектов эффективных алгоритмов, применимых для решения задачи распределения нагрузки в гетерогенной, динамичной и распределенной среде в соответствии с формулировкой задачи и в рамках «жадной» стратегии.

Результаты и их обсуждение

Онтология предметной области решения задач распределения нагрузки

Основными классами онтологии предметной области решения задач распределения нагрузки является класс «Алгоритмы» и класс «Данные задачи реконфигурации». Класс «Алгоритмы»

содержит подклассы, относящиеся к общему описанию алгоритмов, например: GRASP, Имитация отжига, простой генетический алгоритм, случайный поиск (метод Монте-Карло). Поскольку онтология является дополняемой, на начальном этапе ее разработки ограничимся перечисленными алгоритмами.

Внутри каждого класса-алгоритма определены подклассы – признаки, в рамках которых могут быть классифицированы алгоритмы данного типа. Например, алгоритмы имитации отжига различают, в основном, по следующим признакам: закон изменения температуры, порождающее семейство распределений вероятностей, функция принятия нового состояния. Также подклассом класса «Имитация отжига» является «количество вычислений ЦФ», что является мерой вычислительной сложности применяемой реализации метода. На рис. 3 показан экземпляр алгоритма Имитации отжига с его отношениями с экземплярами подклассов, описывающих реализацию алгоритма имитации отжига.

Класс «Данные задачи реконфигурации» содержит подклассы:

- описание пользовательской задачи;
- описание фрагмента сети;
- число индивидуальных ограничений для устройств;
- число индивидуальных ЦФ;
- число общих ЦФ;
- число общих ограничений.

Подклассы класса «Описание пользовательской задачи» состоят из:

- амплитуды вычислительной сложности;
- амплитуды значений передаваемых объемов данных;
- диаметра графа;
- доминирующей вычислительной сложности;
- доминирующего объема передаваемых данных;
- количества подзадач в пакете;
- наличия информационных связей между задачами;
- наличия приоритетов для несвязанных задач;
- плотности связности графа.

Класс «Данные задачи реконфигурации» содержит экземпляры задач, которые, соответственно, связаны отношениями с экземплярами признаков задачи распределения нагрузки (рис. 4).

На рис. 5 показано графическое представление, где видно отношение между экземпляром постановки задачи и алгоритмом, который ее решает с высокой эффективностью.

Разработанная онтология является вспомогательным средством для последующего решения задачи выбора эффективного алгоритма в рамках поставленной общей задачи. Вполне очевидно, что при последующем дополнении разработанной онтологии по результатам проводимых экспериментальных исследований возможна реализация как логического вывода на основе продукционных правил, либо использования иных технологий ИИ в условиях неполной информации о задачах (например, классификации, а затем принятия решения по выбору эффективного алгоритма).

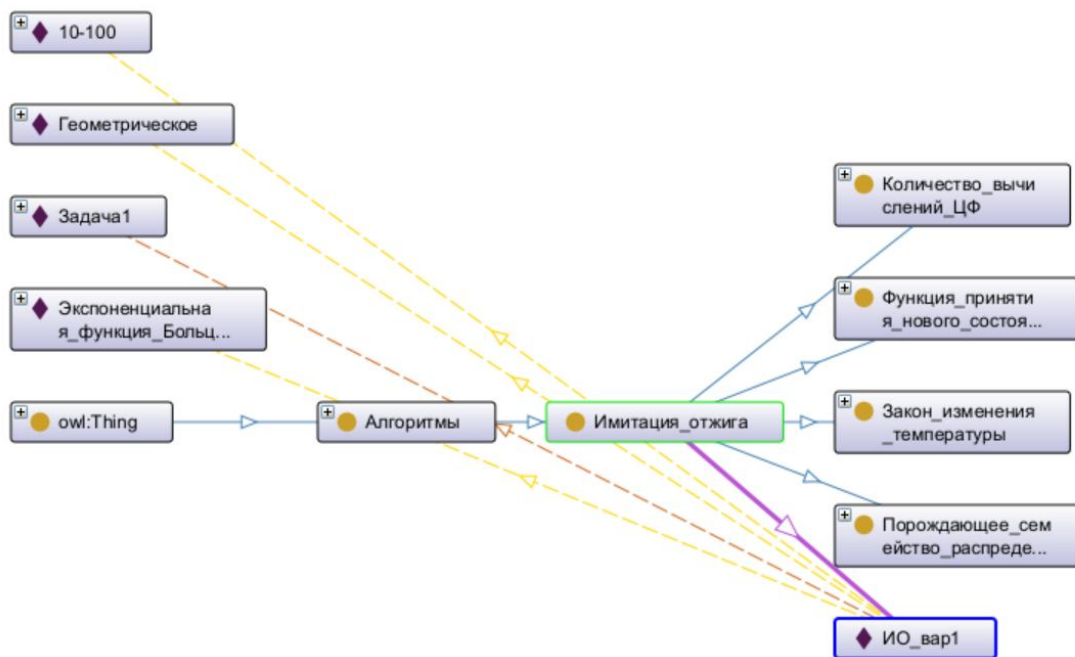


Рис. 3. Класс «Алгоритмы»

Fig. 3. "Algorithms" class

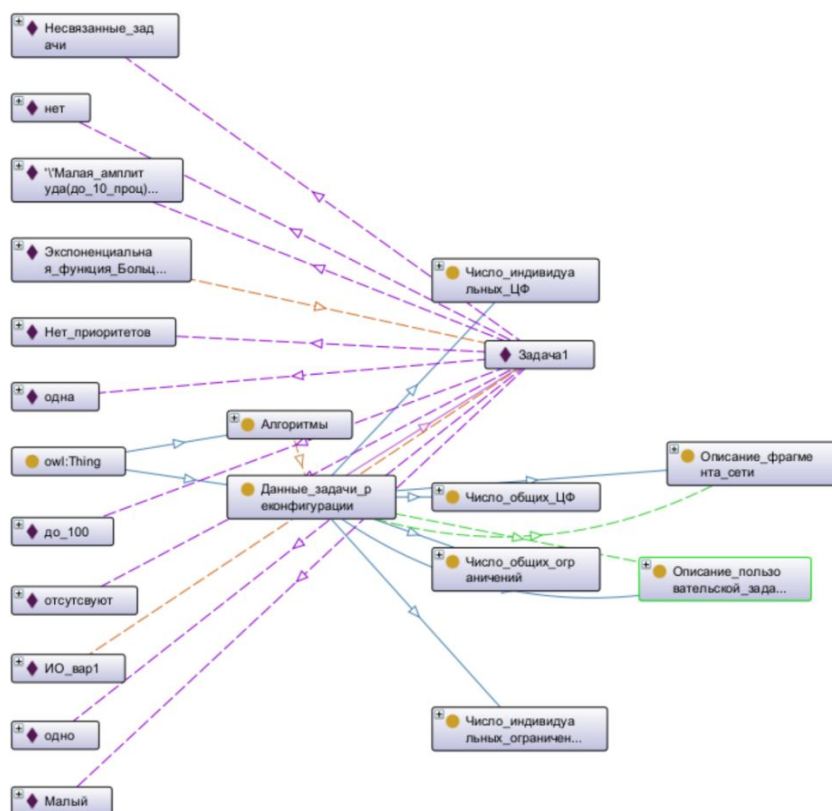


Рис. 4. Класс «Данные задачи реконфигурации»

Fig. 4. "Reconfiguration task data" class

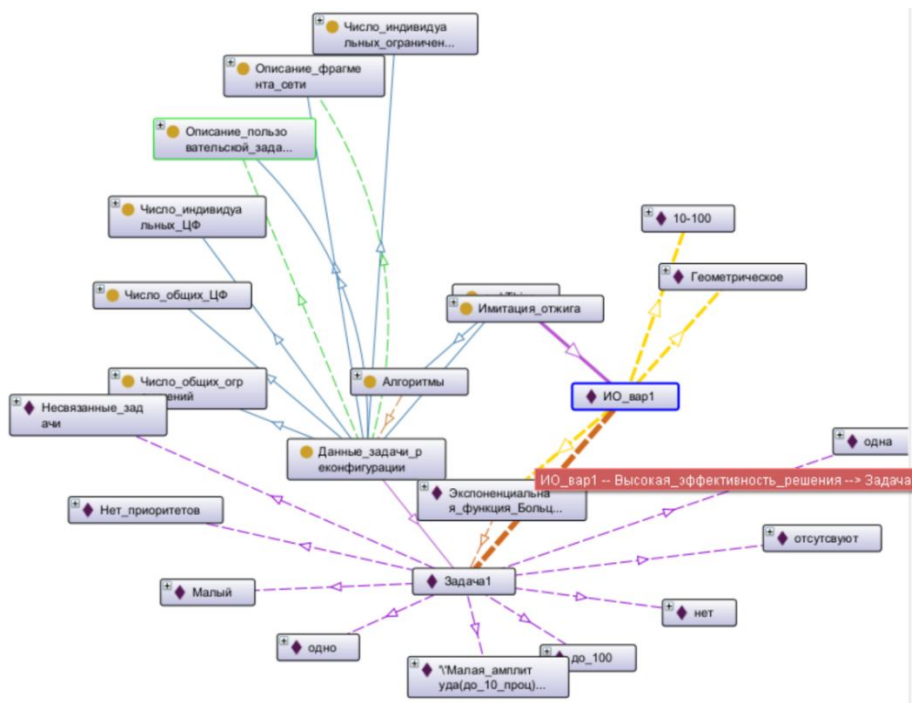


Рис. 5. Отношение «Высокая эффективность решения» между экземплярами класса «Имитация отжига» и «Описание пользовательской задачи»

Fig. 5. "High solution efficiency" relation between the "Simulated Annealing" individual and "User problem description" individual

Выводы

Данное исследование посвящено вопросам распределения вычислительных ресурсов при реализации распределенных вычислений в гетерогенных динамических распределенных вычислительных средах, частным случаем которых является среда туманных вычислений.

Ввиду отсутствия моделей задач распределения ресурсов, которые бы учитывали перечисленные аспекты систем распределенных вычислений и при этом не были бы частными реализациями, предложена модель, включающая как параметр процедуру изменения конфигурации системы.

Решение поставленной задачи возможно на основе использования «жадной» стратегии выбора наиболее эффективного алгоритма, а выбор, соответственно, возможен при наличии комплекта таковых.

Различие в эффективности используемых алгоритмов с различными параметрами относительно решения одной и той же задачи подтверждается экспериментальным исследованием – до 30% возможно улучшение качества решения, что, в целом, подтверждает актуальность формирования портфолио эффективных алгоритмов.

В рамках данного исследования была разработана онтологическая модель предметной области решения задач распределения ресурсов, в рамках которой, на основе отношений между экземплярами классов «Данные задачи реконфигурации» и «Алгоритмы» формируются комплекты алгоритмов, эффективных применительно к решению заданной задачи, что в дальнейшем позволит применять методы и технологии ИИ для быстрого выбора наиболее эффективного алгоритма.

Список литературы

1. Shams A., Shanjana S., Shaila A., Sabiha R., Mahfara H., Gandomi A. The Power of Internet of Things (IoT): Connecting the Dots with Cloud, Edge, and Fog Computing; 2023;70 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.03420>
2. Hierarchical fuzzy-based Quality of Experience (QoE)-aware application placement in fog nodes // M. Sreenivasu, S. Satish, W. Rajeev, C. Raghavendra // *Software: Practice and Experience*. 2023;53(2):263-282. <https://doi.org/10.1002/spe.3147>
3. Dynamic Offloading in Flying Fog Computing: Optimizing IoT Network Performance with Mobile Drones / M. Wei, A. Khakimov, A. Ateya, M. Elaffendi, A. Muthanna, A. Abd El-Latif, M. Muthanna // *Drones*. 2023;7(10):622. <https://doi.org/10.3390/drones7100622>
4. Bhalekar P., Ingle S. A Comparative Study of Cluster, Grid and Cloud Computing // *International Journal of New Innovations in Engineering and Technology*, 2018;9(1):8-14. URL: <https://www.ijniet.org/wp-content/uploads/2018/11/2.pdf>.

5. Топорков В.В. Модели распределенных вычислений. М.: Физматлит, 2011. 320 с. URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=75957>.
6. Барский А.Б. Параллельные информационные технологии. М.: ИНТУИТ; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 503 с.
7. Методы и эвристики планирования в распределенных вычислениях с неотчуждаемыми ресурсами / В.В. Топорков, А.В. Бобченков, Д.М. Емельянов, А.С. Целищев // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика; 2014;3(2);43-62. URL: <https://www.mathnet.ru/rus/vyurv37>.
8. Метод повышения надежности за счет реконфигурации ресурсов в системах мониторинга и диагностики опасных природных явлений / Э.В. Мельник, М.В. Орда-Жигулина, Д.В. Орда-Жигулина, А.А. Родина // Известия ТулГУ. Серия: Технические науки; 2020;2:18-26. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-povysheniya-nadezhnosti-za-schet-rekonfiguratsii-resursov-v-sistemah-monitoringa-i-dagnostiki-opasnyh-prirodnyh-yavleniy>.
9. Топорков В.В., Емельянов Д.М., Топоркова А.С. Анализ состояния исследований в области методов и алгоритмов планирования в грид и облачных вычислениях // ИТНОУ: информационные технологии в науке, образовании и управлении; 2018;2(6):26-31. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sostoyaniya-issledovaniy-v-oblasti-metodov-i-algoritmov-planirovaniya-v-grid-i-oblachnyh-vychisleniyah>.
10. Sukhoroslov O. Scheduling of Workflows with Task Resource Requirements in Cluster Environments. In: Malyshkin V. (eds) Parallel Computing Technologies. PaCT 2023: Lecture Notes in Computer Science; 2023;14098:177-196. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-41673-6_14
11. Singh R.M., Awasthi L.K., Sikka G. Techniques for Task Scheduling in Cloud and Fog Environment: A Survey. In: Singh P., Sood S., Kumar Y., Paprzycki M., Pljonkin A., Hong WC. (eds) Futuristic Trends in Networks and Computing Technologies. FTNCT 2019. Communications in Computer and Information Science; 2020;1206:673-685. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4451-4_53
12. Nguyen B.M., Thi Thanh Binh H., Do Son B. Evolutionary algorithms to optimize task scheduling problem for the IoT based bag-of-tasks application in cloud-fog computing environment. Applied Science; 2019;9(9):1730. <https://doi.org/10.3390/app9091730>
13. Natesan G., Chokkalingam A. Task scheduling in heterogeneous cloud environment using mean grey wolf optimization algorithm. ICT Express; 2019;5(2):110-114. <https://doi.org/10.1016/j.icte.2018.07.002>
14. Narendrababu R.G., Phani K. S.: Modified ant colony optimization algorithm for task scheduling in cloud computing systems. In: Satapathy S.C., Bhateja V., Das S. (eds.) // Smart Intelligent Computing and Applications. SIST. Proceedings of the Second International

15. Bitam S., Zeadally S., Mellouk A. Fog computing job scheduling optimization based on bees swarm // *Enterprise Information Systems*; 2018;12(4);373–397. <https://doi.org/10.1080/17517575.2017.1304579>

16. Heuristic minconflicts optimizing technique for load balancing on fog computing. In: Xhafa F., Barolli L., Greguš M. (eds.) / M.B. Kamal, N. Javaid, S.A.A. Naqvi, H. Butt, T. Saif, M.D. Kamal // *The 10th International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems (INCoS-2018)*; 2019;23: 207–219. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-98557-2_19

17. Никишин К. И. Балансировка нагрузки данных в распределенной сети через прокси-сервер Nginx // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2022; 26(3): 98-111. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-98-111>.

18. Борзов Д.Б., Титов В.С., Басов Р.Г. Алгоритм и устройство планирования расписания загрузки процессоров в мультипроцессорных системах // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2019; 23(5): 161-174. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-161-174>

19. Борзов Д.Б., Масюков И.И. Планирование загрузки процессоров в мультипроцессорных системах критического назначения // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2018. Т. 22, № 6(81). С. 168-174.

20. Назаров С.В. Оптимизация вычислительного процесса бортовых вычислительных систем // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2018. Т. 22, № 2(77). С. 6-17.

References

1. Shams A, Shanjana S, Shaila A, Sabiha R, Mahfara H, Gandomi A. The Power of Internet of Things (IoT): Connecting the Dots with Cloud, Edge, and Fog Computing; 2023; 70 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.03420>

2. Sreenivasu M, Satish S, Rajeev W, Raghavendra C. Hierarchical fuzzy-based Quality of Experience (QoE)-aware application placement in fog nodes. *Software: Practice and Experience*. 2023;53(2):263-282. <https://doi.org/10.1002/spe.3147>

3. Wei M, Khakimov A, Ateya A, Elaffendi M, Muthanna A, Abd El-Latif A, Muthanna M. Dynamic Offloading in Flying Fog Computing: Optimizing IoT Network Performance with Mobile Drones. *Drones*. 2023;7(10):622. <https://doi.org/10.3390/drones7100622>

4. Bhalekar P., Ingle S. A Comparative Study of Cluster, Grid and Cloud Computing. *International Journal of New Innovations in Engineering and Technology*, 2018;9(1):8-14. Available from: <https://www.ijniet.org/wp-content/uploads/2018/11/2.pdf>.

5. Toporkov V.V. *Modeli raspredelennykh vychislenii* [Distributed computing models]. Moscow, Phizmatlit Publ., 2011. 320 c. Available at: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=75957>.

6. Barskiy A.B. *Parallel'nye informatsionnye tekhnologii* [Parallel Information technologies]. Moscow, 2007. 503p.

7. Toporkov V.V., Bobchenkov A.V., Yemelianov D.M., Tselishev A.S. Metody i evristiki planirovaniya v raspredelennykh vychisleniyakh s neot-chuzhdaemymi resursami [Methods and Heuristics of planning in distributed computing with the inalienable resources]. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Vychislitel'naya matematika i informatika = Vestnik SUSU. Series: Computational Mathematics and Informatics*; 2014;3(2);43-62. Available at: <https://www.mathnet.ru/rus/vyurv37>.

8. Melnik E.V., Orda-Zhigulina M.V., Orda-Zhigulina D.V., Rodina A.A. Metod povysheniya nadezhnosti za schet rekonfiguratsii resursov v sistemakh monitoringa i diagnostiki opasnykh prirodnykh yavlenii [Reliability improvement method by means of resource reconfiguration in the systems of hazardous nature incidents monitoring and control]. *Izvestiya TulGU. Seriya: Tekhnicheskie nauki = Proceedings TSU. Series: Technical science*; 2020;2:18-26. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-povysheniya-nadezhnosti-za-schet-rekonfiguratsii-resursov-v-sistemah-monitoringa-i-diaagnostiki-opasnykh-prirodnyh-yavleniy>.

9. Toporkov V.V., Yemelianov D.M., Toporkova A.C. Analiz sostoyaniya issledovaniy v oblasti metodov i algoritmov planirovaniya v grid i oblachnykh vychisleniyakh [The analysis of research state in the area of planning methods and algorithms in GRID and cloud computing]. *ITNOU: informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii = ITNOU: information technologies in science, education and management*; 2018;2(6):26-31. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sostoyaniya-issledovaniy-v-oblasti-metodov-i-algoritmov-planirovaniya-v-grid-i-oblachnykh-vychisleniyah>.

10. Sukhoroslov O. Scheduling of Workflows with Task Resource Requirements in Cluster Environments. In: Malyshkin V. (eds) *Parallel Computing Technologies*. PaCT 2023: Lecture Notes in Computer Science; 2023;14098:177-196. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-41673-6_14

11. Singh R.M., Awasthi L.K., Sikka G. Techniques for Task Scheduling in Cloud and Fog Environment: A Survey. In: Singh P., Sood S., Kumar Y., Paprzycki M., Pljonkin A., Hong WC (eds) *Futuristic Trends in Networks and Computing Technologies*. FTNCT 2019.

Communications in Computer and Information Science; 2020;1206:673-685. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4451-4_53

12. Nguyen B.M., Thi Thanh Binh H., Do Son B. Evolutionary algorithms to optimize task scheduling problem for the IoT based bag-of-tasks application in cloud–fog computing environment. *Applied Science*; 2019;9(9):1730. <https://doi.org/10.3390/app9091730>

13. Natesan G., Chokkalingam A. Task scheduling in heterogeneous cloud environment using mean grey wolf optimization algorithm. *ICT Express*; 2019;5(2):110–114. <https://doi.org/10.1016/j.icte.2018.07.002>

14. Narendrababu R.G., Phani K.S. Modified ant colony optimization algorithm for task scheduling in cloud computing systems. In: Satapathy S.C., Bhateja V., Das S. (eds.) *Smart Intelligent Computing and Applications. SIST. Proceedings of the Second International Conference on SCI 2018*; 2019;104:357–365. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1921-1_36

15. Bitam S., Zeadally S., Mellouk A. Fog computing job scheduling optimization based on bees swarm. *Enterprise Information Systems*; 2018;12(4):373–397. <https://doi.org/10.1080/17517575.2017.1304579>

16. Kamal M.B., Javaid N., Naqvi S.A.A., Butt H., Saif T., Kamal M.D.: Heuristic min-conflicts optimizing technique for load balancing on fog computing. In: Xhafa F., Barolli L., Greguš M. (eds.). *The 10th International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems (INCoS-2018)*; 2019;23: 207–219. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-98557-2_19

17. Nikishin K.I. Load Balancer of Data in a Distributed Network via Nginx Proxy Server. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(3): 98-111 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-98-111>.

18. Borzov D. B., Titov V. S., Basov R.G. Algorithm and Planning Device for CPU Loading in Multiprocessor Systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(5): 161-174 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-161-174>

19. Borzov D.B., Masyukov I.I. Planning of Download Processors in Multiprocessor Systems of Critical Purpose. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2018, vol. 22, no. 6(81), pp. 168-174.

20. Nazarov S.V. Optimization of Computing Process of the Onboard Computing Systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2018, vol. 22, no. 2(77), pp. 6-17.

Информация об авторах / Information about the Authors

Клименко Анна Борисовна, кандидат технических наук, доцент кафедры Фундаментальной и прикладной математики, Институт информационных наук и технологий безопасности Российского государственного гуманитарного университета, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: anna_klimenko@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6527-8108>

Anna B. Klimenko, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Fundamental and Applied Mathematics department, Institute of IT and Security Technologies of Russian State University for the Humanities, Moscow, Russian Federation, e-mail: anna_klimenko@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6527-8108>

Алиева Эльвира Мурадовна, студент кафедры Фундаментальной и прикладной математики, Институт информационных наук и технологий безопасности Российского государственного гуманитарного университета, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: anna_klimenko@mail.ru

Elvira M. Alieva, Student of Fundamental and Applied Mathematics department, Institute of IT and Security Technologies of Russian State University for the Humanities, Moscow, Russian Federation, e-mail: anna_klimenko@mail.ru

Сальников Андрей Евгеньевич, студент кафедры Фундаментальной и прикладной математики, Институт информационных наук и технологий безопасности Российского государственного гуманитарного университета, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: anna_klimenko@mail.ru

Andrey Y. Salnikov, Student of Fundamental and Applied Mathematics department, Institute of IT and Security Technologies of Russian State University for the Humanities, Moscow, Russian Federation, e-mail: anna_klimenko@mail.ru

Когнитивное моделирование и прогнозирование потребления электроэнергии

А.В. Какурина¹, А.С. Сизов¹, Ю.А. Халин¹ ✉

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

✉ e-mail: yur-khalin@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Разработка прогнозной модели энергопотребления и оценка факторов, влияющих на его потребление. Полученные прогнозные оценки энергопотребления обеспечат повышение эффективности принимаемых организационных решений органами административно-территориального управления.

Методы. В статье представлен аналитический обзор существующих методов когнитивного моделирования и прогнозирования потребления электрической энергии, рассмотрено описание программной реализации информационно-вычислительной системы, позволяющей производить прогноз потребления электроэнергии населением административно-территориального образования. Предложен подход к описанию факторов потребления электроэнергии как населением, так и различными отраслями народного хозяйства, а также организациями, занимающимися оказанием различных услуг. Разработано специальное программное обеспечение, которое позволяет в автоматизированном режиме получать модельные результаты потребления электроэнергии, проводить факторный анализ энергопотребления. Приведена экспериментальная проверка работы программы когнитивного моделирования и прогнозирования потребления электроэнергии населением Львовского района Курской области. Разработанное программное обеспечение также позволяет проводить оценку адекватности полученных результатов и оперативно проводить корректировку параметров модели.

Результаты. В результате исследования была разработана нечёткая когнитивная карта энергопотребления для муниципального образования. Выделены концепты предметной области, описывающие влияние различных групп факторов на уровень потребления электрической энергии. Получены прогнозные оценки потребления электроэнергии, в основе которых лежали данные за ретроспективный период. Для полученных оценок определены показатели адекватности, основанные на расчёте статистических критериев.

Заключение. Результаты исследования показали, что сочетание когнитивных и статистических методов позволяет достичь адекватного решения при решении задачи прогнозирования энергопотребления.

Ключевые слова: потребление электроэнергии; когнитивное моделирование; нечёткая когнитивная карта; анализ временных рядов; прогнозирование; стационарность; построение модели.

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

Для цитирования: Какурина А.В., Сизов А.С., Халин Ю.А. Когнитивное моделирование и прогнозирование потребления электроэнергии // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(4): 44-61. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-4-44-61>.

Поступила в редакцию 14.10.2023

Подписана в печать 06.11.2023

Опубликована 21.12.2023

Cognitive Modelling and Forecasting of Electricity Consumption

Anastasia V. Kakurina ¹, Alexander S. Sizov ¹, Yuri A. Khalin ¹ ✉

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

✉ e-mail: yur-khalin@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. Development of a forecast model of energy consumption and assessment of factors influencing its consumption. The obtained forecast estimates of energy consumption will improve the quality and efficiency of management decisions at all levels of administrative management.

Methods. The article presents an analytical review of the existing methods of cognitive modelling and forecasting of electric power consumption, the description of the software implementation of the information-computing system that allows to make a forecast of electric power consumption by the population of the administrative-territorial formation. The approach to the description of factors of electric power consumption by both population and various branches of national economy, as well as organisations engaged in rendering various services has been proposed. Special software has been developed, which allows to obtain model results of electric power consumption in an automated mode, to carry out factor analysis of power consumption. The experimental verification of the work of the programme of cognitive modelling and forecasting of electric power consumption by the population of Lgovsky district of Kursk region is given. The developed software also makes it possible to evaluate the adequacy of the obtained results and promptly adjust the model parameters.

Results. As a result of the research a fuzzy cognitive map of energy consumption for a municipal entity was developed. The concepts of the subject area describing the influence of various groups of factors on the level of electric energy consumption were identified. Forecast estimates of electricity consumption were obtained, which were based on the data for the retrospective period. Adequacy indicators based on the calculation of statistical criteria are determined for the obtained estimates.

Conclusion. The results of the study have shown that the combination of cognitive and statistical methods allows to achieve an adequate solution when solving the problem of energy consumption forecasting.

Keywords: energy consumption; cognitive modelling; fuzzy cognitive map; time series analysis; forecasting; stationarity; model building.

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

Funding: The work was carried out within the framework of the implementation of the development program of the Southwest State University of the project "Priority 2030".

For citation: Kakurina A. V., Sizov A. S., Khalin Y. A. Cognitive Modelling and Forecasting of Electricity Consumption. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(4): 44-61 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-4-44-61>.

Received 14.10.2023

Accepted 06.11.2023

Published 21.12.2023

Введение

Современное общество сталкивается с растущим спросом на электроэнергию, что подчеркивает необходимость разработки эффективных методов моделирования и прогнозирования потребления электроэнергии населением в различных регионах. В работе предлагается способ моделирования энергопотребления, основанный на совместном использовании статистических и когнитивных методов. Этот синтез методологий направлен на повышение точности прогнозов и более глубокое понимание факторов, формирующих динамику энергопотребления. Исследование включает анализ влияния различных факторов на потребление электроэнергии, а также разработку эффективных методов прогнозирования для поддержки принятия решений в энергетическом секторе.

Прогнозирование потребления электроэнергии является важным аспектом управления и планирования в сфере энергетики по нескольким причинам [1, 2, 3]:

- обеспечение устойчивости энергосистем (предвидение будущего потребления электроэнергии позволяет операторам энергосистем подготавливаться к возможным пиковым нагрузкам и обеспечивать стабильное функционирование энергетической инфраструктуры);
- эффективное планирование производства (энергетическим компаниям важно знать, какое количество электроэнергии будет

необходимо в будущем, чтобы оптимально распределить ресурсы, управлять генерацией и поддерживать баланс между предложением и спросом);

- экономия ресурсов (предварительное знание пиковых и минимальных точек потребления позволяет лучше использовать ресурсы, такие, как топливо и вода, что способствует энергосбережению и снижению затрат);

- интеграция возобновляемых источников энергии (прогнозирование потребления важно для эффективной интеграции возобновляемых источников, таких, как солнечная и ветровая энергия, в энергетическую сеть);

- снижение выбросов (предсказание пиковых нагрузок помогает управлять производством электроэнергии более эффективно, что в свою очередь может снизить выбросы парниковых газов и воздействие на окружающую среду).

В целом, прогнозирование потребления электроэнергии способствует эффективному и устойчивому функционированию энергетической системы, что крайне важно для обеспечения потребностей общества в электроэнергии.

В современной энергетике, где изменения в потреблении электроэнергии играют ключевую роль в устойчивом развитии, когнитивное моделирование выделяется как перспективный подход для прогнозирования динамики потребления [4, 5, 6, 7]. Когнитивное моделирование предоставляет возможность учесть сложные взаимосвязи и факторы, влияющие

на потребление электроэнергии, повышая тем самым точность прогнозов и эффективность управления энергетическими ресурсами. Исследование охватывает теоретические основы когнитивного моделирования, его применение в прогнозировании потребления электроэнергии, а также представляет практические аспекты реализации данного метода для более точных и адаптивных прогнозов в энергетической сфере. Когнитивное моделирование, являясь инновационным методом в области прогнозирования потребления электроэнергии, предоставляет ценные инструменты для более точного и комплексного анализа факторов, влияющих на энергопотребление. Эта методология позволяет учесть не только статистические зависимости, но и психологические, социокультурные и другие параметры, которые могут оказывать влияние на поведение потребителей электроэнергии. Подход, основанный на когнитивном моделировании, не только повышает точность прогнозов, но также способствует более глубокому пониманию динамики энергопотребления, что является ключевым элементом разработки эффективных стратегий управления энергетическими ресурсами в будущем [8, 9, 10, 11].

Прогнозирование потребления электроэнергии области играет важную роль, поскольку позволяет энергетическим компаниям и органам управления разрабатывать стратегии для обеспечения стабильного и эффективного энергоснаб-

жения. Основными группами методов прогнозирования из них являются [12, 13, 14, 15]:

- статистические (использование временных рядов и статистических моделей для анализа и прогнозирования трендов в потреблении электроэнергии);
- машинное обучение (применение алгоритмов машинного обучения, таких как нейронные сети или деревья решений, для более точного прогнозирования, учитывая множество входных параметров);
- экспертные оценки (включение мнения экспертов в процесс прогнозирования, особенно при учете специфических факторов, которые могут быть сложно учесть в автоматизированных моделях).

Эффективное прогнозирование потребления электроэнергии является неотъемлемой частью современного управления энергетическими ресурсами. Разнообразные методы позволяют создавать более точные и адаптивные модели, учитывая разнообразные воздействия на потребление электроэнергии. Применение современных методов прогнозирования не только способствует оптимизации оперативного управления энергоресурсами, но и создает основу для разработки устойчивых стратегий, направленных на более эффективное использование энергии в будущем.

Материалы и методы

Для моделирования потребления электроэнергии эффективным средством

является когнитивное моделирование, это обусловлено слабоструктурированностью предметной области (потребление электроэнергии) и плохоформализуемостью многих факторов, влияющих на энергопотребление. В основе когнитивного подхода к моделированию энергопотребления лежит построение нечёткой когнитивной карты предметной области, представляющей собой взвешенный знаковый ориентированный граф, вершинами которого являются концепты (основные атрибуты и факторы энергопотребления), а дуги показывают степень влияния (с учётом знака) выделенных концептов энергопотребления друг на друга [16, 17, 18, 19].

При моделировании энергопотребления необходимо учитывать разнообразные факторы, на него влияющие [2, 3]:

1. Демографические (изменения в населении, структуре возрастов и социальных трендах могут существенно влиять на потребление электроэнергии).

2. Экономико-финансовые (цена одного кВт-часа, уровень доходов жителей исследуемого региона, индустриальная активность населения региона напрямую влияют на объем потребляемой электроэнергии).

3. Технологические (внедрение новых технологий, электромобилей, смарт-домов и других инноваций оказывает влияние на общее потребление электроэнергии).

4. Климатические (погода и сезонные изменения также оказывают существенное воздействие на энергопотреб-

ление, особенно в отопительный и кондиционированный периоды).

На основе выделенных факторов, и базируясь результатах, полученных в работах [20, 4, 18, 19], построим нечёткую карту энергопотребления (рис. 1).

В данной когнитивной карте выделены следующие концепты:

C_0 – энергопотребление;

C_1 – количество трудоспособного населения;

C_2 – количество нетрудоспособного населения;

C_3 – промышленная активность населения;

C_4 – число промышленных предприятий;

C_5 – число организаций в сфере услуг;

C_6 – доходы населения;

C_7 – стоимость электроэнергии;

C_8 – климатические условия;

C_9 – уровень экологической обстановки.

Для решения задачи прогнозирования потребления электроэнергии будем использовать комбинированный метод, основанный на синтезе статистических моделей и машинном обучении. Модели статистического прогнозирования оперируют математическими методами, которые взаимодействуют с законами и паттернами статистики для выявления трендов и закономерностей в предоставленных данных. В рамках рассматриваемой задачи прогнозирования потребления электроэнергии, авторегрессионная модель имеет ряд преимуществ перед структурными (обучаемыми) моделями.

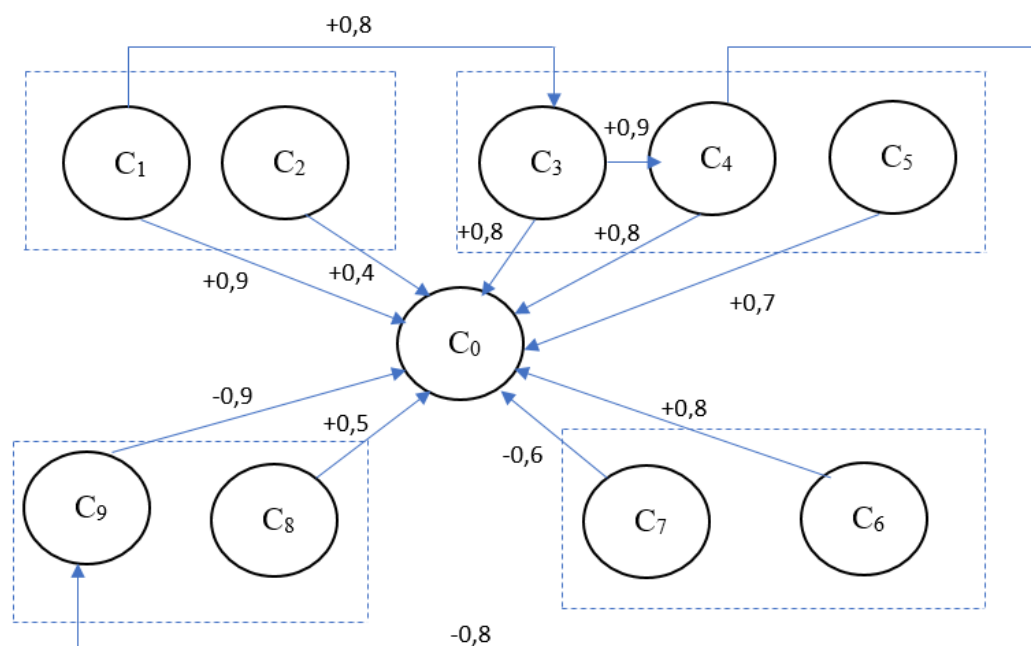


Рис. 1. Нечёткая когнитивная модель зависимости потребления электрической энергии от различных факторов

Fig. 1. Fuzzy cognitive model of dependence of electric energy consumption on various factors

Одной из наиболее широко используемых моделей для прогнозирования временных рядов является модель ARIMA [1, 12, 13]. Данная модель комбинирует авторегрессию и скользящее среднее с интегрированием временных рядов. Она особенно эффективна при прогнозировании временных рядов с выраженными трендами и сезонными колебаниями.

Более эффективным инструментом для анализа временных рядов является модель SARIMAX, поскольку позволяет учитывать сезонные колебания, тренды и воздействие внешних факторов. Она является расширением классической модели ARIMA. Одна из главных особенностей SARIMAX – возможность включения внешних переменных, не являющихся частью временного ряда,

для улучшения качества прогноза. Это может быть, например, включение экономических показателей, погодных условий или любых других факторов, которые могут влиять на прогнозируемую величину. При использовании модели SARIMAX необходимо проводить диагностику для уверенности в том, что все предположения, сделанные моделью, не были нарушены.

Результаты и их обсуждение

В основе прогнозной модели была использована модифицированная модель SARIMAX, которая учитывает сезонность и устойчивые трендовые закономерности.

В качестве временного ряда, для которого был построен прогноз, использовались данные об электропотреблении

населением Льговского района Курской области за 2018–2022 годы.

Временной ряд потребления электроэнергии был исследован на стационарность. Автокорреляционная функция указывает на нестационарность временного ряда. С помощью аддитивной и мультипликативной моделей были выделены составляющие временного ряда (рис. 2-3).

Аддитивная и мультипликативная модели ряда представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned} y_t(A) &= T_t + S_t + L_t, \\ y_t(M) &= T_t \times S_t \times L_t, \end{aligned} \quad (1)$$

где y_t – уровень динамики ряда;

T_t – трендовая компонента;

S_t – сезонная компонента;

L_t – нерегулярная компонента.

На представленных графиках присутствуют ярко выраженные тренд и сезонность. На основе проведенных иссле-

дований можно сделать вывод о том, что временной ряд не является стационарным. Этот факт подтверждается с помощью проверки ряда на стационарность с использованием критерия KPSS (рис. 4).

Критерий KPSS (Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin) используется для тестирования на стационарность временного ряда. Тест проверяет гипотезу о том, что ряд стационарен в предположении, что он может быть представлен в виде тренда с постоянной дисперсией и стационарной остаточной ошибкой.

Если рассматриваемый временной ряд имеет вид:

$$\begin{aligned} y_t &= c_t + \delta t + e_t, \\ c_t &= c_{t-1} + u_t, \end{aligned} \quad (2)$$

где δ – коэффициент тренда; e_t – некоторый стационарный процесс; u_t – некоторый независимый и одинаково распределенный процесс с математическим ожиданием, равным нулю, и дисперсией σ^2 .

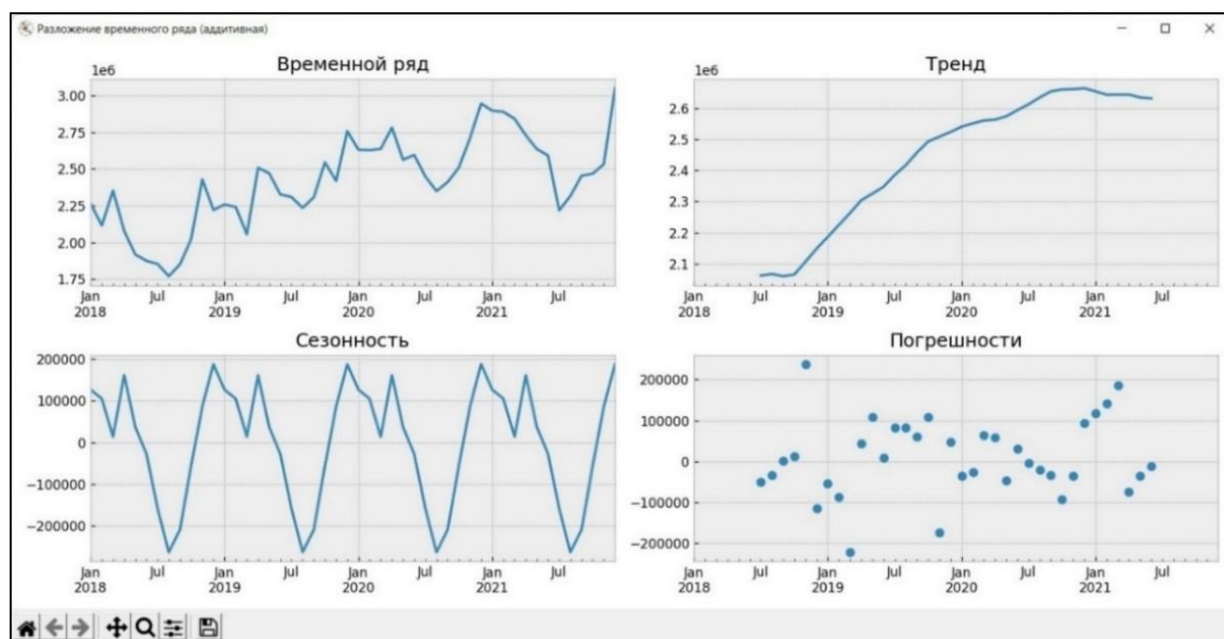


Рис. 2. Графики временного ряда и его составляющих в аддитивной модели

Fig. 2. Graphs of time series and its components in the additive model

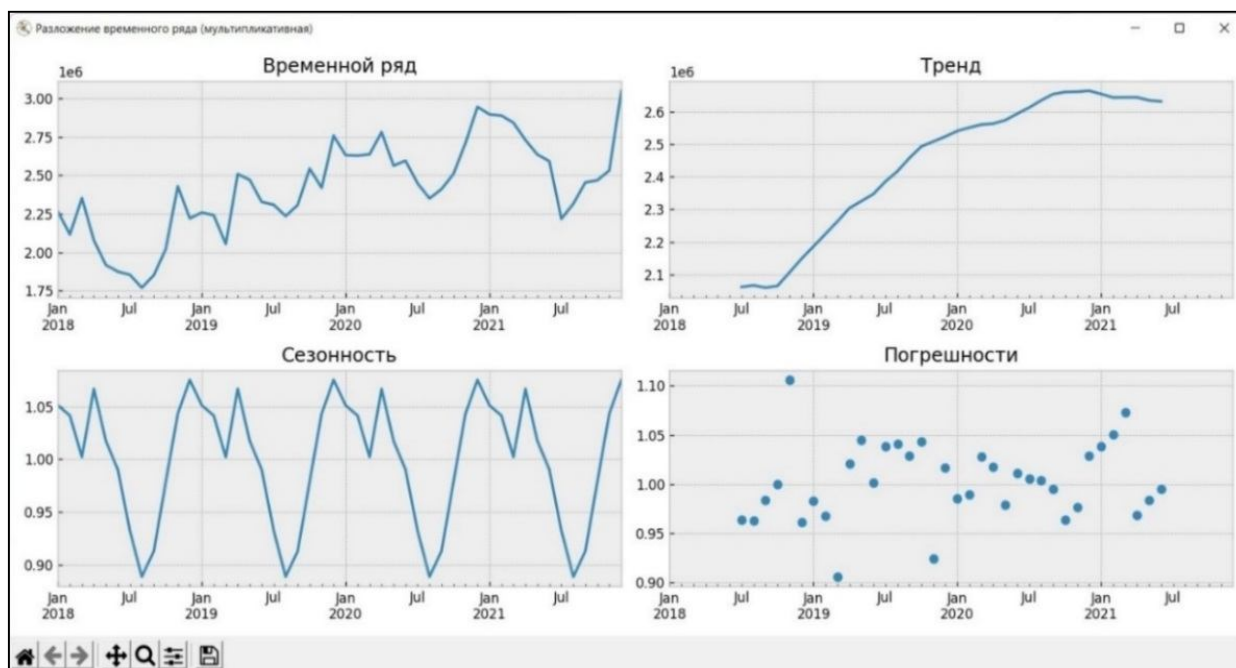


Рис. 3. Графики временного ряда и его составляющих в мультипликативной модели

Fig. 3. Graphs of time series and its components in the multiplicative model

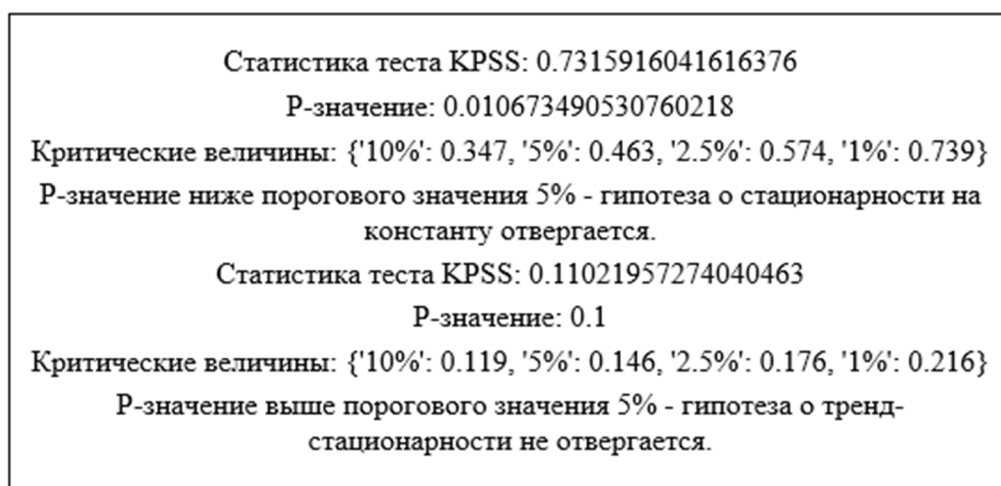


Рис. 4. Проверка ряда на стационарность с использованием критерия KPSS

Fig. 4. Checking the series for stationarity using the KPSS criterion

Исследование на стационарность ряд первых разностей показало, что нестационарный временной ряд потребления электроэнергии является интегрированным рядом первого порядка.

На рис. 5 представлены графики автокорреляции и частной автокорреляции для интегрированного ряда.

Для расчета параметров модели были использованы информационные критерии, которые используются для сравнения эффективности моделей в процессе линейной регрессии.

При выборе между моделями обычно выбирают ту, которая имеет более низкое значение AIC или SIC(BIC), так как эти

критерии стремятся найти баланс между точностью и сложностью модели.

Для различных наборов параметров модели ARIMA был проведен расчет информационных критериев AIC и SIC(BIC) (табл. 1).

Дальнейшие исследования показали, что необходимо сделать выбор параметров в пользу модели ARIMA(3,1,2). На рис. 6 отражена информация по вышеуказанной модели.

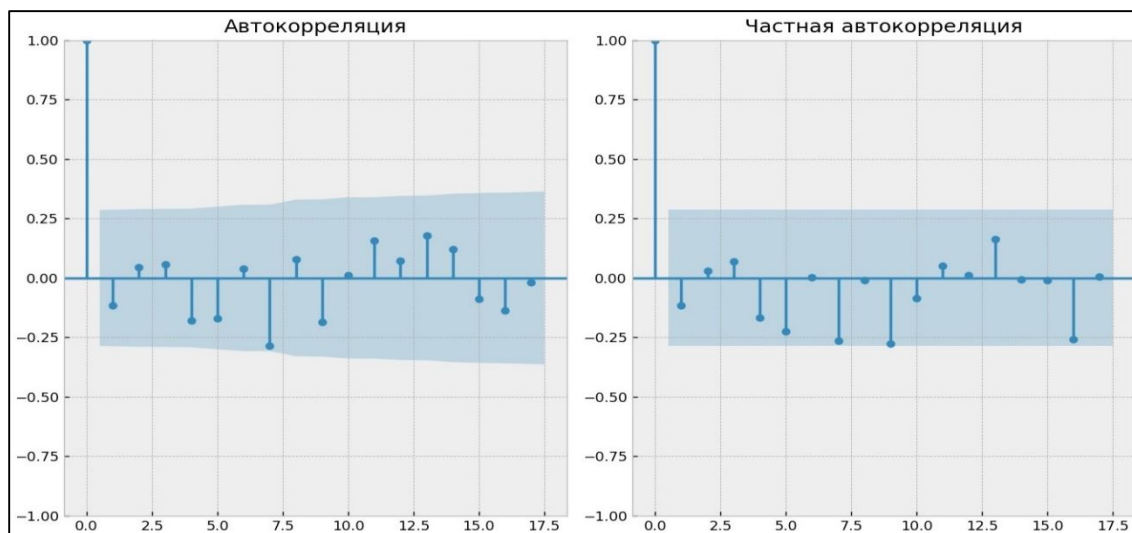


Рис. 5. Графики автокорреляции и частной автокорреляции интегрированного ряда

Fig. 5. Plots of autocorrelation and partial autocorrelation integrated series

Таблица 1. Количественные оценки информационных критериев AIC и SIC(BIC)

Table 1. Quantitative assessments of the AIC and SIC(BIC) information criteria

Входные параметры / Input parameters			Информационные критерии для модели ARIMA / Information criteria for the ARIMA model	
p	d	q	AIC	SIC(BIC)
0	1	1	1275.9675855741514	1279.6678807775716
0	1	2	1276.4046512719774	1281.9550940771076
0	1	3	1276.7600856412128	1284.1606760480530
1	1	0	1275.7885942386506	1279.4888894420708
1	1	1	1276.2107136726697	1281.7611564778
1	1	2	1279.561079828785	1286.9616702356252
1	1	3	1276.5810493628974	1285.8317873714477
2	1	0	1276.2994382030909	1281.849881008221
2	1	1	1277.9830398910838	1285.383630297924
2	1	2	1276.7535489876004	1286.0042869961508
2	1	3	1278.0692312524152	1289.1701168626755
3	1	0	1277.3347070064626	1284.7352974133028
3	1	2	1274.436501748808	1285.5373873590684
3	1	3	1278.885931351344	1291.8369645633143

ARIMA Results						
=====						
Dep. Variable:	VALUE	No. Observations:	48			
Model:	ARIMA(3, 1, 2)	Log Likelihood	-631.218			
Date:	Mon, 10 Jun 2022	AIC	1274.437			
Time:	07:49:22	BIC	1285.537			
Sample:	01-01-2018 - 12-01-2021	HQIC	1278.614			
=====						
	coef	std err	z	P> z	[0.025	0.975]

ar.L1	1.5694	0.165	9.532	0.000	1.247	1.892
ar.L2	-0.7515	0.252	-2.979	0.003	-1.246	-0.257
ar.L3	-0.1339	0.140	-0.957	0.039	-0.408	0.140
ma.L1	-1.7289	0.186	-9.295	0.000	-2.093	-1.364
ma.L2	0.9843	0.197	5.001	0.000	0.599	1.370
sigma2	3.377e+10	5.79e-12	5.83e+21	0.000	3.38e+10	3.38e+10
=====						
Ljung-Box (L1) (Q):	1.69	Jarque-Bera (JB):	7.32			
Prob(Q):	0.19	Prob(JB):	0.03			
Heteroskedasticity (H):	0.63	Skew:	0.66			
Prob(H) (two-sided):	0.37	Kurtosis:	4.42			

Рис. 6. Информация о модели ARIMA(3,1,2)

Fig. 6. Information on the ARIMA(3,1,2) model

Модель ARIMA(3,1,2) временного ряда потребления электроэнергии населением Львовского района Курской области имеет вид:

$$\Delta y_t + 1.5694\Delta y_{t-1} - 0.7515\Delta y_{t-2} - 0.1339\Delta y_{t-3} = e_t - 1.7289e_{t-1} + 0.9843e_{t-2}, \quad (5)$$

где $\Delta y_t = y_t - y_{t-1}$.

Из результатов произведенной оценки построенной модели следует, что в данной модели все коэффициенты значимые.

Остаточный ряд обладает нормальным распределением и незначительной автокорреляцией, близкой к нулю, что показано на рис. 7.

Остаточные ошибки колеблются вокруг среднего значения, равного нулю, и имеют равномерную дисперсию. Отсутствуют значительные отклонения точек от красной линии. Коррелограмма показывает, что остаточные ошибки не являются автокоррелированными.

Для подтверждения гипотезы о случайном характере остатков был проведен тест Льюнга-Бокса. Его результаты свидетельствуют о том, что гипотеза о случайности остатков не отвергается, и ряд остатков не коррелирован.

Среднеквадратическая ошибка построенной модели (RMSE) равна 363870.

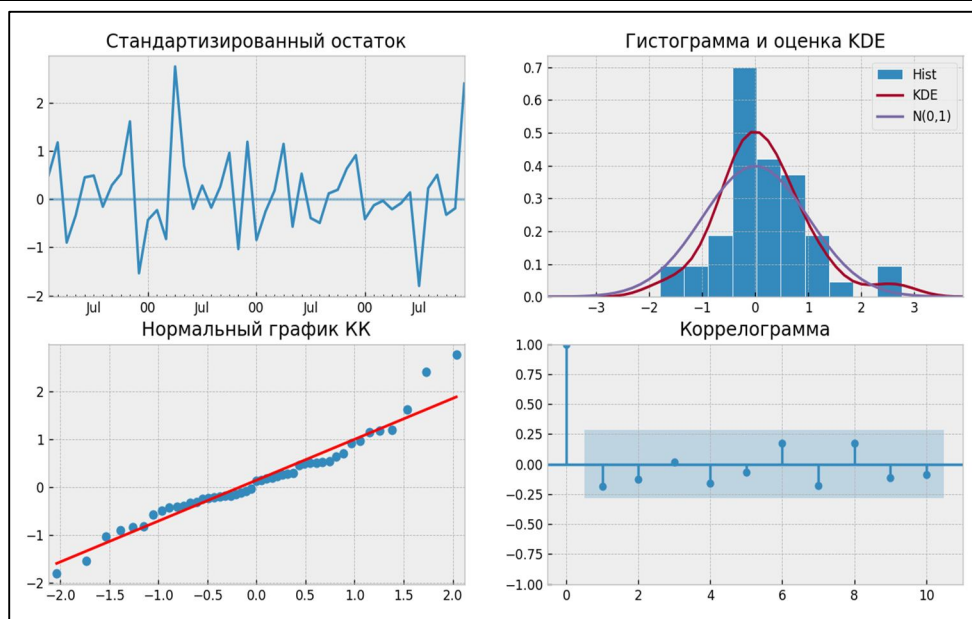


Рис. 7. Количественные оценки ARIMA(3,1,2)

Fig. 7. Quantitative assessments of the ARIMA(3,1,2)

Проблема с простой моделью ARIMA заключается в том, что она не поддерживает сезонность.

Также была построена сезонная модель SARIMAX временного ряда потребления электроэнергии. В результате проведенного сезонного дифференцирования ряда было определен порядок сезонной интеграции $D=1$. Набор параметров p, q, P, Q модели SARIMAX был определен исходя из результатов расчета информационных критериев AIC и SIC(BIC). Дальнейшие исследования показали, что необходимо сделать выбор параметров в пользу модели SARIMAX(3, 1, 2)x(1, 1, 1, 12). Информация по модели SARIMAX(3, 1, 2)x(1, 1, 1, 12) представлена на рис. 8.

Модель SARIMAX(3, 1, 2)x(1, 1, 1, 12) временного ряда потребления электроэнергии населением Львовского района Курской области имеет вид:

$$\begin{aligned} &\Delta\Delta_{12}y_t - 0.021\Delta\Delta_{12}y_{t-1} - 0.5174\Delta\Delta_{12}y_{t-2} - \\ &- 0.3068\Delta\Delta_{12}y_{t-3} + 0.5874\Delta\Delta_{12}y_{t-12} = \\ &= e_t - 0.2346e_{t-1} + 0.6978e_{t-2} - 0.9696e_{t-12}, \quad (6) \end{aligned}$$

где $\Delta\Delta_{12}y_t = \Delta_{12}y_t - \Delta_{12}y_{t-1} = (y_t - y_{t-12}) - (y_{t-1} - y_{t-13})$.

Проведенная оценка построенной модели потребления электроэнергии свидетельствует о том, что в нашей модели все коэффициенты значимые. Остаточный ряд обладает нормальным распределением и незначительной автокорреляцией, что показано на рис. 9. Остаточные ошибки колеблются вокруг среднего значения, равного нулю, и обладают равномерной дисперсией. График плотности распределения остатков подтверждает предположение о нормальном распределении с нулевым средним значением. Отсутствуют значительные отклонения точек от красной линии. Коррелограмма показывает, что остаточные ошибки не являются автокоррелированными.

SARIMAX Results						
Dep. Variable:	VALUE	No. Observations:	48			
Model:	SARIMAX(3, 1, 2)x(1, 1, 1, 12)	Log Likelihood	-472.746			
Date:	Mon, 10 Jun 2022	AIC	961.493			
Time:	07:59:23	BIC	973.936			
Sample:	01-01-2018 - 12-01-2021	HQIC	965.788			
	coef	std err	z	P> z	[0.025	0.975]
ar.L1	-0.0210	0.211	-0.100	0.021	-0.435	0.393
ar.L2	-0.5174	0.241	-2.146	0.032	-0.990	-0.045
ar.L3	-0.3068	0.081	-3.789	0.000	-0.465	-0.148
ma.L1	-0.2346	0.238	-0.984	0.025	-0.702	0.233
ma.L2	0.6978	0.213	3.273	0.001	0.280	1.116
ar.S.L12	0.5874	0.191	3.067	0.002	0.212	0.963
ma.S.L12	-0.9696	0.384	-2.527	0.011	-1.722	-0.218
sigma2	2.873e+10	1.48e-11	1.95e+21	0.000	2.87e+10	2.87e+10
Ljung-Box (L1) (Q):	2.81	Jarque-Bera (JB):	1.56			
Prob(Q):	0.09	Prob(JB):	0.46			
Heteroskedasticity (H):	0.73	Skew:	0.45			
Prob(H) (two-sided):	0.60	Kurtosis:	2.48			

Рис. 8. Информация о модели SARIMAX(3, 1, 2)x(1, 1, 1, 12)

Fig. 8. Information on the SARIMAX(3, 1, 2)x(1, 1, 1, 1, 12)

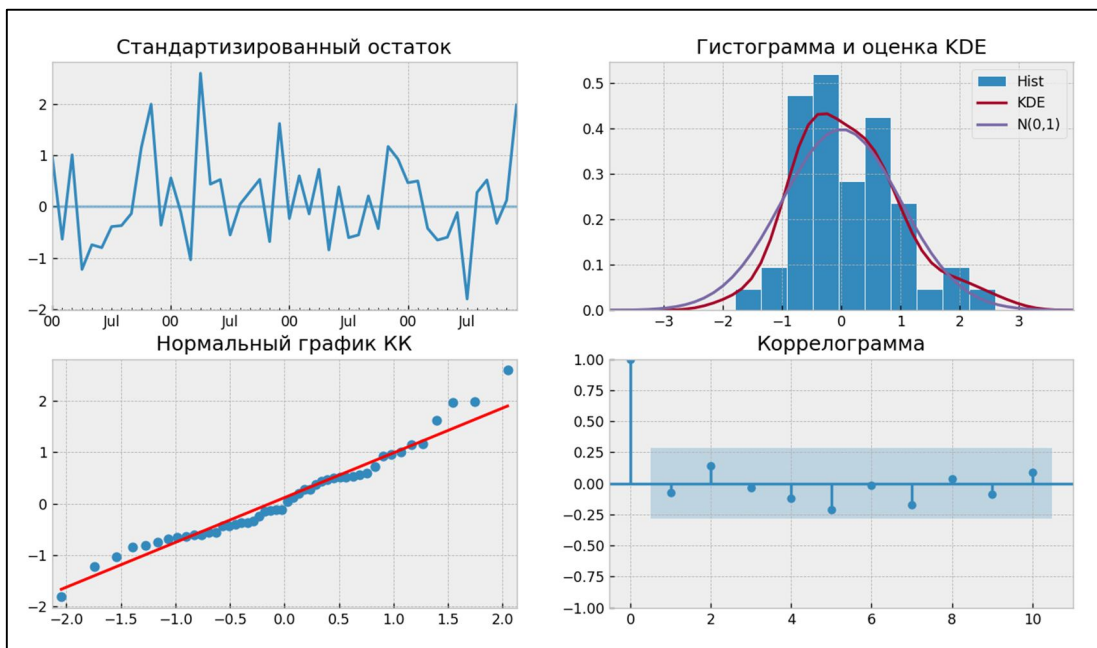


Рис. 9. Количественные оценки SARIMAX(3, 1, 2)x(1, 1, 1, 12)

Fig. 9. Quantitative assessments of the SARIMAX(3, 1, 2)x(1, 1, 1, 1, 12)

Для подтверждения гипотезы о случайном характере остатков был проведен тест Льюнга-Бокса, который свидетельствует о том, что гипотеза о случайности остатков не отвергается, и ряд остатков не коррелирован [12].

Среднеквадратическая ошибка построенной модели (RMSE) составляет 361704.

Прогнозные оценки электропотребления показаны на рис. 10-11.

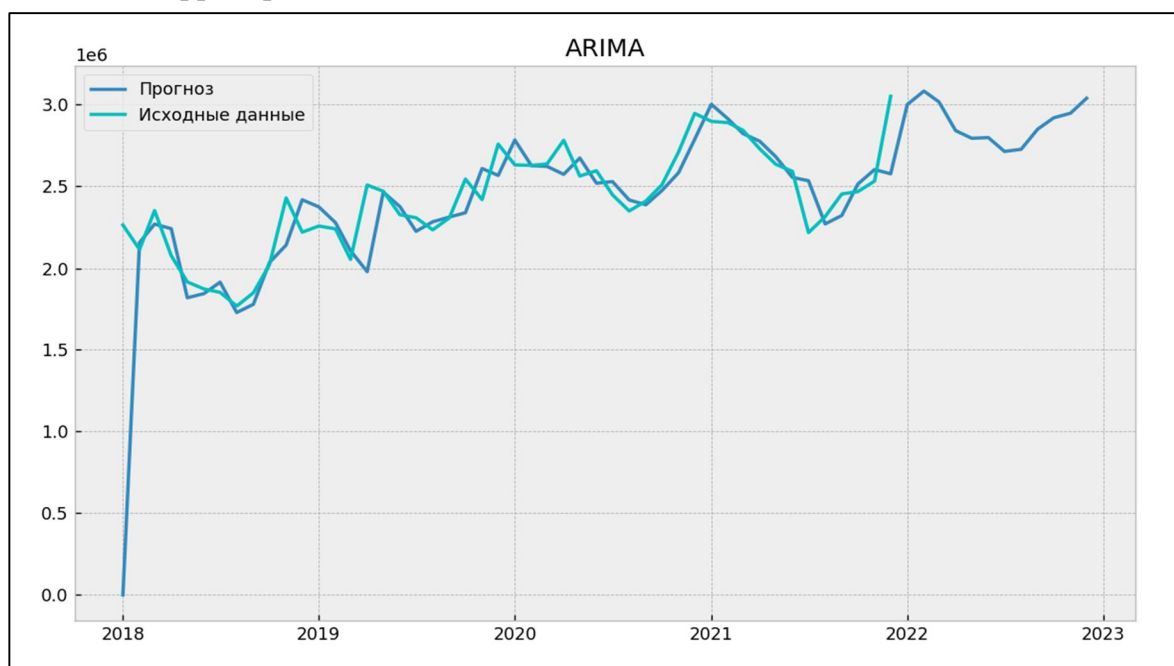


Рис. 10. Модель ARIMA

Fig. 10. ARIMA model

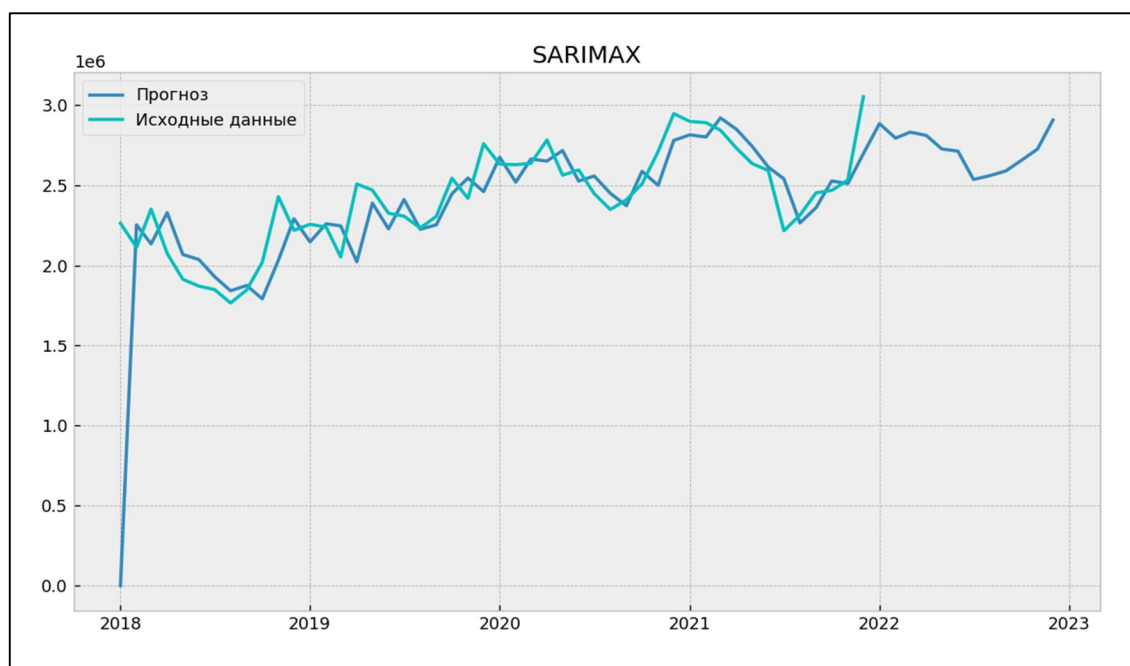


Рис. 11. Модель SARIMAX

Fig. 11. SARIMAX model

Выводы

В завершение исследования можно подчеркнуть, что использование когнитивных методов в сфере энергетики предоставляет значительные перспективы для более точного и адаптивного прогнозирования. Результаты этого исследования подтверждают, что объединение когнитивных и статистических подходов способствует созданию более надежных моделей, способных учитывать сложные взаимодействия и факторы, влияющие на потребление электроэнергии.

Полученные выводы свидетельствуют о том, что применение когнитивного моделирования не только улучшает точность прогнозов, но также предоставляет более глубокое понимание динамики потребления электроэнергии в контексте различных социо-экономических и окружающих условий. Это открывает новые перспективы для более эффек-

тивного управления энергетическими ресурсами, снижения издержек и создания устойчивых стратегий развития энергетического сектора.

Прогнозирование потребления электроэнергии населением области – это сложная и многогранная задача, требующая совмещения различных методов и учета разнообразных факторов. Точные прогнозы позволяют энергетическим компаниям эффективно управлять ресурсами и обеспечивать стабильное энергоснабжение, что важно для устойчивого развития общества в целом.

Таким образом, результаты данного исследования могут служить основой для дальнейших теоретических и практических разработок в области энергетического управления, способствуя повышению эффективности использования электроэнергии и обеспечению устойчивого развития энергетической инфраструктуры.

Список литературы

1. Кирпичникова И. М., Саплин Л. А., Соломахо К. Л. Прогнозирование объемов потребления электроэнергии // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2014. №14(2). С. 16–22.
2. Большов Л. А., Каневский М. Ф., Савельева Е. А. Прогнозирование электропотребления: современные подходы и пример исследования // Изв. РАН. Энергетика. 2004. № 6. С. 25–35.
3. Харитонов А. Ю. Обзор современных систем учета и анализа потребления ресурсов и энергии // Информатика и кибернетика. 2015. №1. С. 21–26.
4. Метод построения нечеткой когнитивной карты конкурентоспособности машиностроительного предприятия / И. А. Буйневич, Ю. А. Криушина, Ю. А. Халин, А. И. Катыхин, Е. А. Криушин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023;13(3):146-163. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-146-163>.

5. Сизов А. С., Халин Ю. А., Цепов А. Ю. Обработка данных на основе owa-оператора и ДСМ-метода для оценки риска инвестирования малого инновационного предприятия // Телекоммуникации. 2014. № 12. С. 42-45.
6. Федулов А. С. Нечеткие реляционные когнитивные карты // Известия РАН. Теория и системы управления. 2005. №1. С.120-132.
7. Ягер Р. Р. Множества уровня для оценки принадлежности нечетких подмножеств // Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения. М.: Радио и связь, 1986. С. 71-78.
8. Бутов А. Л., Сизов А. С., Халин Ю. А. Подход к объединению фактов в информационно-аналитических системах // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013. Т. 11. № 2. С. 17-23.
9. Васильев В. И., Ильясов Б. Г. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика. М.: Радиотехника, 2009. 392 с.
10. Кузьбожев Э. Н., Можейко А. Г., Халин Ю. А. Управление инновационными процессами на основе интеллектуальных информационных технологий // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. № 6-2 (39). С. 83-86.
11. Лисицин Л. А., Халин Ю. А., Лисицин А. Л. Системы поддержки принятия управленческих решений в условиях неполной информации // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 4-2 (43). С. 95-99.
12. Евсеева А. В., Никологорская Е. Л. Некоторые приложения нового метода прогнозирования, основанного на анализе временных рядов // Вестник ИГЭУ. 2011. №5. С. 60–63.
13. Крыштановский А. Методы анализа временных рядов // Мониторинг. Наука и технологии. 2000. №2. С. 41–49.
14. Халин Ю. А. Подход к прогнозированию состояний конкурирующих предприятий на основе ДСМ – метода автоматического порождения гипотез // Естественные и технические науки. 2011. № 6 (56). С. 521-522.
15. Халин Ю. А., Сизов А. С., Игнатенко А. Н. Нечётко-множественная модель многокритериальной оценки конкурентоспособности предприятия // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. № 5-1 (38). С. 53-57.
16. Сизов А. С., Катыхин А. И., Смирнов М. Н. Модель представления знаний в игровой автоматизированной обучающей системе // Распознавание – 2008: материалы докладов IX Междунар. конф. Курск, 2008. С. 310-312.
17. Модели представления и обработки знаний в информационно-аналитических системах / В. П. Добрица, Е. А. Титенко, Ю. А. Халин, А. И. Катыхин. Курск, 2023. 172 с.
18. Робертс Ф. С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам: [пер. с англ.]. М.: Наука, 1986. 496 с.

19. Силов В. Б. Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке. М.: ИНПРО-РЕС, 1995. 228 с.

20. Когнитивное моделирование информационного обеспечения игрового автоматизированного обучения / Ю.А. Халин, А.И. Катыхин, С.А. Зинкин, А.А. Шилин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(4): 117-131. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-117-131>.

References

1. Kirpichnikova I. M., Saplin L. A., Solomakho K. L. Prognozirovanie ob'emov potrebleniya elektroenergii [Forecasting volumes of electricity consumption]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of the South Ural State University*, 2014, no. 14(2), pp. 16-22.

2. Bolshov L. A., Kanevskiy M. F., Savelyeva E. A. Prognozirovanie elektro-potrebleniya: sovremennye podkhody i primer issledovaniya [Electricity consumption forecasting: modern approaches and research example]. *Izv. RAN. Energetika = Izv. RAS. Energetics*, 2004, no.6, pp. 25-35.

3. Kharitonov A. Yu. Obzor sovremennykh sistem ucheta i analiza potrebleniya resursov i energii [Review of the modern systems of accounting and analysis of the resources and energy consumption]. *Informatika i kibernetika = Computer Science and Cybernetics*, 2015, no.1, pp. 21-26.

4. Buinevich I.A., Kriushina Y.A., Khalin Y.A., Katykhin A.I., Kriushin E.A. Method of Construction of a Fuzzy Cognitive Map of the Competitiveness of a Machine-Building Enterprise. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023;13(3):146-163. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-146-163>.

5. Sizov A. S., Khalin Yu. A., Tsepov A. Yu. Obrabotka dannykh na osnove owa-operatora i DSM-metoda dlya otsenki riska investirovaniya malogo innovatsionno-go predpriyatiya [Data processing based on owa-operator and DSM-method to assess the risk of investing a small innovative enterprise]. *Telekommunikatsii = Telecommunications*, 2014, no. 12, pp. 42-45.

6. Fedulov A. S. Nechetkie relyatsionnye kognitivnye karty [Fuzzy relational cognitive maps]. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya = Preceeding RAN.Theory and Control Systems*, 2005, no. 1, pp. 1208-132.

7. Jaeger P. P. [Level sets for estimation of belongingness of fuzzy subsets]. *Nechetkie mnozhestva i teoriya vozmozhnostei. Poslednie dostizheniya* [Fuzzy sets and possibility theory. Recent achievements]. Moscow, Radio and Communication Publ., 1986, pp. 71-78 (In Russ.).
8. Butov A. L., Sizov A. S., Khalin Yu. A. Podkhod k ob"edineniyu faktov v informatsionno-analiticheskikh sistemakh [Approach to the integration of facts in information-analytical systems]. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy = Information-Measuring and Control Systems*, 2013, vol. 11, no. 2, pp. 17-23.
9. Vasiliev V. I., Ilyasov B. G. *Intellectual'nye sistemy upravleniya. Teoriya i praktika* [Intellectual control systems. Theory and practice]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2009. 392 p.
10. Kuzbozhev E. N., Mozheiko A. G., Khalin Yu. G. G., Khalin Y. A. Upravlenie innovatsionnymi protsessami na osnove intellektual'nykh informatsionnykh tekhnologii [Management of innovation processes on the basis of intelligent information technologies]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2011, no. 6-2 (39), pp. 83-86.
11. Lisitsin L. A., Khalin Yu. A., Lisitsin A. L. Sistemy podderzhki prinyatiya upravlencheskikh reshenii v usloviyakh nepolnoi informatsii [Support systems for management decision-making in the conditions of incomplete information]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 4-2 (43), pp. 95-99.
12. Evseeva A. V., Nikologorskaya E. L. Nekotorye prilozheniya novogo metoda prognozirovaniya, osnovannogo na analize vremennykh ryadov [Some applications of the new forecasting method based on the time series analysis]. *Vestnik of IGEU*, 2011, no.5, pp. 60-63.
13. Kryshtanovsky A. Metody analiza vremennykh ryadov [Methods of analysing time series]. *Monitoring. Nauka i tekhnologii = Monitoring. Science and Technologies*, 2000, no.2, pp. 41-49.
14. Khalin Yu. A. Podkhod k prognozirovaniyu sostoyanii konkuriruyushchikh predpriyatii na osnove DSM – metoda avtomaticheskogo porozhdeniya gipotez [Approach to forecasting the states of competing enterprises on the basis of DSM - method of automatic generation of hypotheses]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Natural and Technical Sciences*, 2011, no. 6 (56), pp. 521-522.
15. Khalin Yu. A., Sizov A. S., Ignatenko A. N. Nechetko-mnozhestvennaya model' mnogokriterial'noi otsenki konkurentosposobnosti predpriyatiya [Fuzzy-multiple model of multi-criteria assessment of enterprise competitiveness]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2011, no. 5-1 (38), pp. 53-57.
16. Sizov A. S.; Katykhin A. A., Smirnov M. N. [Model of knowledge representation in the game automated training system]. *Raspoznavanie-2008. Materialy dokladov IX Mezhdunar. konferencii* [Recognition-2008. Proceedings of IX Intern. Conf.]. Kursk, 2008, pp. 310-312 (In Russ.).

17. Dobritsa V. P., Titenko E. A., Khalin Y. A., Katykhin A. I. *Modeli predstavleniya i obrabotki znaniy v informatsionno-analiticheskikh sistemakh* [Models of knowledge representation and processing in information-analytical systems]. Kursk, 2023. 172 p.
18. Roberts F. S. *Diskretnye matematicheskie modeli s prilozheniyami k sotsial'nyim, biologicheskim i ekologicheskim zadacham* [Discrete Mathematical Models with Applications to Social, Biological and Ecological Problems]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 496 p.
19. Silov V. B. *Prinyatie strategicheskikh reshenii v nechetkoi obstanovke* [Strategic decision-making in a fuzzy environment]. Moscow, INPRO-RES Publ., 1995. 228 p.
20. Khalin Y. A., Katykhin A. I., Zinkin S. A., Shilin A. A. Cognitive Modeling of Information Support for Game-Based Automated Learning. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(4): 117-131 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-117-131>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Какурина Анастасия Валерьевна, преподаватель кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: lonecine@rambler.ru

Anastasia V. Kakurina, Lecturer, Software Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: lonecine@rambler.ru

Сизов Александр Семёнович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kafedra-ipm@mail.ru

Alexander S. Sizov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Software Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kafedra-ipm@mail.ru

Халин Юрий Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: yur-khalin@yandex.ru

Yuri A. Khalin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Software Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: yur-khalin@yandex.ru

Сегментация древовидных структур данных и их параллельная обработка в методах аутентификации, основанных на кодировании в режиме сцепления блоков

М.О. Таныгин ¹ ✉, А.А. Чеснокова ¹

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

✉ e-mail: tanygin@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. В задачах аутентификации групп сообщений, кодированных в режиме сцепления блоков, возникает необходимость формирования и обработки специфических древовидных структур. Содержимое таких структур, помимо информации о размещении данных во внутренней памяти вычислителей, описывает взаимное расположение сообщений в потоке данных между абонентами одноранговой сети. Данная информация необходима для выделения из всего потока сообщений в приёмник структурированного множества, для которого однозначно определён его источник. Использование подходов к сегментации древовидных структур позволяет распараллелить процессы добавления элементов в неё и поиска участков, соответствующих ошибке аутентификации.

Методы. В основе разбиения древовидной структуры на области, подлежащие модификации, и участки для анализа, лежит динамически формируемая из кодов аутентификации сообщений метрика – позиция конкретного сообщения в структурированном множестве сообщений, передаваемых от источника в приёмник. Значение данной метрики определяет расстояние от корня дерева, определяющее границу между двумя названными областями.

Результаты. За счёт изолирования модифицируемого и анализируемого участков древовидной структуры исключаются гонки процессов, реализующих независимые алгоритмы работы с ней. Показана возможность обнаружения ошибок аутентификации до получения последнего сообщения в структурированном множестве сообщений. В результате отпадает необходимость передачи тех сообщений группы, отправка которых предполагалась после момента обнаружения ошибки. Приведены формулы оценки среднего времени передачи множества сообщений при последовательной и параллельной реализации процедур формирования и обработки древовидной структуры, содержащей описатели поступающих в приёмник сообщений.

Заключение. В работе показано, что параллельная реализация алгоритмов добавления элементов в древовидную структуру и алгоритма поиска участков, соответствующих ошибке, позволяет уменьшить среднее время передачи группы сообщений на 5 -12% по сравнению с последовательной реализацией указанных алгоритмов. Это снижает нагрузку на канал связи для целевого класса систем, использующих для аутентификации кодирование в режиме сцепления блоков.

Ключевые слова: аутентификация; кодирование; древовидные структуры данных; сегментация данных; параллелизм.

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

Для цитирования: Таныгин М.О., Чеснокова А.А. Сегментация древовидных структур данных и их параллельная обработка в методах аутентификации, основанных на кодировании в режиме сцепления блоков // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(4): 62-78. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-4-62-78>.

Поступила в редакцию 18.10.2023

Подписана в печать 07.11.2023

Опубликована 21.12.2023

Segmentation of Tree-Like Data Structures and Their Parallel Processing in Authentication Methods Based on Block Coupling Encoding

Maxim O. Tanygin ¹ ✉, Alina A. Chesnokova ¹

¹ Southwest State University

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

✉ e-mail: tanygin@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. In the tasks of authenticating groups of messages encoded in the mode of chaining blocks, there is a need for the formation and processing of specific tree-like structures. The contents of such structures, in addition to information about the placement of data in the internal memory of the calculators, describes the relative location of messages in the data stream between subscribers of a peer-to-peer network. This information is necessary to isolate a structured set from the entire message stream to the receiver, for which its source is uniquely determined. Using approaches to segmentation of tree structures allows you to parallelize the processes of adding elements to it and searching for areas corresponding to an authentication error.

Methods. The division of the tree structure into areas subject to modification and areas for analysis is based on a metric dynamically formed from message authentication codes – the position of a specific message in a structured set of messages transmitted from the source to the receiver. The value of this metric determines the distance from the root of the tree, which defines the boundary between the two named areas

Results. By isolating the modified and analyzed sections of the tree structure, races of processes implementing independent algorithms for working with it are excluded. The possibility of detecting authentication errors before receiving the last message in a structured set of messages is shown. As a result, there is no need to transmit those group messages that were supposed to be sent after the error was detected. Formulas for estimating the average transmission time of multiple messages with sequential and parallel implementation of procedures for the formation and processing of a tree structure containing descriptors of incoming messages to the receiver are given.

Conclusion. The paper shows that the parallel implementation of algorithms for adding elements to the tree structure and the algorithm for searching for areas corresponding to an error reduces the average transmission time of a group of messages by 5-12% compared with the sequential implementation of these algorithms. This reduces the load on the communication channel for the target class of systems using block coupling encoding for authentication.

Keywords: authentication; coding; tree-like data structures; data segmentation; parallelism.

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

For citation: Tanygin M. O., Chesnokova A. A. Segmentation of Tree-Like Data Structures and Their Parallel Processing in Authentication Methods Based on Block Coupling Encoding. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(4): 62-78 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-4-62-78>.

Received 18.10.2023

Accepted 07.11.2023

Published 21.12.2023

Введение

Использование кодирования в режиме сцепления блоков для задач аутентификации абонентов распределённых сетей впервые было предложено Белларом, Килианом и Роджавэем [1]. Он основан на использовании при формировании кодов аутентификации текущего сообщения данных предшествующего. Идея объединения сообщений для их последующей аутентификации получила дальнейшее развитие в работах [2-6]. Основное направление данного подхода – повышение достоверности аутентификации в условиях ограниченного размера кодов аутентификации сообщений, который при использовании традиционных криптографических протоколов, ориентированных на аутентификацию источника изолированного сообщения, не обеспечивает требуемую достоверность [7]. Недостатком метода является высокая вычислительная сложность алгоритмов обработки групп сообщений и большие временные задержки, возникающие из-за необходимости реализовывать такие алгоритмы только после получения последнего сообщения в последовательности. С учетом вышесказанного практическое применение данного подхода возможно в сетях связи с низкой пропускной способностью [8]: в

сенсорных сетях и сетях интернета вещей. Для них эффект от сокращения размеров дополнительных служебных полей, содержащих коды аутентификации сообщений, нивелирует указанные дополнительные временные затраты.

При реализации методов аутентификации в сетях, работающих по принципу peer-to-peer, задача определения источника сообщений сводится к задаче формирования и обработке списочной древовидной структуры, которая описывает варианты взаимного расположения поступающих сообщений в потоке данных от источника в приёмник [9]. С учётом того, что устройства, реализующие указанные процедуры, обладают невысокой производительностью и аппаратной сложностью, определение принципов обработки древовидной структуры должно, подходов к синтезу аппаратных модулей, выполняющих обработку, должно осуществляться с учётом необходимости оптимизации ресурсов для её хранения. В работах [10-12] представлены подходы к хранению и обработке списочных структур, в которых повышение производительности и скорости обработки обеспечивается путём парализации процесса перебора маршрутов перемещения по графу. В то же время поиск маршрута есть операция доступа на чтение к графовой структуре (порожда-

емая процессом-потребителем), тогда как добавление элемента (порождаемое процессом производителем) в дерево подразумевает модификацию данных. Соответственно, параллельная реализация процедур обработки маршрутов и добавления сообщений могут порождать гонки [13]. Соответственно, при реализации алгоритмов ускоренной обработки формируемых при проведении аутентификации графов, будут требоваться механизмы синхронизации двух указанных типов процессов [14]. Подобная проблема рассмотрена в статье [15], где описана схема, в которой для анализа предыдущих данных предварительно извлекается часть информации и хранится в кеше с высокой скоростью доступа. Таким образом разрешается задача изоляции структур данных, в которые производится запись и структур, из которых происходит чтение.

В то же время решение задач полного перебора, к которым относятся задачи поиска элементов в графе, подразумевает необходимость реализации методов и алгоритмов, учитывающих особенности формируемых графов и особенности осуществления обращения к ним [16, 17]. В нашем случае подходом к минимизации числа операций сравнения кодов аутентификации при добавлении элементов в граф является ограничение области, куда добавление элемента может происходить. Он лежит в основе метода ограничения числа обрабатываемых сообщений при выполнении процедуры аутентификации [18], в

котором происходит отказ от обработки сообщений, которые не удовлетворяют динамически вычисляемому критерию для содержимого поля аутентификации. Применительно к задаче формирования древовидного графа это выражается в невозможности встраивания нового элемента в определённые его позиции. В конечном итоге это выражается в уменьшении числа элементов такого дерева и уменьшении числа отдельных его ветвей.

При этом влияние методов повышения производительности будет выражаться не столько в повышении скорости операций обработки кодов аутентификации, что важно для анонимных peer-to-peer сетей [19], но в общем повышении производительности канала связи за счёт повышения скорости обнаружения ошибки аутентификации и скорости переспроса таких ошибочно переданных данных [20]. Снижение времени, прошедшего между началом передачи пакетов данных и временем возникновения переспроса наиболее критично для сетей с низкой пропускной способностью [21], для которых и целесообразно применение аутентификации на основе кодирования в режиме сцепления блоков данных

Это же является предпосылкой к разработке алгоритмов и технических решений, обеспечивающих повышение скорости формирования и обработки древовидной структуры в задачах аутентификации за счёт сегментации такой структуры на области, к которым в асин-

хронном режиме осуществляют доступ независимые потоки управления, реализующие операции добавления элементов в структуру (формирования графа) и операции его анализа (поиска участков, соответствующих ошибке аутентификации).

Материалы и методы

Согласно принципам обработки поступающих сообщений, для управления их обработкой используется косвенная адресация, при которой само сообщение буферизируется в оперативную память, а адреса хранятся в регистровой памяти [9] в виде специальных записей $\{Q_i\}$ $i = 1 \dots U^{\text{rec}}$, U^{rec} – количество принятых и обработанных приёмником сообщений (рис. 1), объединённых в динамическую древовидную структуру-граф, формируемую при поступлении сообщений и обрабатываемую при выполнении процедуры аутентификации их источника [23]. Кроме адреса Q^{adr} , по которому в буферном ОЗУ записано сообщение, в такой записи содержится ещё ряд вспомогательных полей, требуемых для процедур обработки сообщений: Q^{aut} , Q^{next} , которые используются для проверки кодов аутентификации поступающих сообщений, а также массив G (рис. 1), содержащий указатели на элементы древовидной структуры, следующими за текущей. С учётом целесообразности комбинации списочной (в которой адресация выполняется за счёт указателей) и матричной (с адресацией за счёт индексов элемента) систем хра-

нения множества структуру $\{Q\}$ [9], элементы массива G представляют собой номера $\{g_1 \dots g_n\}$ строк матричной памяти, в которых элементы древовидной структуры, следующими за текущей. При этом номер столбцов предшествующей и последующей записи отличается на один.

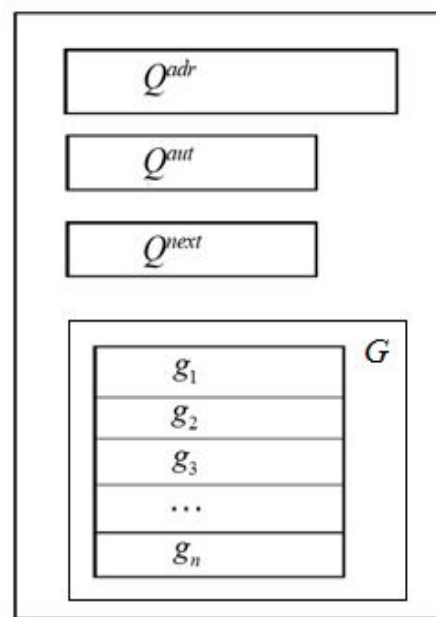


Рис. 1. Структура записи, ассоциированной с буферизованным в оперативной памяти сообщением

Fig. 1. The structure of the record associated with the message buffered in RAM

Формируется древовидная структура в результате выполнения итерационного алгоритма обработки поступающих сообщений, представленного на рис. 2. В его основе лежит метод обработки групп сообщений [22], кодированных в режиме сцепления блоков.

Используемые при описании алгоритма обозначения:

f^{nd} – операция декодирования содержимого поля блока, в котором содержится индекс;

$W^{i,j}$ – множество сформированных указателей на следующий элемент в графе сообщений у элемента, размещённого в i -й строке и j -м столбце регистровой памяти, каждый указатель – номер строки в $j+1$ столбце, в котором содержится последующий элемент последовательности сообщений;

$g_k^{i,y}$ – содержимое указателя с номером k у элемента, размещённого в i -й строке и j -м столбце регистровой памяти, совокупность таких указателей образует множество $W^{i,j}$;

$Q_{i,j}$ – отдельный элемент регистровой памяти, размещённый в её i -й строке и j -м столбце, размер элемента в битах определяется, исходя из реальных условий эксплуатации вычислителя;

$s_{i,y}^{\text{inf}}$ – данные сообщения, описатель которого размещён в i -й строке и j -м столбце регистровой памяти;

$s_{i,y}^{\text{aut}}$ – КПДПБ блока, описатель которого размещён в i -й строке и j -м столбце регистровой памяти;

$Q^{\langle y \rangle}$ – содержимое j -го столбца регистровой памяти;

$|Q^{\langle y \rangle}|$ – число занятых регистров в j -м столбце регистровой памяти.

Особенности аппаратной реализации процедуры формирования динамической структуры заключаются в асин-

хронном доступе различных вычислительных модулей к блокам памяти, хранящим записи $\{Q_i\}$ $i = 1 \dots U^{\text{rec}}$, используемые для косвенной адресации буферизированных сообщений. При этом доступ на запись в блоки памяти реализуется блоками, которые формируют динамическую списочную структуру. Модули, которые осуществляют анализ динамической структуры, обращаются к указателям только в режиме чтения. Такой режим позволяет реализовывать процедуру анализа динамической структуры параллельно с её формированием. Результатом анализа динамической структуры является поиск в ней участков, представленных на рис. 3. На рисунке:

j – порядковый номер сообщения в последовательности, в котором образовалась структура, соответствующая ошибке идентификации;

i_1 и i_2 – номера записи в столбце j , в которых произошли коллизии в полях: $Q_{i_1,j}^{\text{aut}}$ и $Q_{i_2,j}^{\text{aut}}$, $Q_{i_1,j}^{\text{next}}$ и $Q_{i_2,j}^{\text{next}}$ соответственно;

k_1 и k_2 – порядковые номера указателей в записи $Q_{i_3,j-1}$ ссылающиеся на записи $Q_{i_1,j}$ и $Q_{i_2,j}$ в столбце j , образуя структуру, соответствующую ошибке определения источника сообщений и тот же элемент $Q_{i_4,j+1} + 1$;

k_3 и k_4 – порядковые номера указателей в записях $Q_{i_1,j}$ и $Q_{i_2,j}$ ссылающиеся на один и тот же элемент $Q_{i_4,j+1}$ в столбце $j+1$.

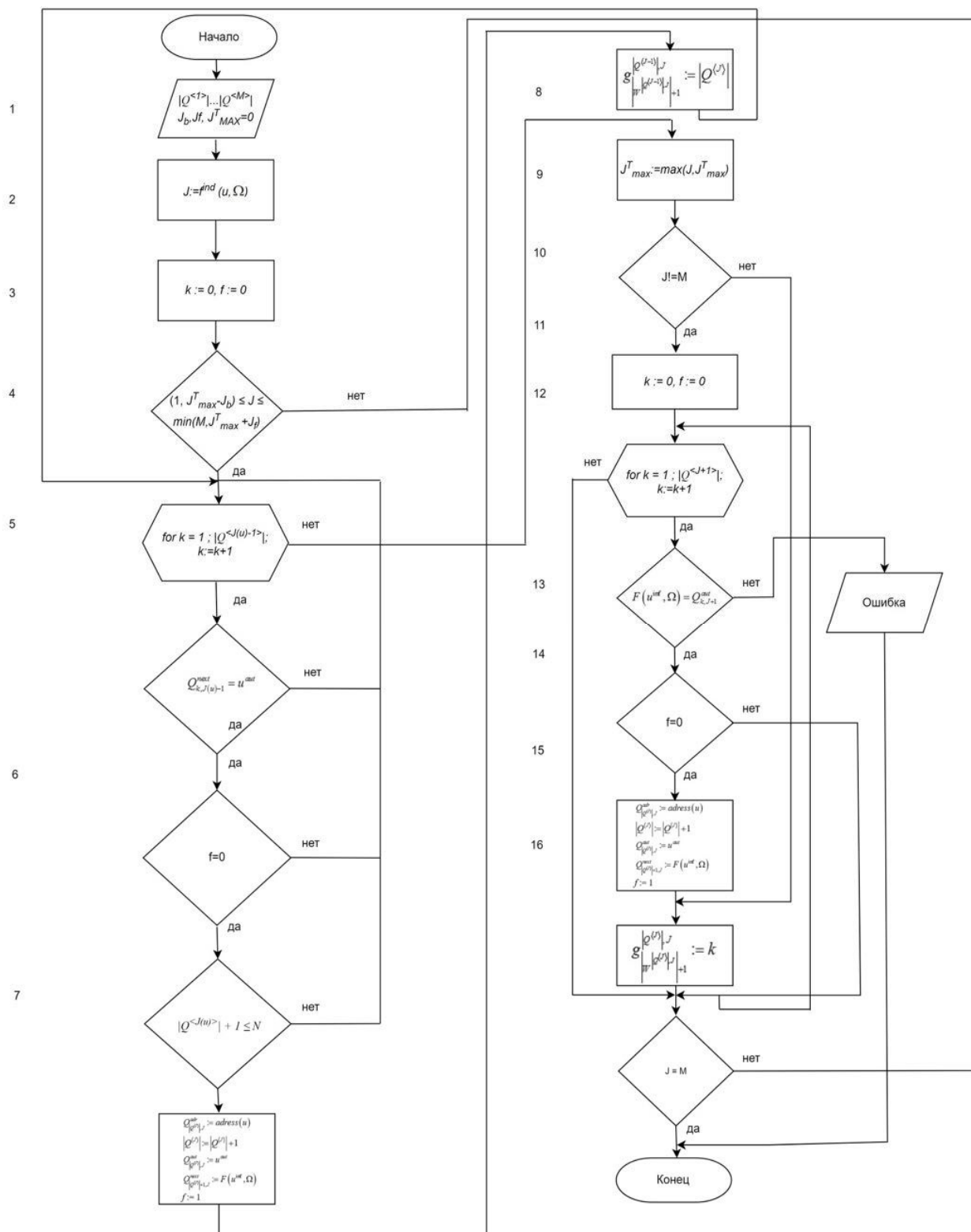


Рис. 2. Формализованный алгоритм формирования динамической структуры, содержащей промежуточные результаты вычислений при аутентификации источника последовательности сообщений

Fig. 2. A formalized algorithm for forming a dynamic structure containing intermediate results of calculations when authenticating the source of a message sequence

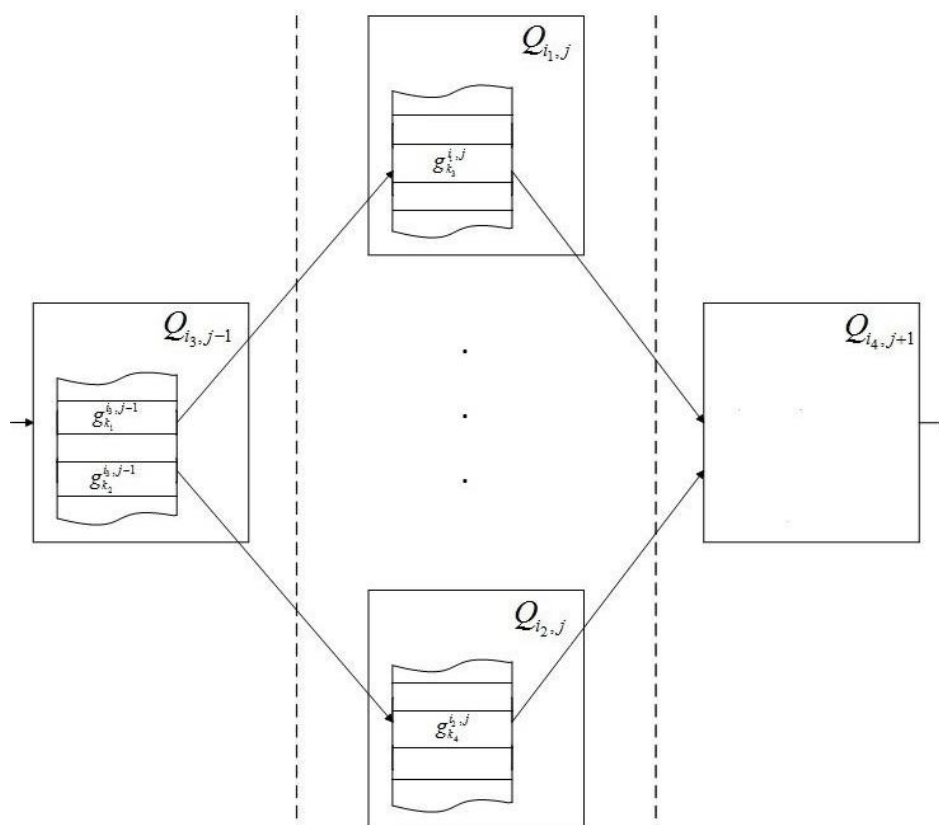


Рис. 3. Пример участка динамической структуры, соответствующий ошибке аутентификации

Fig. 3. An example of a section of a dynamic structure corresponding to an authentication error

При такой конфигурации во всей динамической древовидной структуре могут быть сформированы две и более последовательности определённой протоколом передачи длины M . Метод аутентификации не позволяет определить ту последовательность, которая образована сообщениями, сформированными целевым источником.

Условие возникновения ошибки в принятых нами обозначениях выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} g_k^{i,j} &= W^{i,j} = \{g_1^{i,j}, g_2^{i,j}, \dots\} \\ g_k^{i,j} &= W^{i,j} = \{g_1^{i,j}, g_2^{i,j}, \dots\} \\ x_1, x_2 &\in 0 \dots G^{i_3, j-1}, x_1 \neq x_2. \end{aligned} \quad (1)$$

При этом пренебрежимо мала (менее 10^{-3}) вероятность формирования

коллизий, при которых в альтернативных ветвях содержится две и более структуры. Поэтому в настоящей работе мы не рассматриваем такие варианты возникновения ошибок аутентификации

Это же свойство методов аутентификации, основанных на кодировании в режиме сцепления блоков, является предпосылкой для формирования методов ограничений на добавление в древовидную структуру сообщений в позиции, отстоящей на фиксированное число позиций J от окончания самой длинной ветви [24]. Таким образом после записи в память древовидной структуры блока с номером позиции $J_{\max}$, для её элементов с порядковыми номерами $J_{\max} - J$ можно производить поиск кон-

струкций, приведённых на рис. 3 в соответствии с формулами (1). Тем самым осуществляется изоляция двух областей динамической структуры: находящихся на расстоянии, меньшем чем $J_{\max}-J$ от корня дерева, в которой возможен анализ структуры, и находящихся на расстоянии большем $J_{\max}-J$ от корня – для которой реализуется алгоритм добавления элементов (см. рис. 3) Алгоритм, реализующий поиск структур, соответствующих ошибке идентификации, приведён на рис. 4.

Номер в позиции, в которой произошла ошибка определения источника сообщения, распределён по равномерному закону. Формула для определения вероятности возникновения ошибки в определенной позиции выглядит следующим образом:

$$p(J^{err}) = \frac{1}{M}. \quad (2)$$

Описанный выше алгоритм определения ошибки позволяет определять ошибки с порядковым номером, не превышающим $M - J_{\max}$. Прекращая дальнейшее формирование и обработку динамической структуры, содержащей указатели на оперативную память.

Результаты и их обсуждение

Пусть T^{rec} - время передачи последовательности из M сообщений, для которых выполняется процедура аутентификации. Тогда ошибка в позиции, большей $M-J$, обнаруживается лишь после получения сообщения последовательности и среднее время получения

группы сообщений с такой ошибкой равно T^{rec} .

Если ошибка происходит в позиции с номером $1 \leq j \leq M - J$, то она обнаруживается после получения сообщения с номером $j+J$. Тогда, с учетом равномерного закона распределения номера позиции ошибки, среднее время получения группы сообщений будет $\frac{J+1+M}{2}$. Тогда математическое ожи-

дание получения группы сообщений с учетом досрочного прекращения передачи после обнаружения ошибки, равно

$$T^{err} = \frac{J}{M} T^{rec} + \frac{M-J}{M} \cdot \frac{M+J+1}{2}.$$

Для математического ожидания времени передачи группы сообщений с учетом вероятности ошибки p^{err}

$$T_1^{rec} = T^{rec} \cdot (1 - p^{err}) + p^{err} \left[\left(T^{rec} \frac{(M-J)(M+J+1) + 2J}{2M} + T_2^{rec} \right) \right], \quad (3)$$

где второе слагаемое T_2^{rec} в квадратных скобках есть время, которое будет затрачено при переспросе группы из всех M сообщений в случае, если при первой попытке была обнаружена ошибка аутентификации. Оно, в свою очередь, может вырасти из-за возникновения ошибки аутентификации уже при переспросе. Таким образом, мы имеем рекурсивную формулу для средней длительности i -й попытки передачи последовательности сообщений:

$$T_i^{rec} = T^{rec} \cdot (1 - p^{err}) + p^{err} \left[\left(T^{rec} \frac{(M-J)(M+J+1) + 2JM}{2M^2} + T_{i+1}^{rec} \right) \right]. \quad (4)$$

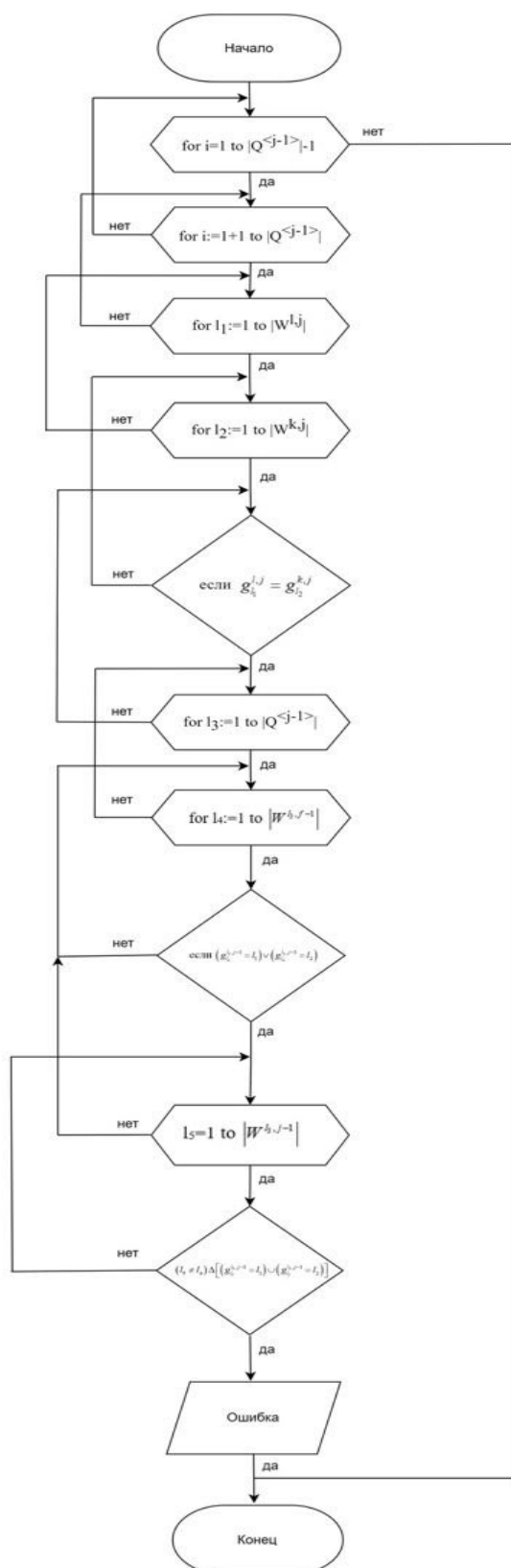


Рис. 4. Блок-схема алгоритма обработки древовидной структуры для участка, соответствующего ошибке аутентификации

Fig. 4. Block diagram of the tree structure processing algorithm for the section corresponding to the authentication error

Математическое ожидание времени передачи группы сообщений без использования описанного выше алгоритма поиска ошибки аутентификации исчисляется по формуле

$$T^{\text{orig}} = T^{\text{rec}} \cdot (1 - p^{\text{err}})^{-1}. \quad (5)$$

Отношение K – математического ожидания времени передачи группы сообщений при использовании алгоритма

обработки древовидных структуры T_1^{rec} к математическому ожиданию времени передачи группы сообщений без использования описанного выше алгоритма T^{orig} приведено на графиках на рис. 5.

При варьировании параметра обработки групп сообщений при фиксированной вероятности ошибки аутентификации p^{err} наблюдается следующая картина (рис. 6).

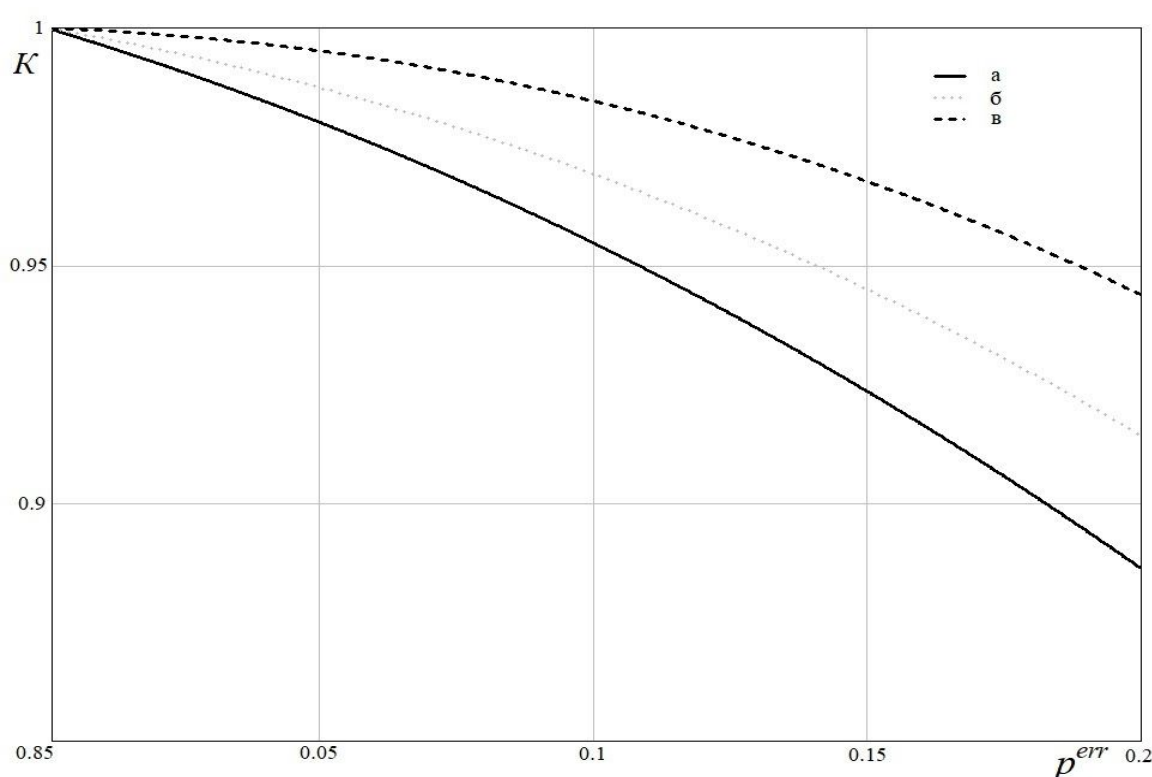


Рис. 5. Зависимость отношения K – математического ожидания времени передачи группы сообщений при параллельной работе алгоритма обработки и алгоритма формирования древовидных структур T_1^{rec} к математическому ожиданию времени передачи группы сообщений без последовательной работы алгоритмов T^{orig} от вероятности возникновения ошибки аутентификации p^{err} при передаче группы сообщений при длине группы $M=15$: а – $J=2$, б – $J=5$, в – $J=10$

Fig. 5. The dependence of the ratio of the K – mathematical expectation of the transmission time of a group of messages during the parallel operation of the processing algorithm and the algorithm for the formation of tree structures T_1^{rec} on the mathematical expectation of the transmission time of a group of messages without sequential operation of algorithms T^{orig} on the probability of an authentication error p^{err} when transmitting a group of messages with a group length $M=15$: а – $J=2$, б – $J=5$, в – $J=10$

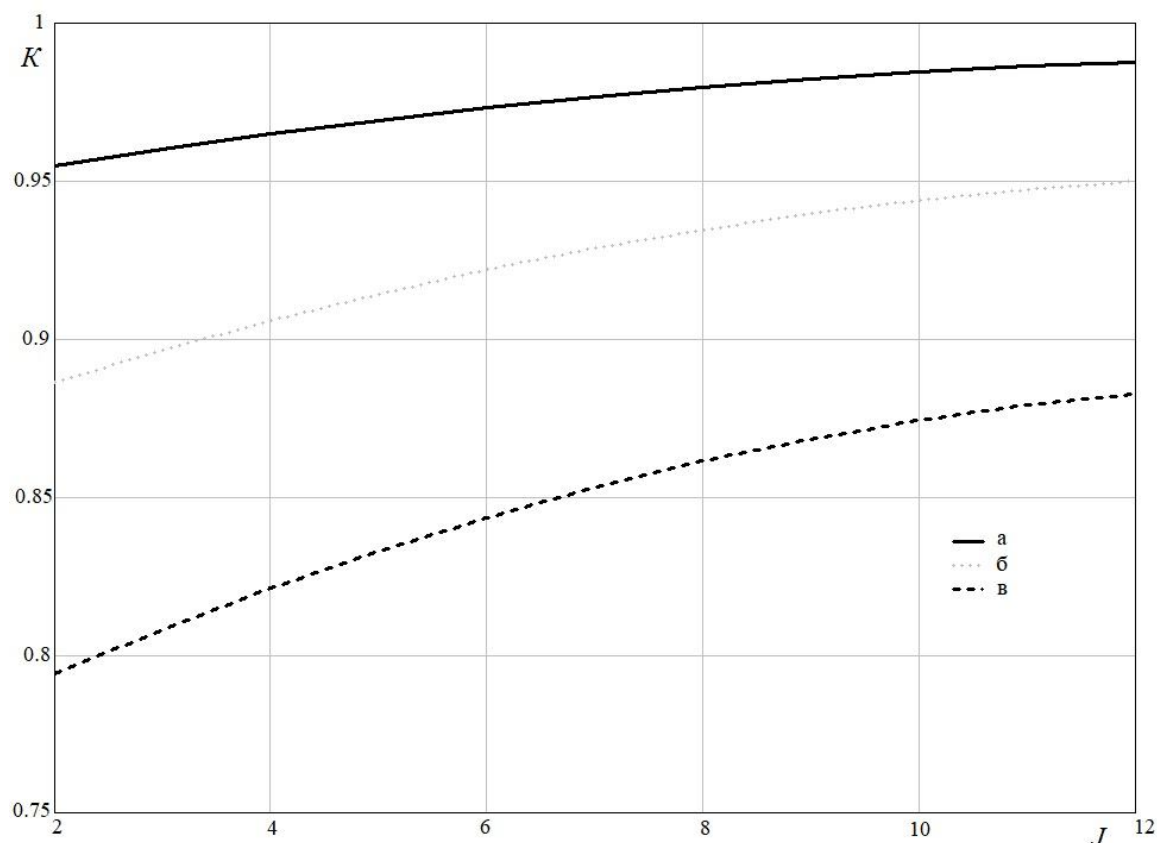


Рис. 6. Зависимость отношения K – математического ожидания времени передачи группы сообщений при параллельной работе алгоритма обработки и алгоритма формирования древовидных структур T_i^{rec} к математическому ожиданию времени передачи группы сообщений при последовательной работе алгоритмов T^{orig} от параметра обработки групп сообщений J при $M=15$. **а** – $p^{err}=0,1$, **б** – $p^{err}=0,2$, **в** – $p^{err}=0,3$

Fig. 6. The dependence of the ratio of K – the mathematical expectation of the transmission time of a group of messages during the parallel operation of the processing algorithm and the algorithm for the formation of tree structures T_i^{rec} on the mathematical expectation of the transmission time of a group of messages during the sequential operation of the algorithms T^{orig} on the processing parameter of message groups J at $M=15$. **а** – $p^{err}=0,1$, **б** – $p^{err}=0,2$, **в** – $p^{err}=0,3$

Анализ полученных результатов подтверждает эффективность применения параллельной работы алгоритмов формирования и анализа древовидного графа, выражающегося в снижении математического ожидания времени передачи группы сообщений относительно методов, в которых данные операции реализуются последовательно. При этом целевая характеристика K снижается с увеличением вероятности ошибки аутентификации. На рис. 6

приведены её значения для диапазона ошибок, допустимых протоколами передачи данных с низкой пропускной способностью и большим радиусом действия [25]. Увеличение же параметра J – величины, определяющей область модификации древовидной структуры, наоборот, повышает целевое соотношение, снижая результативность параллелизации работы двух алгоритмов.

Выводы

Рассмотренный в статье подход к обработке промежуточных результатов при выполнении процедуры аутентификации источника группы сообщений нацелен прежде всего на упреждающее определение ошибок до момента передачи всей групп. Так как в целевом классе информационных систем – систем, компоненты которых взаимодействуют по протоколам с низкой пропускной способностью, именно длительность передачи сообщений вносит основные задержки при организации информационного обмена.

Прекращение передачи после обнаружения ошибки и до момента поступления последнего сообщения в группе позволяет снизить математическое ожидание времени передачи последовательности, которое определяется как длительностью передачи группы сообщений, так и длительностью переспроса в результате ошибки. Проведённые исследования показали, что в зависимости от вероятности ошибки аутентификации и параметра J – величины, определяющей область модификации древовидной структуры, математическое ожидания времени передачи групп сообщений снижается на 5 -12%..

Список литературы

1. Bellare M., Kilian J., Rogaway P. The security of the cipher block chaining message authentication code. M. // Journal of Computer and System Sciences. 2000 61(3): pp. 362-399 DOI: 10.1006/jcss.1999.1694
2. Iwata T., Kurosawa K. OMAC: one-key CBC MAC // Fast Software Encryption. 2003. P. 129 – 53.
3. Dworkin M. SP 800-38D: Recommendation for Block Cipher Modes of Operation: Galois/Counter Mode (GCM) and GMAC, 2007.
4. Dworkin M. Recommendation for Block Cipher Modes of Operation: The CCM Mode for Authentication and Confidentiality // Nist Spec. Publ. 2004. Vol. 800. 38 p.
5. Stallings W. The advanced encryption standard // Cryptologia. 2002. Vol. 26. № 3. P. 165–188.
6. Black J. Authenticated Encryption // Encycl. Cryptogr. Secur. 2005. P. 11–21.
7. Black J., Rogaway P. CBC MACs for arbitrary-length messages: The three-key constructions // J. Cryptol. 2005. Vol. 18. № 2. P. 111–131.
8. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks // IEEE Std 802.15.4-2020, pp.1-800, 23 July 2020, doi: 10.1109/IEEESTD.2020.9144691.
9. Модель размещения данных во внутренней памяти вычислителя, реализующего схему кодирования данных в режиме сцепления блоков / М.О. Таныгин, А.А. Ахмад, О.В. Казакова, Д.А. Голубов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(1): 73-91. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-73-91>.
10. Пасечников К. А., Иванова Г. С. Синтез оптимальных структур данных для решения задач на графах // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. 2008. № 4(73). С. 29-37.

11. Колганов А. С. Параллельная реализация алгоритма поиска минимальных остовных деревьев с использованием центрального и графического процессоров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2016. Т. 5. № 3. С. 5-19. DOI 10.14529/cmse160301
12. Tasci S., Demirbas, M Employing in-memory data grids for distributed graph processing // IEEE 2015 IEEE International Conference on Big Data (Big Data), 2015, pp. 1856–1864. doi:10.1109/bigdata.2015.7363959
13. Волчихин В. И., Вашкевич Н. П., Бикташев Р. А. Модели событийных недетерминированных автоматов представления алгоритмов управления взаимодействующими процессами в многопроцессорных вычислительных системах на основе использования механизма монитора // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2013. № 2(26). С. 5-14.
14. Courtois P. J., Heymans F., Parnas D. L. Concurrent Control with "Readers" and "Writers" // Communications of the ACM. 14 (10), 1971. P. 667–668. doi:10.1145/362759.362813. S2CID 7540747.
15. Babionitakis K., Doumenis G.A., Georgakarakos G. et al. A real-time motion estimation FPGA architecture // J. Real-Time Image Proc. 2008. № 3. Pp. 3–20. <https://doi.org/10.1007/s11554-007-0070-9>
16. Дородных Н. О., Юрин А. Ю. Подход к автоматизированному наполнению графов знаний сущностями на основе анализа таблиц // Онтология проектирования. 2022. Т. 12. № 3(45). С. 336-352. DOI 10.18287/2223-9537-2022-12-3-336-352.
17. Путнин В. И. Автоматизация процесса построения расписания с применением топологической сортировки на графе // E-Scio. 2021. № 3(54). С. 584-588.
18. Метод ограничения множества обрабатываемых приёмником блоков данных для повышения достоверности операций определения их источника / М. О. Таныгин, О. Г. Добросердов, А. О. Власова, А. А. Ахмад // Труды МАИ. 2021. Т. 118, №3. 15 doi 10.34759/trd-2021-118-14.
19. Modinger D., Frohlich N., Hauck F.J. Pixy: A Privacy-Increasing Group Creation Scheme // Conference: ICNCC 2020: 2020 The 9th International Conference on Networks, Communication and Computing. December 2020 DOI: 10.1145/3447654.3447671.
20. Хабибулин Н. Ф., Шкердин А. Н., Щербенко А. Н. Повышение пропускной способности систем передачи с переспросом за счет введения дополнительной связи между процессами декодирования с исправлением и обнаружением ошибок // Научное ведение. 2016. Т. 8, № 3(34). С. 143.
21. Тучкин А. В. Принципы функционирования протокола канального уровня для пакетной передачи разнородного трафика по низкоскоростным каналам // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2008. Т. 2, № 3. С. 31-33.
22. Мальцев Г. Н. Помехоустойчивость и скрытность передачи информации по радиоканалам на основе комбинированного случайного кодирования // Информационно-управляющие системы. 2015. № 2(75). С. 82-89. DOI 10.15217/issn1684-8853.2015.2.82

23. Таныгин М. О., Чеснокова А. А., Ахмад А. А. А. Снижение ресурсных затрат на обработку кодов аутентификации сообщений за счет ограничения числа обрабатываемых сообщений // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2022. № 4(60). С. 22-29.

24. Таныгин М. О., Чеснокова А. А., Ахмад А. А. А. Повышение скорости определения источника сообщений за счет ограничения множества обрабатываемых блоков данных // Труды МАИ. 2022. № 125. DOI 10.34759/trd-2022-125-20.

25. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks // IEEE Std 802.15.4-2020, pp.1-800, 23 July 2020, doi: 10.1109/IEEESTD.2020.9144691

References

1. Bellare M., Kilian J., Rogaway P. The security of the cipher block chaining message authentication code. *Journal of Computer and System Sciences*, 2000. 61(3):pp. 362-399 DOI: 10.1006/jcss.1999.1694

2. Iwata T., Kurosawa K. OMAC: one-key CBC MAC. *Fast Software Encryption*, 2003, pp. 129 – 53.

3. Dworkin M. SP 800-38D: Recommendation for Block Cipher Modes of Operation: Galois/Counter Mode (GCM) and GMAC, 2007.

4. Dworkin M. Recommendation for Block Cipher Modes of Operation: The CCM Mode for Authentication and Confidentiality. *Nist Spec. Publ.*, 2004, vol. 800, 38 p.

5. Stallings W. The advanced encryption standard. *Cryptologia*, 2002, vol. 26, no. 3, pp. 165–188.

6. Black J. Authenticated Encryption. *Encycl. Cryptogr. Secur.*, 2005, pp. 11–21.

7. Black J., Rogaway P. CBC MACs for arbitrary-length messages: The three-key constructions. *J. Cryptol*, 2005, vol. 18, no. 2, pp. 111–131.

8. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. *IEEE Std 802.15.4-2020*, pp.1-800, 23 July 2020, doi: 10.1109/IEEESTD.2020.9144691.

9. Tanygin M. O., Ahmad A.A., Kazakova O. V., Golubov D. A. Recursive Algorithm for Forming Structured Sets of Information Blocks that Increase the Speed of Performing Procedures for Determining Their Source. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(1): 73-91 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-73-91>.

10. Pasechnikov K.A., Ivanova G.S. Sintez optimal'nykh struktur dannykh dlya resheniya zadach na grafakh [Synthesis of optimal data structures for solving problems on graphs]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Bauman. Seriya Priborostroenie = Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University*, 2008, no. 4(73), pp. 29-37.

11. Kolganov A.S. Parallel'naya realizatsiya algoritma poiska minimal'nykh ostovnykh derev'ev s ispol'zovaniem tsentral'nogo i graficheskogo protsessorov [Parallel implementation of minimum spanning tree algorithm on CPU and GPU]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo*

gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Vychislitel'-naya matematika i informatika = *Bulletin of the South Ural State University*, 2016, vol. 5, no. 3, pp. 5-19. DOI 10.14529/cmse160301

12. Tasci S., Demirbas M. Employing in-memory data grids for distributed graph processing. *IEEE 2015 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, 2015, pp. 1856–1864. doi:10.1109/bigdata.2015.7363959

13. Volchikhin V. I., Vashkevich N. P., Biktashev R. A. Modeli sobytijnyh nedeterminirovannyh avtomatov predstavleniya algoritmov upravleniya vzaimodejstvuyushchimi processami v mnogoprocessornyh vychislitel'nyh sistemah na osnove ispol'zovaniya mekhanizma monitora [Models of event-driven nondeterministic automata representing algorithms for controlling interacting processes in multiprocessor computing systems based on the use of a monitor mechanism]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki* = *Izvestia of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences*, 2013, no. 2(26), pp. 5-14.

14. Courtois P. J.; Heymans F.; Parnas D. L. Concurrent Control with "Readers" and "Writers". *Communications of the ACM*. 14 (10), 1971, pp. 667–668. doi:10.1145/362759.362813. S2CID 7540747.

15. Babionitakis K., Doumenis G.A., Georgakarakos G. et al. A real-time motion estimation FPGA architecture. *J Real-Time Image Proc*, 2008, no. 3, pp. 3–20. <https://doi.org/10.1007/s11554-007-0070-9>

16. Dorogikh N. O., Yurin A. Y. Podhod k avtomatizirovannomu napolneniyu grafov znaniy sushchnostyami na osnove analiza tablic [An approach to automated filling of knowledge graphs with entities based on table analysis]. *Ontologiya proektirovaniy* = *Design Ontology*, 2022, vol. 12, no. 3(45), pp. 336-352. DOI 10.18287/2223-9537-2022-12-3-336-352.

17. Putnin V. I. Avtomatizatsiya processa postroeniya raspisaniya s primeneniem topologicheskoy sortirovki na grafe [Automating the process of building a schedule using topological sorting on a graph]. *E-Scio* = *Aposematic*, 2021, no. 3(54), pp. 584-588.

18. Tanygin M. O., Dobroserdov O. G., Vlasova A. O., Ahmad A. A. Metod ograničeniya mnozhestva obrabatyvaemykh priyomnikom blokov dannyh dlya povysheniya dostovernosti operacij opredeleniya ih istochnika [Method of limiting the set of data blocks processed by the receiver to increase the reliability of operations for determining their source]. *Trudy MAI* = *Proceedings of MAI*, 2021, vol. 118, no. 3, 15 doi 10.34759/trd-2021-118-14.

19. Modinger D., Frohlich N., Hauck F.J. Pixy: A Privacy-Increasing Group Creation Scheme. *Conference: ICNCC 2020: 2020 The 9th International Conference on Networks, Communication and Computing*. December 2020 DOI: 10.1145/3447654.3447671.

20. Khabibullin N. F., Shkerdin A. N., Shcherbenko A. N. Povyshenie propusknoy sposobnosti sistem peredachi s peresprosom za schet vvedeniya dopolnitel'noj svyazi mezhdru processami dekodirovaniya s ispravleniem i obnaruzheniem oshibok [Increasing the throughput of transmission systems with a replay by introducing additional communication between decoding processes with correction and error detection]. *Internet-zhurnal Naukovedenie* = *Online journal of Science Studies*, 2016, vol. 8, no. 3(34), pp. 143 (In Russ.)

21. Tuchkin A.V. Principy funkcionirovaniya protokola kanal'nogo urovnya dlya paketnoj peredachi raznorodnogo trafika po nizskoskorostnym kanal'am [Principles of functioning of the channel layer protocol for packet transmission of heterogeneous traffic over low-speed channels]. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport = T-Comm: Telecommunications and Transport*, 2008, vol. 2, no. 3, pp. 31-33.

22. Maltsev G. N. Pomekhoustojchivost' i skrytnost' peredachi informacii po radiokanal'am na osnove kombinirovannogo sluchajnogo kodirovaniya [Noise immunity and secrecy of information transmission over radio channels based on combined random coding]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information and Control Systems*, 2015, no. 2(75), pp. 82-89. DOI 10.15217/issn1684-8853.2015.2.82.

23. Tanygin M. O., Chesnokova A. A., Akhmad A. A. A. Snizhenie resursnykh zatrat na obrabotku kodov autentifikatsii soobshchenij za schet ogranicheniya chisla obrabatyvaemykh soobshchenij [Reduction of resource costs for processing message authentication codes by limiting the number of processed messages]. *Prikaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*, 2022, no. 4(60), pp. 22-29.

24. Tanygin M. O., Chesnokova A. A., Ahmad A. A. A. Povyshenie skorosti opredele-niya istochnika soobshchenij za schet ogranicheniya mnozhestva obrabatyvaemykh blokov dannykh [Increasing the speed of determining the source of messages by limiting the set of processed data blocks]. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*, 2022, no. 125. DOI 10.34759/trd-2022-125-20.

25. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. *IEEE Std 802.15.4-2020*, pp.1-800, 23 July 2020, doi: 10.1109/IEEESTD.2020.9144691

Информация об авторах / Information about the Authors

Таныгин Максим Олегович, доктор технических наук, доцент, декан факультета фундаментальной и прикладной информатики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tanygin@yandex.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4099-1414>

Maxim O. Tanygin, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Dean of Fundamental and Applied Informatics Faculty, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: tanygin@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4099-1414>

Чеснокова Алина Андреевна, ассистент кафедры информационной безопасности, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: chesnokova.50@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1183-4572>

Alina A. Chesnokova, Assistant of Information Security Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: chesnokova.50@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1183-4572>

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-4-79-97>

Поиск треппин-сетов методом смешанного целочисленного линейного программирования с использованием априорного списка кодовых вершин

В.С. Усатюк ¹, С.И. Егоров ² ✉¹ ООО «Т8»

ул. Краснобогатyrская, д. 44, стр. 1, г. Москва 107076, Российская Федерация

² Юго-Западный государственный университет

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

✉ e-mail: sie58@mail.ru

Резюме

Целью исследования является разработка нового быстродействующего метода поиска треппин-сетов в кодах на графах, обеспечивающего полноту поиска.

Методы. Существует два подхода к поиску треппин-сетов. Первый на основе метода Монте-Карло со смещенной оценкой вероятности при помощи выборки по значимости (Importance Sampling) предусматривает использование декодера. Достоинством этого подхода является высокое быстродействие. Недостатками – зависимость от параметров декодера и характеристик канала и конечная вероятность пропуска треппин-сетов. Второй подход основан на применении методов линейного программирования. Достоинством этого подхода является полнота полученного списка треппин-сетов, обусловленная его независимостью от параметров декодера и характеристик канала. Недостаток подхода заключается в его большой вычислительной сложности. В статье в рамках второго подхода предложен новый метод поиска треппин-сетов с меньшей вычислительной сложностью. Метод предусматривает решение задачи смешанного целочисленного линейного программирования с использованием априорного списка кодовых вершин, участвующих в кратчайших (коротких) циклах в графе кода.

Результаты. С использованием предложенного метода был выполнен поиск треппин-сетов в нескольких низкоплотностных кодах. При этом применялся математический пакет линейного программирования IBM CPLEX версии 12.8, который запускался на 32 потоках 16-ядерного процессора AMD Ryzen 3950X с 32GB ОЗУ (DDR4). В коде Маргулиса (2640, 1320) с помощью предложенного метода был найден треппин-сет TS(6,6) за время 0.53 с. Ускорение, обеспечиваемое предложенным в статье методом, по сравнению с методом Веласкеса-Субрамани составляет 8252.415 раза. Благодаря высокому быстродействию и полноте поиска впервые были найдены треппин-сеты TS(62,16) и TS(52,14) в коде Маргулиса (4896, 2474).

Заключение. В статье предложен метод поиска треппин-сетов на основе смешанного целочисленного линейного программирования с использованием априорного списка кодовых вершин. Метод обладает высоким быстродействием и обеспечивает полноту поиска.

Ключевые слова: Коды на графах; LDPC-коды; треппин-сеты; методы смешанного целочисленного программирования; IBM CPLEX.

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

Для цитирования: Усатюк В.С., Егоров С.И. Поиск треппин-сетов методом смешанного целочисленного линейного программирования с использованием априорного списка кодовых вершин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(4): 79-97. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-4-79-97>.

Поступила в редакцию 27.10.2023

Подписана в печать 06.12.2023

Опубликована 21.12.2023

Trapping Sets Search Using the Method of Mixed Integer Linear Programming with a Priori List of Variable Nodes

Vasily S. Usatjuk ¹, Sergey I. Egorov ² ✉

¹ LLC "T8"

44, p. 1, Krasnobogatyrskaya str., Moscow 107076, Russian Federation

² Southwest State University

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

✉ e-mail: sie58@mail.ru

Abstract

Purpose of research is to develop a new high-speed method for searching trapping sets in graph codes, ensuring the completeness of the search.

Methods. There are two approaches to finding trapping sets. The first, based on the Monte Carlo method with a biased probability estimation using Importance Sampling, involves the use of a decoder. The advantage of this approach is its high performance. The disadvantages are the dependence on decoder parameters and channel characteristics and the finite probability of missing trapping sets. The second approach is based on the use of linear programming methods. The advantage of this approach is the completeness of the resulting list of trapping sets, due to its independence from the decoder parameters and channel characteristics. The disadvantage of this approach is its high computational complexity. In the article, within the framework of the second approach, a new method for searching trapping sets with less computational complexity is proposed. The method involves solving a mixed integer linear programming problem using an a priori list of code vertices participating in the shortest cycles in the code graph.

Results. Using the proposed method, a search for trapping sets was performed for several low-density codes. For this purpose, the mathematical linear programming package IBM CPLEX version 12.8 was used, which was run on 32 threads of a 16-core AMD Ryzen 3950X processor with 32GB of RAM (DDR4). In the Margulis code (2640, 1320), using the proposed method, the trapping set TS(6,6) was found in a time of 0.53 s. The speedup provided by the method proposed in the paper compared to the Velazquez-Subramani method is 8252.415 times. Thanks to the high speed and completeness of the search, trapping sets were found for the first time TS(62,16) and TS(52,14) in the Margulis code (4896, 2474).

Conclusion. The paper proposes a new method for searching trapping sets by solving a mixed integer linear programming problem with an a priori list of code. The method is fast and provides completeness of the search.

Keywords: graph codes; LDPC codes; trapping sets; mixed integer programming method; IBM CPLEX.

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

For citation: Usatjuk V. S., Egorov S. I. Trapping Sets Search Using the Method of Mixed Integer Linear Programming with a Priori List of Variable Nodes // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(4): 79-97 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-4-79-97>.

Received 27.10.2023

Accepted 06.12.2023

Published 21.12.2023

Введение

Использование кодов на графах привело к бурному развитию систем: квантового кодирования источников [1, 2], квантовых вычислений [2, 3], хранения информации (на магнитных, твердотельных, оптических носителях), беспроводной, оптической, спутниковой и других видов связи [4-7].

Коды на графах, использующие мягкое декодирование для коррекции ошибок, обеспечивают существенный энергетический выигрыш (от 1,5 до 2,5 дБ в режиме ограничения мощности до более 4 дБ в режиме ограничения по полосе с учетом выигрыша за счет работы с модуляционным созвездием) при передаче (воспроизведении) сообщений через канал с шумом.

Мягкие метрики (вероятности или логарифмы правдоподобия) полученного сообщения используются при реализации различных методов *мягкого декодирования* с помощью проверочной матрицы кода. Наибольшую помехоустойчивость обеспечивают методы, реализующие *декодирование по максимальному правдоподобию*, позволяющие найти максимально правдоподобное кодовое слово. Однако применение этих методов на практике существенно ограничено в силу экспоненциального роста сложности декодирования при увеличении длины кода. Например, в беспроводной связи используются коды с длиной порядка несколько десятков

тысяч бит (2^{32000} операций декодера), оптическая связь может потребовать коды с длиной порядка несколько сотен тысяч бит (2^{320000} операций).

Решением проблемы экспоненциального роста сложности является применение метода *распространения доверия* (Message Passing, Belief Propagation) и широко класса его аппроксимаций. Успешному применению этих методов мешают *асимметричные структуры в кодовом графе*: стоппин-сетов (Stopping Set, [8]) для двоичного стирающего канала, треппин-сетов (Trapping Sets) для АБГШ-канала, треппин-сетов (Trapping Sets, [9]) для Рэлеевского канала с замираниями (Rayleigh flat fading, [10]). Эти структуры приводят к получению в результате декодирования псевдокодовых слов, вызывающих ошибки, которые не возникли бы в случае применения оптимальных экспоненциальных по сложности методов декодирования по максимальному правдоподобию.

Центральным аспектом улучшения кодов на графах, необходимым для обеспечения большей надежности вычислительных систем, систем хранения данных, систем машинного обучения и систем связи, является поиск асимметричных структур в кодовом графе с последующей их нейтрализацией.

Поиск таких графовых структур является NP-сложной задачей [11]. Например, для поиска стоппин-сета размера 6 в коде Маргулиса (2640, 1320) без априорного знания структуры цик-

лов, автоморфизмов, индекса симметричной группы и прочего, потребуется анализ $\binom{2640}{6} \approx 4.67 \times 10^{17}$ точек в пространстве поиска решения.

Существует два подхода к поиску треппин-сетов. Первый на основе метода Монте-Карло со смещенной оценкой вероятности при помощи выборки по значимости (Importance Sampling) предусматривает использование декодера. Этот подход был представлен в работах Ричардсона, Коула, Банихашеми [12-16]. Достоинством этого подхода является высокое быстродействие. Недостатками – зависимость от параметров декодера и характеристик канала и конечная вероятность пропуска треппин-сетов.

Второй подход основан на применении методов линейного программирования. Декодер при этом не используется. Этому подходу посвящены работы Роснеса и Веласкеса-Субрамани [8, 10, 17, 18]. Достоинством этого подхода является полнота полученного списка треппин-сетов, обусловленная его независимостью от параметров декодера и характеристик канала. Недостаток подхода заключается в его большой вычислительной сложности.

Статья посвящена разработке декодеро-независимого метода поиска ассиметричных структур подграфов треппин-сетов при помощи смешанного линейного программирования, обладающего на порядки меньшей вычислительной сложностью.

Материалы и методы

Коды на графах – это математические графические модели, используемые для представления факторизованных форм распределений вероятностей и управления ими.

Коды на графах и их математические модели особенно ценны в таких приложениях, как помехоустойчивое кодирование, кодирование источников, шифрование, байесовские сети, марковские случайные поля и скрытые марковские модели, где графическое представление зависимостей играет ключевую роль в понимании и решении прикладных задач.

Эти коды описываются фактор-графом $G=(VUC,E)$, состоящим из n вершин переменных V и $(n-k)$ факторных вершин C (в помехоустойчивом кодировании называемых соответственно кодовыми и проверочными вершинами), где k – размерность кода. Вершины графа соединяются ребрами E . Пример фактор-графа приведен на рис. 1.

Соединения вершин описываются матрицей H (называемой в помехоустойчивом кодировании проверочной). Строки матрицы задают уравнения, определенные над конечным полем:

$$\sum_{l=0}^{n-1} v_l \cdot h_{j,l} = 0, \quad (1)$$

где $h_{j,l}$ – элемент матрицы H ; j – номер ее строки, соответствующей факторной вершине; l – номер ее столбца, соответствующего переменной вершине. Переменная вершина соединяется ребром с факторной вершиной в том случае, если $h_{j,l} \neq 0$.

Для кодов на графах должны быть заданы факторы — функции, представляющие зависимости или взаимодействия между переменными. Факторные функции принимают подмножество узлов переменных в качестве входных данных и выдают действительное число

в качестве выходных данных. Ребра (E) в фактор-графе соединяют вершины переменных с вершинами факторов в зависимости от того, какие переменные являются аргументами для каких факторных функций.

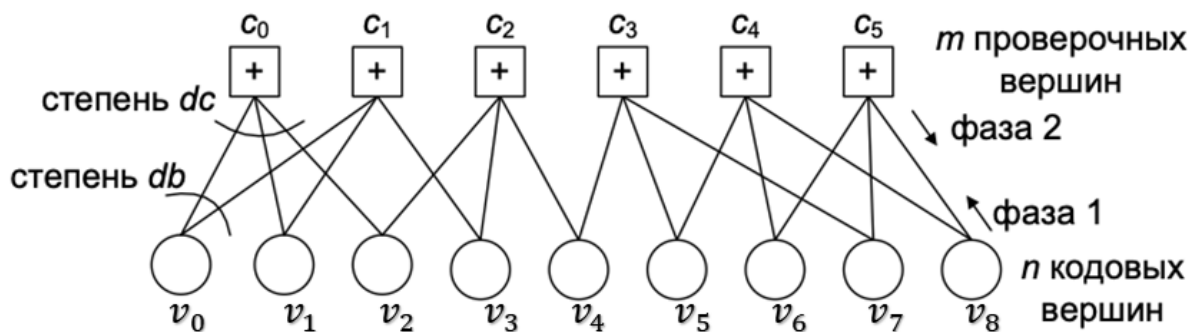


Рис. 1. Фактор-граф двоичного регулярного LDPC кода длины 9

Fig. 1. Factor-graph of binary regular LDPC code of length 9

Фактор-граф позволяет четко и кратко представить сложные вероятностные модели, упрощая выполнение логических выводов, оптимизацию, обучение, исправление ошибки в рамках некоторой модели (канала). Структура графа отражает отношения условной независимости между переменными в факторизованном распределении вероятностей, что имеет решающее значение для вероятностных рассуждений.

Особым классом кодов на графе, широко используемом в помехоустойчивом кодировании, являются помехоустойчивые линейные коды. Важным подмножеством этих кодов являются LDPC-коды (Low Density Parity Check Codes)). Низкая плотность отличных от нуля символов в проверочной матрице этих кодов позволяет осуществлять декоди-

рование с мягкими решениями с использованием метода распространения доверия (Belief Propagation, BP) с относительно небольшой сложностью. Метод BP обладает значительно большей корректирующей способностью по сравнению с методами декодирования с жесткими решениями.

Фактор-граф LDPC-кода G показан на рис.1. Он является графом Таннера с двумя множествами вершин. Одно состоит из $m=n-k$ факторных (проверочных) вершин $\{c_0, c_1, \dots, c_{m-1}\}$, соответствующих m строкам матрицы H , второе - из n переменных (кодовых) вершин $\{v_0, v_1, \dots, v_{n-1}\}$ соответствующих n столбцам матрицы H .

Эффективность декодирования методом BP уменьшается из-за наличия циклов в фактор-графе, образующих треппин-

сеты (Trapping set, TS). Треппин-сеты — это $TS(a, b)$ -подграфы, состоящие из a символьных (переменных) узлов, b из которых инцидентны проверочным узлам

с нечетными степенями [19]. Треппин-сеты обуславливают ошибку декодирования в методе ВР. Примеры треппин-сетов приведены на рис. 2.

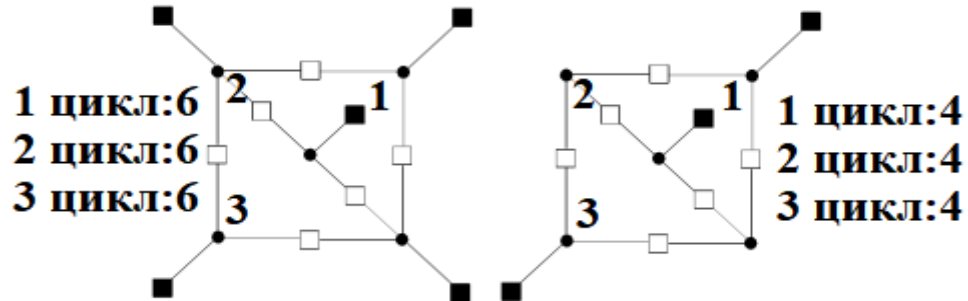


Рис. 2. Подграфы треппин-сетов $TS(5,5)$ (слева) и $TS(5,3)$ (справа): ● – символьный узел; □ – проверочный узел с четной степенью; ■ – проверочный узел с нечетной степенью

Fig. 2. Trapping set subgraphs: $TS(5,5)$ (left) and $TS(5,3)$ (right): ● – symbolic node; □ – check node with even degree; ■ – check node with odd degree

В работе [18] Веласкес и Субрама-ни предложили метод поиска треппин-сетов в фактор-графе $G=(VUC,E)$ на основе использования целочисленного линейного программирования.

Целочисленное линейное программирование позволяет найти экстремум целочисленной функции с учетом ограничений на переменные. Чаще всего для этого используется симплекс метод – алгоритм решения оптимизационной задачи линейного программирования путём перебора вершин выпуклого многогранника в многомерном пространстве.

В соответствии с методом [18] ищется минимум целевой функции:

$$\min \sum_{v_i \in V} x_i, \quad (2)$$

где x_i – битовые флаги кодовых вершин, образующих треппин-сеты, $x_i \in \{0,1\}$, $\forall i \in \{1,2,\dots,n\}$; при выполнении следующих двух условий.

Первое условие:

$$\sum_{c_j \in C} I_j^{\text{odd}} = b, \quad (3)$$

где I_j^{odd} – фиктивная переменная, равная 1, если символьный узел инцидентен нечетному числу проверок, равная 0 в противном случае, $\forall j \in \{1,2,\dots,m\}$, $b < b_{\max}$, и $b_{\max}$ задает максимальный параметр нечетной степени инцидентности $TS(a,b)$.

Второе условие:

$$2\alpha_j + I_j^{\text{odd}} - \sum_{(v_i, c_j) \in E} x_i = 0, \quad \forall j \in \{1,2,\dots,m\}, \quad (4)$$

где α_j – вспомогательная переменная для проверки условия степени инцидентности фиктивной переменной I_j^{odd} , $\alpha_k \in \{0, \dots, \lfloor \frac{\rho_{\max}}{2} \rfloor\}$, $\rho_{\max}$ – наибольшая степень инцидентности проверки в TS -подграфе (вес строки), $\forall k \in \{1,2,\dots,m\}$.

В результате решения целочисленной программы с $n+2m$ переменными и $m+1$ условиями находятся x_i (битовые

флаги кодовых вершин, образующих треппин-сеты).

В работе [18] Веласкес и Субрамани искали треппин-сеты для кода Маргулиса (2640, 1320) [26] и кода Маргулиса (4896, 2474) на графе Рамануджана [27]. При этом применялся математический пакет линейного программирования Gurobi platform версии 7.5.1, запускаемый на 32 потоках 64 ядерного процессора (Intel Xeon Phi Processor 7210, 64 GB DDR4). В частности, для кода Маргулиса (4896, 2474) за 700451 секунд был найден подграф с 48 кодовыми вершинами.

Недостатком метода является экспоненциальный рост сложности вычислений с ростом параметра a треппин-сета. Полный перебор требует анализ $\binom{n}{a}$ точек в пространстве поиска решений.

Нами предложена модификация метода поиска треппин-сетов с использованием линейного программирования, основанная на факте наличия кодовых вершин в кратчайших (коротких) циклах графа. Эта модификация, используя множество кодовых вершин $cycle_{vns}$, позволяет на ранних этапах работы линейного решателя – пресолвера, осуществить отсечения максимального числа невыполнимых условий.

Новый метод предназначен для поиска треппин-сетов $TS(a, b)$ с минимальным значением a , ($\min(a)_{cycle_{vns} \in TS(a, b)}$) путем использования смешанного целочисленного линейного программирования (mixed integer linear programming

problem). При этом конкретный вид целевой функции, ограничения переменных и неравенств определяются с учетом наличия априорных узлов. В проверочной матрице $H^{m \times n} \in GF(2)$ ищутся кодовые вершины, образующие $TS(a, b)$: $\min(a)_{TS(a, b) \in H}$ при наличии списка кодовых узлов $cycle_{vns}$, содержащихся в кратчайшем (коротком) цикле, образующем $TS(a, b)$.

Для поиска треппин-сетов используется следующая целевая функция:

$$\min(f^T * x), \quad (5)$$

где x_i – битовые флаги кодовых вершин, образующих треппин-сеты, $x_i \in \{0, 1\}$, $\forall i \in \{2*m+1, \dots, 2*m+n\}$, m – число проверочных вершин, $x_i \in \mathbb{Z}$, $\forall i \in \{1, \dots, 2*m\}$, $f = (0^{1 \times m} 1^{1 \times m} 0^{1 \times n})$.

Решения должны удовлетворять следующим условиям.

Первое условие:

Переменные решения x_i должны попадать в интервал:

$$lb \leq x \leq ub, \quad (6)$$

где $lb = 0^{(2m+n) \times 1}$, $ub(1:m) = \left\lfloor \frac{1}{2} \max \text{degree}_{CN} \right\rfloor$, $ub(m+1:2*m+n) = 1$, и $\max \text{degree}_{CN}$ – максимальный вес строки в проверочной матрице.

Второе условие:

$$A_{eq} * x = b_{eq}, \quad (7)$$

$$\text{где } A_{eq} = \begin{pmatrix} 2*I_m & I_m & -H \\ 0^{1 \times m} & 0^{1 \times m} & I^{1 \times m} \\ & Neq & \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$b_{eq} = \begin{pmatrix} 0^{m \times 1} \\ a \\ Ceq \end{pmatrix}, \quad (9)$$

и $\text{Ceq} = \text{card}(\text{cycle}_{vns})$, $\text{Neq}(2*m + \text{cycle}_{vns}) = 1$, где a – параметр треппин-сета $\text{TS}(a, b)$, card – число элементов в списке, Neq – маска позиций априорных кодовых вершин.

Предлагаемый метод поиска треппин-сетов методом смешанного целочисленного линейного программирования с априорным списком кодовых вершин можно представить в виде следующего алгоритма:

Вход: Проверочная матрица LDPC-кода $H^{m \times n}$, список кодовых вершин, содержащихся в кратчайшем(коротком) цикле cycle_{vns}

Выход: Список узлов треппин-сета $\text{TS}_{\text{list}} = \{\text{TS}_1(a, b): v_1, v_2, \dots, v_a\}$, содержащий параметры треппин-сета (a, b) и список символьных узлов, его образующих.

Формируем вектор-функцию цели $f = (0^{1 \times m} \ 1^{1 \times m} \ 0^{1 \times n})$.

Формируем матрицу линейной задачи, $\text{Neq}(2*m + \text{cycle}_{vns}) = 1$

$$A_{\text{eq}} = \begin{pmatrix} 2*I_m & I_m & -H \\ 0^{1 \times m} & 0^{1 \times m} & I^{1 \times m} \\ \text{Neq} \end{pmatrix}.$$

Формируем правую часть системы

$$\text{beq} = \begin{pmatrix} 0^{m \times 1} \\ a \\ \text{Ceq} \end{pmatrix}.$$

Формируем граничные условия для решения

$$lb \leq x \leq ub.$$

Вызываем функцию `cplexmilp` ($f, A_{\text{eq}}, \text{beq}, lb, ub$) для решения задачи смешанного линейного программирования, за-

данного уравнением $A_{\text{eq}} * x = \text{beq}$ на отрезке $lb \leq x \leq ub$.

Получаем искомое решение – вектор x , определяющий кодовые вершины треппин-сета $v_1, v_2, \dots, v_a$.

Согласно определению треппин-сета, находим кодовые вершины нечетной инцидентности, $\text{TS}(a, b)$.

Возвращаем $\text{TS}(a, b)$.

Результаты и их обсуждение

Для сравнения с методом Веласкеса-Субрамани был выполнен поиск треппин-сетов в кодах Маргулиса (2640, 1320) [26] и (4896, 2474) [27] с использованием предложенного метода. При этом применялся математический пакет линейного программирования IBM CPLEX версии 12.8, который запускался на 32 потоках 16 ядерного процессора AMD Ryzen 3950X с 32GB ОЗУ (DDR4).

Для кода Маргулиса (2640, 1320) была выбрана пара кодовых вершин в графе $\text{cycle}_{vns} = \{1, 1321\}$. При этом использовался метод поиска кратчайшего цикла в графе путем возведения в степень матрицы инцидентности. После выбора решалась задача смешанного линейного программирования для поиска минимального треппин-сета $\text{TS}(a, b)$, $\min(a)_{\text{cycle}_{vns} \in \text{TS}(a, b)}$.

В результате был найден треппин-сет $\text{TS}(6, 6)$, состоящий из кодовых вершин $x_i = \{1, 250, 901, 1321, 1883, 2454\}$ и проверочных вершин $c_i = \{5, 8, 253, 283, 326, 467, 497, 956, 1023, 1100, 1137, 1167\}$, заданный следующей проверочной подматрицей $H_{\text{TS}(6, 6)}$.

$$H_{TS(6,6)} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Графическое представление треппин-сета TS(6,6) приведено на рис. 3.

Время поиска этого треппин-сета составило 0.53 секунды (252.39 ticks). Время решения аналогичной задачи по методу Веласкеса-Субрамани потребовало 4373.78 секунды ([18, табл. 2]) при использовании более быстродействующего пакета линейного программирования (Gurobi platform версии 7.5.1). Ускорение, обеспечиваемое предложенным в статье методом, по сравнению с методом Веласкеса-Субрамани составляет 8252.415 раза.

В работе [18] для кода Маргулиса (4896, 2474) на графе Рамануджана [27] был найден подграф стоппин-сета размера 48 за 700451 секунд. Нами были найдены подграфы размером 48 за 432 секунды и 52 за 459 секунд, соответственно. Ускорение по сравнению с методом Веласкеса-Субрамани составляет более 1621 раза.

Подграф TS(52,14) размера 52 состоит из кодовых вершин $x_i = \{32, 125, 135, 140, 329, 394, 556, 580, 745, 928, 969, 981, 1015, 1047, 1051, 1128, 1130,$

1141, 1295, 1345, 1396, 1491, 2005, 2199, 2276, 2366, 2556, 2700, 2823, 2824, 2884, 2921, 3087, 3094, 3140, 3149, 3269, 3349, 3601, 3707, 3744, 4103, 4164, 4189, 4473, 4489, 4499, 4696, 4727, 4837, 4867, 4888} и проверочных вершин, $c_i = \{31, 92, 149, 182, 189, 195, 196, 214, 241, 343, 354, 359, 360, 384, 386, 407, 446, 525, 541, 566, 575, 641, 734, 737, 767, 798, 859, 880, 887, 925, 943, 981, 1001, 1052, 1069, 1080, 1095, 1122, 1165, 1174, 1189, 1196, 1264, 1314, 1328, 1332, 1352, 1423, 1432, 1445, 1452, 1472, 1485, 1487, 1512, 1545, 1551, 1556, 1586, 1629, 1647, 1679, 1719, 1752, 1851, 1873, 1875, 1911, 1918, 2000, 2022, 2052, 2059, 2089, 2120, 2128, 2151, 2192, 2304, 2320, 2330, 2410, 2412, 2415, 2447\}$, (рис. 4).

Замечание. Структура треппин-сета и выбор априорных узлов влияют на эффективность CPLEX решателя, позволяя ускорять поиск за счет более эффективных методов решения задачи смешанного целочисленного линейного программирования функции `cxplexmilp`, [28]. Полный перебор для поиска треппин-сета TS(62, b) в коде Маргулиса (4896, 2474) требует анализа $\binom{4896}{62}$ точек в пространстве поиска решения.

Однако при определенных параметрах целочисленного программирования метод отсечения (метод Гомори) [29], релаксация задачи путем смешанных целочисленных округлений (обобщений неравенств целочисленного округления Хватала) [30] и другие методы, реализованные в пакете CPLEX, существенно ускоряют поиск треппин-сетов.

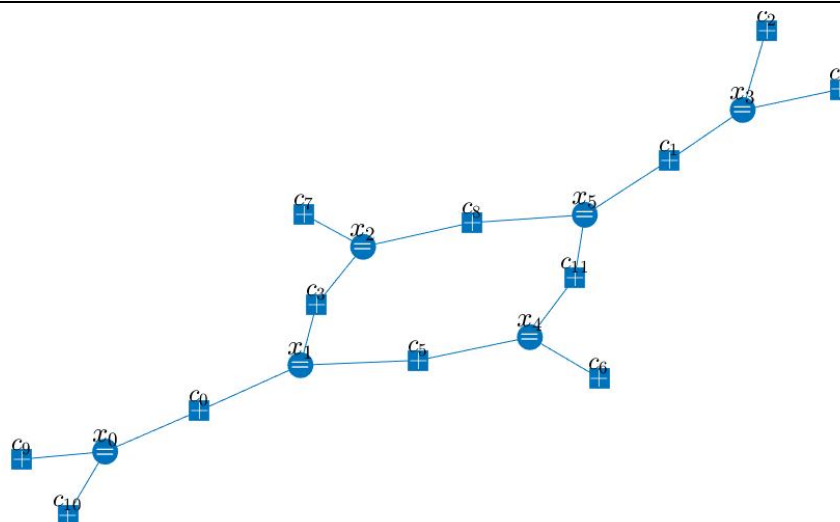


Рис. 3. Графическое представление $TS(6,6)$ в коде Маргулиса (2640, 1320)

Fig. 3. Graph representation of $TS(6,6)$ in Margulis code (2640, 1320)

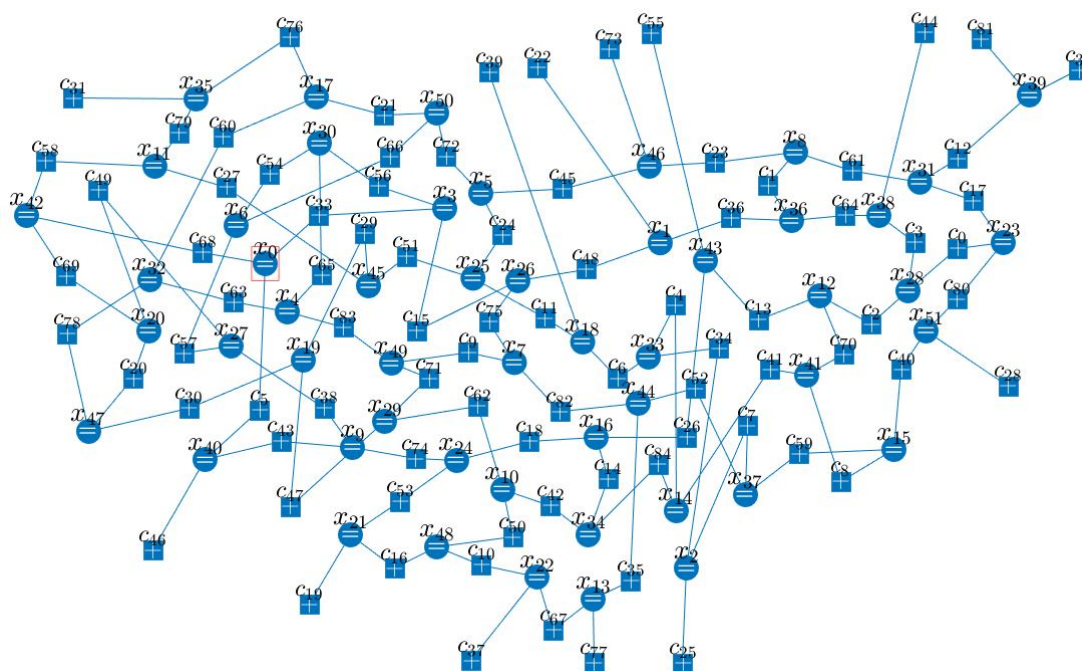


Рис. 4. Графическое представление $TS(52,14)$ в коде Маргулиса (4896, 2474)

Fig. 4. Graph representation of $TS(52,14)$ in Margulis code (4896, 2474)

Например, в случае поиска треппинг-сети в коде Маргулиса (4896, 2474) удачный выбор узлов в цикле длины 12, $cycle_{vns} = \{6, 41, 1132, 1140, 1508, 1561, 1988, 2506, 3154, 3182, 3444, 3575,$

$4141, 4710\}$ с последующим расширением списка до $cycle_{vns} = \{6, 41, 65, 159, 364, 719, 769, 880, 970, 981, 1097, 1132, 1140, 1164, 1274, 1279, 1385, 1508, 1561, 1625, 1681, 1716, 1823, 1979, 1988,$

2194, 2216, 2369, 2460, 2506, 2738, 2765, 2795, 2855, 2950, 2976, 3024, 3154, 3182, 3271, 3444, 3566, 3575, 3836, 3940, 4012, 4109, 4141, 4162, 4355, 4396, 4401, 4463, 4547, 4581, 4671, 4710, 4800, 4859, 4864} позволил выполнить поиск треппин-сета $TS(62,16)$, состоящего из кодовых вершин $x_i = \{6, 41, 65, 159, 364, 546, 719, 769, 880, 970, 981, 1097, 1132, 1140, 1164, 1274, 1279, 1385, 1508, 1561, 1625, 1681, 1716, 1819, 1823, 1979, 1988, 2194, 2216, 2369, 2460, 2506, 2738, 2765, 2795, 2855, 2950, 2976, 3024, 3154, 3182, 3271, 3444, 3566, 3575, 3836, 3940, 4012, 4109, 4141, 4162, 4355, 4396, 4401, 4463, 4547, 4581, 4671, 4710, 4800, 4859, 4864\}$ и проверочных вершин $c_i = \{8, 15, 23, 53, 86, 113, 122, 123, 132, 133, 204, 225, 234, 261, 377, 460, 486, 514,$

540, 541, 559, 587, 706, 723, 744, 751, 756, 774, 777, 814, 849, 874, 876, 880, 882, 934, 935, 963, 995, 1009, 1073, 1083, 1098, 1106, 1119, 1133, 1148, 1225, 1233, 1244, 1269, 1342, 1348, 1377, 1390, 1402, 1465, 1502, 1525, 1536, 1562, 1586, 1589, 1625, 1646, 1658, 1666, 1670, 1708, 1746, 1763, 1764, 1766, 1774, 1801, 1806, 1807, 1832, 1893, 1894, 1896, 1908, 1912, 1942, 1959, 1967, 1975, 1994, 2003, 2013, 2078, 2090, 2190, 2242, 2271, 2281, 2320, 2336, 2339, 2370\} (рис. 5) за 3.67 секунды.

Для сравнения с модифицированным методом выборки по значимости Коула [16] с помощью предложенного метода был выполнен поиск кратчайшего треппин-сета в нерегулярном квази-циклическом LDPC-коде (2560, 2048) (коде Б) с обхватом 6, EMD 5.

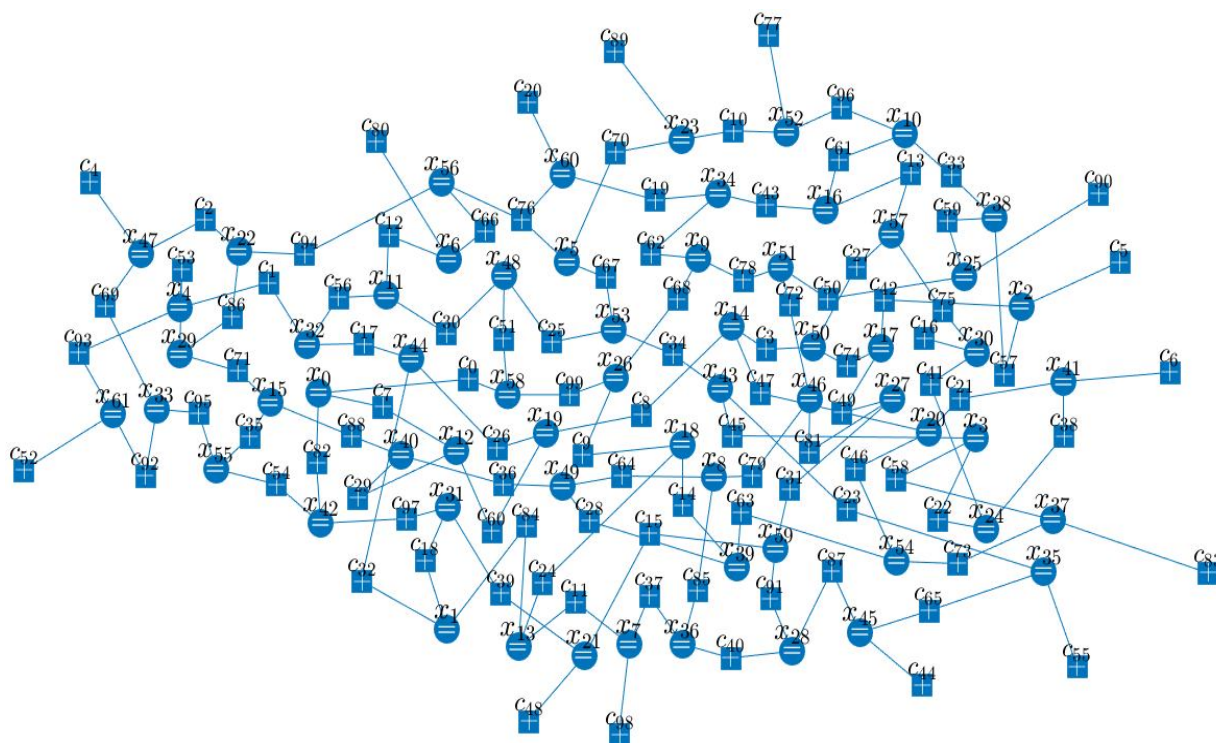


Рис. 5. Графическое представление $TS(62,16)$ в коде Маргулиса (4896, 2474)

Fig. 5. Graph representation of $TS(62,16)$ in Margulis code (4896, 2474)

С использованием 6 априорных кодовых вершин, содержащихся в кратчайшем цикле, менее чем за 0.3 секунды был найден $TS(20, 2)$, состоящий из кодовых вершин $x_i = \{257, 748, 790, 909, 946, 993, 1149, 1168, 1193, 1284, 1638, 1683, 1827, 2048, 2227, 2232, 2242, 2279, 2346, 2545\}$ и проверочных вершин $c_i = \{10, 17, 31, 61, 87, 93, 98, 102, 108, 127, 130, 140, 150, 168, 177, 223, 224, 242, 253, 276, 278, 311, 318, 320, 357, 375, 381, 387, 421, 435, 440, 450, 465, 474, 487, 490, 502\}$ (рис. 6), заданных следующей проверочной подматрицей $H_{TS(20,2)}$.

Треппин-сет $TS(20, 2)$ не был найден в работе [16] по причине большого обобщенного веса Хэмминга для примененных параметров поиска [16]. Это показывает большую полноту поиска предложенного метода, вытекающую из его декодеро-независимости, по сравнению с методами выборки по значимости.

Результаты применения предложенного метода для некоторых LDPC-кодов в сравнении с методом Веласкеса-Субрамани приведены в табл. 1.

Детальные результаты работы предложенного метода поиска треппин-сетов, отчеты результатов предварительной оптимизации решателя CPLEX, подматрицы и графы приведены в [31].

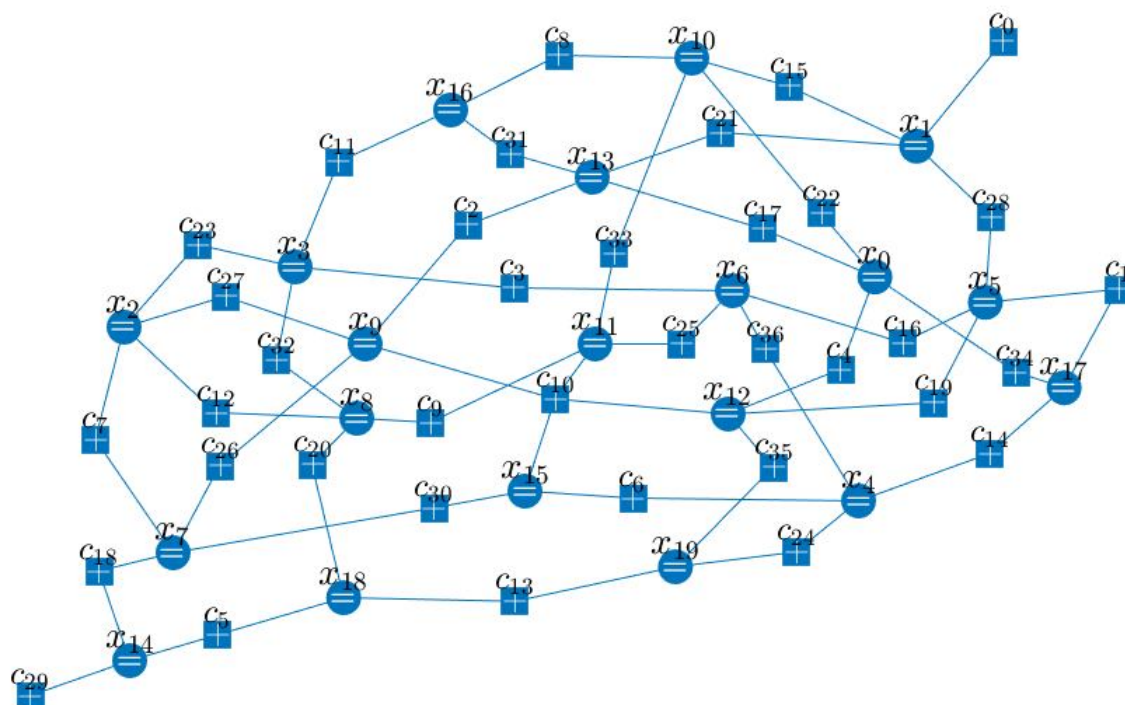


Рис. 6. Графическое представление $TS(20, 2)$ в QC-LDPC кода (2560, 2048)

Fig. 6. Graph representation of $TS(20, 2)$ in QC-LDPC code (2560, 2048)

$$H_{TS(20,2)} =$$

Таблица 1. Время, необходимое для поиска треппин-сетов TS(a, b) в соответствующих LDPC-кодах, в секундах**Table 1.** Trapping set search time for different LDPC-codes, sec

TS(a, b)	LDPC-код Маккея PEG(1008, 504)		LDPC-код Маргулиса (2640, 1320)	
	ВС метод, [18]	Предложенный метод	ВС метод, [18]	Предложенный метод
a=5	53.42	5.22	520.95	6.83
a=6	31.74	2.06	4373.78	0.53
a=7	984.51	1.34	716.04	2.14
a=8	4.10	1.08	18843.19	0.22
a=9	4864.37	1.27	13504.13	0.20
a=10	8143.11	1.34		0.92
a=11	485919.5	4.74		1.21
a=12	245.1	3.63		4.02
...				
a=18		5.92		3.86

Выводы

В статье предложен метод поиска треппин-сетов на основе смешанного целочисленного линейного программирования с использованием априорного списка кодовых вершин. Метод обладает высоким быстродействием и обеспечивает полноту поиска.

В коде Маргулиса (2640, 1320) с помощью предложенного метода был найден треппин-сет TS(6,6) за время 0.53 с. Ускорение, обеспечиваемое предложенным в статье методом, по сравнению

с методом Веласкеса-Субрамани составляет 8252.415 раза.

Ключевое отличие предложенного метода поиска треппин-сетов по сравнению с методом выборки по значимости Коула заключается в полноте получаемого множества треппин-сетов, что обусловлено независимостью метода линейного программирования от параметров декодера.

Благодаря высокому быстродействию и полноте поиска впервые были найдены треппин-сеты TS(62,16) и TS(52,14) в коде Маргулиса (4896, 2474).

Список литературы

1. Djordjevic I. B. Quantum Communication, Quantum Networks, and Quantum Sensing / Elsevier/Academic Press, 2022. 608 p.
2. Milicevic M., Feng C., Zhang L.M. et al. Quasi-cyclic multi-edge LDPC codes for long-distance quantum cryptography // Quantum Inf. 2018. Vol.4. 21 p.

3. Panteleev P., Kalachev G. Degenerate Quantum LDPC Codes with Good Finite Length Performance // *Quantum*. 2021. Vol 5, p. 585.
4. Mézard M., Montanari A. Information, Physics, and Computation. Oxford Graduate Texts / Oxford University Press. 2009. 569 p.
5. Richardson T., Urbanke R. Modern Coding Theory / Cambridge University Press. 2008. 590 p.
6. Ryan W., Shu Lin Channel Codes: Classical and Modern / Cambridge University Press. 2009. 710 p.
7. Djordjevic I. B. Advanced Optical and Wireless Communications Systems, 2nd Edition / Springer Nature Switzerland AG. 2022. 992 p.
8. Rosnes E., Ytrehus O. An Algorithm to Find All Small-Size Stopping Sets of Low-Density Parity-Check Matrices // *IEEE International Symposium on Information Theory, Nice, France*. 2007. Pp. 2936-2940.
9. Richardson T. J. Error floors of LDPC codes// in 41st Annual Allerton Conference on Comm., Control and Computing, Oct. 2003. P. 1426–1435.
10. Rosnes E. "On the Effects of Pseudo-Codewords on Independent Rayleigh Flat-Fading Channels," *IEEE Inform. Theory Workshop on Information Theory for Wireless Networks, Bergen, Norway*. 2007. Pp. 1-5.
11. Velasquez A., Subramani K., Wojciechowski P. On the complexity of and solutions to the minimum stopping and trapping set problems // *Theor. Comput. Sci*. 2022. Vol. 915. Pp. 26-44.
12. Cole C. A. Error floor analysis for an ensemble of easily implementable irregular (2048, 1024) LDPC codes// *MILCOM - 2008*, pp. 1-5.
13. Cole S. A., Wilson E. H., Giallorenzi T. A general method for finding low error rates of LDPC codes. URL: arxiv.org/abs/cs/0605051. (date of treatment: 14.04.2022).
14. Butler B. K., Siegel P. H. Error Floor Approximation for LDPC Codes in the AWGN Channel // *ITIT*. 2014. Vol. 60. № 12. Pp. 7416-7441.
15. Karimi M., Banihashemi A. H. Efficient Algorithm for Finding Dominant Trapping Sets of LDPC Codes // *IEEE Transactions on Information Theory*, 2012. Vol. 58. № 11. Pp. 6942-6958.
16. Усатюк В.С., Егоров С.И. Построение LDPC-кодов с использованием модифицированного метода выборки по значимости Коула // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2023; 27(1): 92-110. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-92-110>.
17. Sariduman A., Pusane A.E., Taşkın Z.C. An integer programming based trapping set search technique // 2012 20th Signal Processing and Communications Applications Conference, Mugla, Turkey. 2012. Pp. 1-4.
18. Velasquez A., et al. Finding Minimum Stopping and Trapping Sets: An Integer Linear Programming Approach / In: Lee J., Rinaldi G., Mahjoub A. (eds) *Comb. Optim. ISCO 2018. Lect. Notes in Comp. Science*, V. 10856. Pp. 402–415.

19. Vasić B., et al Trapping set ontology // 47th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton). 2009. Pp. 1-7.
20. Improved min-sum decoding algorithms for irregular LDPC codes / J. Chen, R. M. Tanner, C. Jones, Y. Li // ISIT., 2005. Pp. 449-453.
21. Two-dimensional correction for min-sum decoding of irregular LDPC codes / J. Zhang, M. Fossorier, D. Gu, J. Zhang // in IEEE Communications Letters. March 2006. Vol. 10. № 3. Pp. 180-182.
22. Zhang S., Schlegel C. Controlling the Error Floor in LDPC Decoding // in IEEE Transactions on Comm. 2013. Vol. 61(9). Pp. 3566-3575.
23. Tian T., et al Selective avoidance of cycles in irregular LDPC code construction // IEEE Trans. on Comm. 2004. Vol. 52. № 8. Pp. 1242-1247.
24. Усатюк В.С., Егоров С.И. Построение квазициклических недвоичных низкоплотностных кодов на основе совместной оценки их дистантных свойств и спектров связности //Телекоммуникации. 2016. №8. С. 32-40.
25. Усатюк В.С., Егоров С.И. Устройство для оценки кодового расстояния линейного блочного кода методом геометрии чисел // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2017. № 4 (25). С. 24-33.
26. Margulis G. A. Explicit Constructions of Graphs Without Short Cycles and Low Density Codes // Combinatorica. 1982. Vol. 2. № 1. Pp. 71-78.
27. Rosenthal J., Vontobel P. O. Constructions of regular and irregular LDPC codes using Ramanujan graphs and ideas from Margulis // Proceedings 2001 IEEE International Symposium on Information Theory. 2001. Pp. 4.
28. IBM CPLEX function documentation. URL: <https://www.ibm.com/docs/en/icos/12.9.0?topic=functions-cplexmip>
29. Gilmore P. C., Gomory R. E. A linear programming approach to the cutting stock problem". Operations Research. 9 (6), (1961): 849–859.
30. Chvatal V. Edmonds polytopes and a hierarchy of combinatorial problems // Discrete Math. 1973. № 4. Pp. 305–337.
31. Usatyuk V.S. Support material for Mixed Linear Programming Method for Trapping Sets Search. URL: <https://github.com/Lcrypto/trapping-sets-enumeration/tree/master/LP>

References

1. Djordjevic I. B. Quantum Communication, Quantum Networks, and Quantum Sensing. / Elsevier/Academic Press, 2022, 608 p.
2. Milicevic, M., Feng, C., Zhang, L.M. et al. Quasi-cyclic multi-edge LDPC codes for long-distance quantum cryptography. *Quantum Inf*, 2018, vol.4, 21 p.
3. Panteleev P., Kalachev G. Degenerate Quantum LDPC Codes with Good Finite Length Performance. *Quantum*, 2021, vol. 5, 585 p.

4. Mézard M., Montanari A. *Information, Physics, and Computation*. Oxford Graduate Texts / Oxford University Press, 2009, 569 p.
5. Richardson T., Urbanke R. *Modern Coding Theory*. Cambridge University Press. 2008, 590 p.
6. Ryan W., Shu Lin. *Channel Codes: Classical and Modern*. Cambridge University Press, 2009, 710 p.
7. Djordjevic I. B. *Advanced Optical and Wireless Communications Systems*, 2nd Edition. Springer Nature Switzerland AG, 2022, 992 p.
8. Rosnes E., Ytrehus O. An Algorithm to Find All Small-Size Stopping Sets of Low-Density Parity-Check Matrices. *IEEE International Symposium on Information Theory*, Nice, France, 2007, pp. 2936-2940.
9. Richardson T. J. Error floors of LDPC codes. *In 41st Annual Allerton Conference on Comm., Control and Computing*, Oct. 2003, pp. 1426–1435.
10. Rosnes E. "On the Effects of Pseudo-Codewords on Independent Rayleigh Flat-Fading Channels," *IEEE Inform. Theory Workshop on Information Theory for Wireless Networks*, Bergen, Norway, 2007, pp. 1-5.
11. Velasquez A., Subramani K., Wojciechowski P. On the complexity of and solutions to the minimum stopping and trapping set problems. *Theor. Comput. Sci.*, 2022, vol. 915, pp. 26-44.
12. Cole C. A. Error floor analysis for an ensemble of easily implementable irregular (2048, 1024) LDPC codes. *MILCOM - 2008*, pp. 1-5.
13. Cole S. A., Wilson E. H., Giallorenzi T. A general method for finding low error rates of LDPC codes. Available at: arxiv.org/abs/cs/0605051. (accessed: 14.04.2022).
14. Butler B. K., Siegel P. H. Error Floor Approximation for LDPC Codes in the AWGN Channel. *ITIT*, 2014, vol. 60, no. 12, pp. 7416-7441.
15. Karimi M., Banihashemi A. H. Efficient Algorithm for Finding Dominant Trapping Sets of LDPC Codes. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2012, vol. 58, no. 11, pp. 6942-6958.
16. Usatjuk V. S., Egorov S. I. Construction of LDPC Codes Using Cole's Modified Importance Sampling Method. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(1): 92-110 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-1-92-110>.
17. Sarıduman A., Pusane A.E., Taşkın Z.C. An integer programming based trapping set search technique. *2012 20th Signal Processing and Communications Applications Conference*, Mugla, Turkey, 2012, pp. 1-4.
18. Velasquez A., et al. Finding Minimum Stopping and Trapping Sets: An Integer Linear Programming Approach; In: Lee J., Rinaldi G., Mahjoub A. (eds) *Comb. Optim. ISCO Lect. Notes in Comp. Science*, 2018. V. 10856., pp. 402–415.

19. Vasić B., et al Trapping set ontology. *47th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton)*, 2009, pp. 1-7.
20. Chen J., Tanner R. M., Jones C., Li Y. Improved min-sum decoding algorithms for irregular LDPC codes. *ISIT*, 2005, pp. 449-453.
21. Zhang J., Fossorier M., Gu D., Zhang J. Two-dimensional correction for min-sum decoding of irregular LDPC codes. in *IEEE Communications Letters*, March 2006, vol. 10, no. 3, pp. 180-182.
22. Zhang S., Schlegel C. Controlling the Error Floor in LDPC Decoding. In *IEEE Transactions on Comm.*, 2013, vol. 61(9), pp. 3566-3575.
23. Tian T., et al Selective avoidance of cycles in irregular LDPC code construction. *IEEE Trans. on Comm.*, 2004, vol. 52, no. 8, pp. 1242-1247.
24. Usatjuk V. S., Egorov S. I. Postroenie kvazitsiklicheskikh nedvoichnykh nizkoplotnostnykh kodov na osnove sovmestnoi otsenki ikh distantnykh svoistv i spektrov svyaznosti [Quasi-Cyclic Non-binary LDPC Codes Construction based on joint optimization the code distance properties and ACE=EMD Spectrum code's graph properties]. *Telekommunikatsii = Telecommunications*, 2016, no 8, pp. 32-40.
25. Usatjuk V. S., Egorov S. I. [An Apparatus for Estimation of Linear Block Codes Minimum Distance Based on Number Geometry Method]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2017, no 4 (25), pp. 24-33 (In Russ.).
26. Margulis G. A. Explicit Constructions of Graphs Without Short Cycles and Low Density Codes. *Combinatorica*, 1982, vol. 2, no. 1, pp. 71-78.
27. Rosenthal J., Vontobel P. O. Constructions of regular and irregular LDPC codes using Ramanujan graphs and ideas from Margulis. *Proceedings 2001 IEEE International Symposium on Information Theory*, 2001, pp. 4.
28. IBM CPLEX function documentation <https://www.ibm.com/docs/en/icos/12.9.0?topic=functions-cplexmilp>
29. Gilmore P. C., Gomory R. E. A linear programming approach to the cutting stock problem". *Operations Research*. 1961. 9 (6): 849–859.
30. Chvatal V. Edmonds polytopes and a hierarchy of combinatorial problems. *Discrete Math*, 1973, no. 4, pp. 305–337.
31. Usatyuk V.S. Support material for Mixed Linear Programming Method for Trapping Sets Search. Available at: <https://github.com/Lcrypto/trapping-sets-enumeration/tree/master/LP>

Информация об авторах / Information about the Authors

Усатюк Василий Станиславович, кандидат технических наук, главный инженер департамента исследований и разработок, ООО «Т8», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: usatiuk@t8.ru

Vasily S. Usatjuk, Cand. of Sci. (Engineering), Head Engineer, R&D department, Company T8, Moscow, Russian Federation, e-mail: usatiuk@t8.ru

Егоров Сергей Иванович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sie58@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5859-1024>

Sergey I. Egorov, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sie58@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5859-1024>

К вопросу о моделировании процесса понимания текста с помощью систем искусственного интеллекта

Т. В. Кружилина¹ ✉

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

✉ e-mail: t.kruzhilina@yandex.ru

Резюме

Целью исследования является проведение сопоставительного анализа текстов, сгенерированных системой искусственного интеллекта в процессе обработки исходного текста на естественном языке, и встречаемых текстов, являющихся результатом понимания человеком исходного художественного текста.

Методы. Для проведения сопоставительного анализа денотатных структур встречаемых текстов автором была применена экспериментальная методика. Участники эксперимента (7 студентов 4 курса факультета дополнительного образования «Переводчик в сфере профкоммуникации», 3 доцента кафедры иностранных языков ЮЗГУ) оценивали 10 встречаемых текстов разной природы – сгенерированные ИИ и человеком на предмет успешности воссоздания смысловой структуры текста.

Результаты эксперимента свидетельствуют в пользу того, что полнота смыслового содержания сгенерированного текста не зависит от структуры исходного текста. Современные методы семантической обработки текста ИИ системой делают возможным получение на выходе полноценных текстовых произведений, созданных с учётом правил и норм естественного языка. ИИ системы успешно воссоздают денотатную структуру текста и реконструируют синтаксическую структуру.

Заключение. Доступ к большим базам данных позволяет обучать нейронную сеть на больших корпусах текстов, что отражается на повышении точности и вариативности используемых лексических единиц и конструктов. Точность передачи смыслового содержания текста варьируется. Она зависит от степени сжатия текста – чем она выше, тем меньше может быть точность, т.к. нейронная сеть не в состоянии классифицировать денотатные связи на предмет значимости для основного смысла. Степень точности передачи смыслового содержания определяется успешностью / неуспешностью понимания глубинного скрытого смысла, которые обусловлены пониманием лингвистического и экстралингвистического контекста. Способность опознать модель ситуации, воссоздаваемую в исходном тексте, является залогом понимания скрытого смысла. ИИ система может довольно корректно и точно воссоздать поверхностную денотатную структуру текста, но на данном этапе развития не способна конструировать модель ситуации

Ключевые слова: когнитивное моделирование; психолингвистика; нейронная сеть; обработка естественного языка; понимание текста; встречаемый текст.

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

Для цитирования: Кружилина Т. В. К вопросу о моделировании процесса понимания текста с помощью систем искусственного интеллекта // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(4): 98-116. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-4-98-116>.

Поступила в редакцию 03.11.2023

Подписана в печать 24.11.2023

Опубликована 21.12.2023

On Text Understanding Modeling by Means of Artificial Intelligence Systems

Tatiana V. Kruzhilina¹ ✉

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

✉ e-mail: t.kruzhilina@yandex.ru

Abstract

Purpose of research is to conduct a comparative analysis of texts generated by an artificial intelligence system in the process of processing source text in natural language and counter texts that are the result of human understanding of the source literary text.

Methods. To achieve the goal and objectives of the study, the author used an experimental technique to conduct a comparative analysis of the denotational structures of counter texts. Participants in the experiment (7 4th year students of the Faculty of Additional Education "Translator in the field of professional communications", 3 associate professors of the Department of Foreign Languages of South- West State University) assessed the success of recreating the semantic structure of the text of 10 counter texts of different nature - generated by AI and humans.

Results. The results of the experiment indicate that the completeness of the semantic content of the generated text does not depend on the structure of the source text. Modern methods of semantic text processing by an AI system make it possible to obtain the output of full-fledged text works created taking into account the rules and norms of natural language. AI systems successfully recreate the denotational structure of the text and reconstruct the syntactic structure.

Conclusion. Access to large databases allows you to train a neural network on large text corpora, which results in an increase in the accuracy and variability of the lexical units and constructs used. The accuracy of conveying the semantic content of the text varies. It depends on the degree of text compression - the higher it is, the less accuracy can be, because the neural network is unable to classify denotational connections for relevance to the underlying meaning. The degree of accuracy in conveying semantic content is determined by the success / failure of understanding the deep hidden meaning, which is determined by the understanding of the linguistic and extralinguistic context. The ability to recognize the situation model recreated in the source text is the key to understanding the hidden meaning. The AI system can recreate the surface denotational structure of the text quite correctly and accurately, but is not able to construct a model of the situation at this stage of development.

Keywords: cognitive modeling; psycholinguistics; neural network; natural language processing; understanding of the text; counter text.

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

For citation: Kruzhilina T. V. On Text Understanding Modeling by Means of Artificial Intelligence Systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(4): 98-116 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-4-98-116>.

Received 03.11.2023

Accepted 24.11.2023

Published 21.12.2023

Введение

Стремительное распространение технологий, задействующих системы искусственного интеллекта (ИИ) для обработки естественного языка, наблюдаемое нами в последние десятилетия, позволяет говорить о революции в методах обработки текстов и изображений. Компьютерная лингвистика, сфера науки, изучающая автоматическую обработку текстов, сделала большой шаг в исследовании применения нейронных сетей для работы с текстом и глубинного обучения нейронных сетей. Именно этим вопросам были посвящены последние конференции ассоциации компьютерной лингвистики (ACL). Пристальное внимание к вопросу развития возможностей нейронных сетей обусловлено перспективностью их применения в самых разных сферах деятельности, предполагающей повышение качества и скорости решения стандартных рутинных задач по классификации и обработке / переработке текстов; снижение трудоёмкости в работе с большими объёмами текстов; решение прикладных задач, например, создание чат-ботов, голосовых помощников, ассистентов-переводчиков и пр. При этом, учитывая тот факт, что технологические перспективы применения новых систем ИИ блестящи и список возможностей этого применения обширен, существует целый ряд ограничений и во-

просов, требующих детального рассмотрения с точки зрения самых разных дисциплин и парадигм. Статья продолжает ряд публикаций автора, посвящённых вопросам понимания текста. В предыдущих работах нами были рассмотрены факторы, обуславливающие процесс формирования и становления способности понимания текста; психолингвистические особенности деятельности понимания; феномен функциональной неграмотности как фактор снижения успешности понимания как записанного текста, так и звучащей речи; стратегии понимания текста и их видоизменение на современном этапе. В работе планируется сравнить результаты понимания текста человеком и нейронной сетью и выявить характерные особенности построения встречного текста человеком и нейронной сетью на настоящем этапе её развития. Для решения задач исследования необходимо рассмотреть процесс понимания текста человеком и процесс воссоздания смыслового содержания исходного текста нейронной сетью.

Нейросетевые технологии в обработке текста

Первыми достижениями в этой области можно назвать работы Уоррена Маккаллока и Уолтера Питтса по глубинному обучению. В середине прошлого века они предложили рассмотреть человеческий мозг в качестве фор-

мальной модели для построения искусственной нейросети. Создание Френком Розенблаттом такой модели на компьютере позволило обобщить огромный объём накопленных знаний о человеческом мозге и дало начало целому направлению исследований по обучению нейронной сети [1]. Первые успехи применения алгоритма обратного распространения ошибки сопровождались сложностями в связи с ограничениями в виде необходимости применения больших объёмов данных для обучения нейросети. Исследования были приостановлены, и лишь 40 лет спустя идеи машинного обучения получили новое развитие с связи с новыми функциональными возможностями и инновациями в области обработки данных.

Архитектура нейронной сети довольно сложна для наивного пользователя. Вершинами сети, которая представляет собой «направленный граф заданной архитектуры», являются нейроны. Количество входных и выходных узлов определяется задачей. Например, решение задачи на классификацию потребует поместить на выход сети один или два нейрона (разделение на два класса) и количество нейронов n при выделении n классов. Остальные уровни называют *скрытыми слоями* ¹.

¹ Хайдарова Р.Р. Архитектура и методы вычислений для распределенной сверточной нейронной сети на кластере компьютеров с ограниченными вычислительными ресурсами: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2020. 268 с.

Важным достижением ИИ в этой области считается изменение подхода к обработке текста. Если раньше каждый текстовый элемент, начиная с буквы, требовал описания большим количеством признаков самой разной природы, то на данном этапе развития потребность в сложных описаниях отпала с развитием *representation learning* – обучению представлению. Современная нейросеть способна самостоятельно устанавливать в исходном тексте закономерности и соответствия и использовать эти «знания» при генерировании продукта. Принципиально новым в современных ИИ системах является способность не привязываться к конструированию огромного количества признаков через нахождение внешних баз данных, концентрируясь на адекватном выборе источников баз данных и предварительной работе с текстом для последующего обучения нейросети, которое задействует большие объёмы данных, чем стандартные техники обработки текста. Задачи по автоматической обработке текста, решаемые с помощью нейронных сетей, довольно разнообразны (рис. 1).

Одним из перспективных направлений работы с текстом в этой области специалисты признают исследование дистрибутивной семантики, например, установление значения слова исходя из контекста (построение вектора слова), которое производится с помощью математической модели. Привлечение больших корпусов текстов позволяет выде-

лить для определённого слова максимальное количество контекстов коими могут считаться соседние слова и слова из одной синтаксической конструкции. В клетках матрицы фиксируется частотность употребления слова в определённом контексте или используется коэффициент PPMI (Positive Pointwise Mutual Infor-

mation – коэффициент положительной попарной взаимной информации), который показывает уровень randomness употребления слова в определённом контексте. Такого рода матрицы широко применяются для кластеризации слов и установления близких по значению групп слов [2].

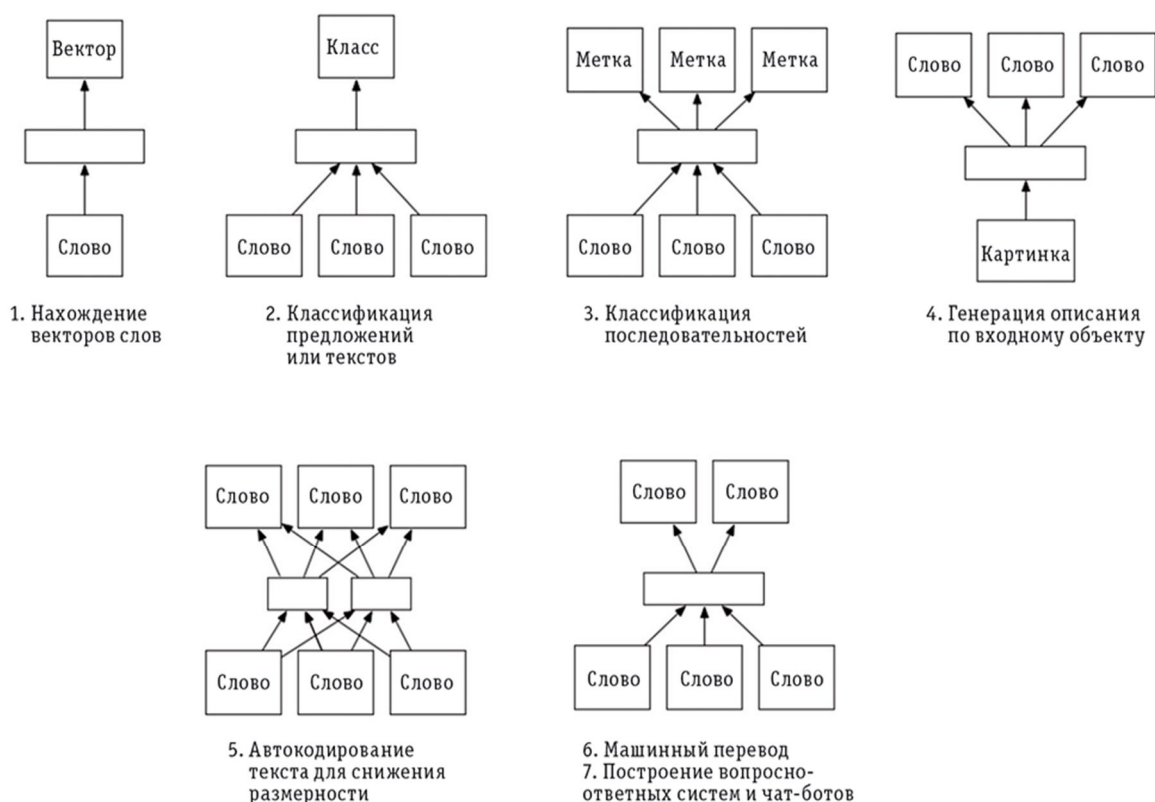


Рис. 1. Задачи по автоматической обработке текста, решаемые с помощью нейросетей

Fig. 1. Automatic text processing tasks solved with the help of neural networks

Начиная с 2013 г. технология построения векторов слов, согласно работе [3], используется при глубинном обучении нейронных сетей для установления семантической близости слов, простых логических выводов. В работе описываются две архитектуры, skip-gram и Continuous Bag of Words, объ-

единённые в общий термин word2vec. Как объясняется в [3], этот термин подразумевает функционал матрицы «слово-контекст» с весами коэффициента положительной попарной взаимной информации (PPMI). В настоящий момент word2vec относят скорее к полю дистрибутивной семантики, нежели к глу-

бинному обучению [4]. При этом векторы оказались востребованным инструментом для классификации текстов исходя из удобства представления смысла слова, подаваемого на вход глубинным нейросетям.

На сегодняшний день задача обработки текстов является одной из самых востребованных, поэтому попытки оптимизировать процесс и повысить качество генерируемого продукта инициируют новые подходы и методы. Так, для решения проблемы обработки нейронной сетью длинных предложений на входе был применён опыт использования свёрточных нейронных сетей для анализа изображения. На вход сети поступает предложение, в котором слова уже представлены векторами слов, созданными с помощью word2vec. Этот вид нейронных сетей хорошо зарекомендовал себя благодаря относительной простоте и способности к обучению с применением алгоритма обратного распространения ошибки. Для компьютерной лингвистики это эффективный и работающий метод обработки текстов, имеющий между тем свои ограничения, которые могут быть отмечены у всех ИИ систем. Речь идёт о механическом подходе к обработке языка.

Процесс генерации смысла текста нейронной сетью и человеком

Процесс восприятия текста человеком относительно хорошо исследован мировой и отечественной психологической, психолингвистической и лингви-

стической наукой [5 – 12]. Механизмы восприятия, порождения и понимания текста многократно исследованы автором данной статьи, результаты экспериментальных исследований отражены в публикациях [13, 14]. Согласно В.П. Белянину, восприятие речи человеком, «...включает в себя рецепцию слышимых или видимых элементов языка, установление их взаимосвязи и формирование представления об их значении» [15, с.154]. Понимание же есть расшифровка смысла, стоящего за воспринимаемым речевым сообщением. При этом смысл, лежащий за внешней формой, может варьироваться и зависеть от экстралингвистического контекста, от ситуации восприятия. «И во всех случаях языковые знаки являются предикатом к действительности, к разным ситуациям» [15, с. 155]. Исходя из указанной психолингвистической составляющей процесса понимания становится понятным существование феномена глубины понимания и разного качества понимания. Понимание человеком носит креативный и индивидуальный характер. Каждый субъект понимания видит в тексте определённую сугубо индивидуальную ситуацию, что-то своё, недоступное другому субъекту понимания того же объекта (текста или речевого сообщения). При этом поэтапное установление смысловых связей в совокупности рождает единое смысловое содержание. Его осмысление и даёт в итоге понимание либо непонимание (частичное понимание / недостаточно

глубокое понимание) письменного текста или речи.

Задача настоящей публикации – показать принципиальное отличие механизмов обработки текстовой информации человеком от подобного процесса, осуществляемого ИИ системой, поэтому не будем подробно останавливаться на уровнях понимания и его избирательности.

Принципиально иной подход в генерации смысла используется ИИ системой. Рассмотрим подробнее, как осуществляется семантическая обработка текста, представляющая собой анализ языковых единиц разного объёма. Это развитая нейросетями способность не просто опознавать слова, но устанавливать связи между словами в предложении и между предложениями в тексте. Для успешности семантической обработки используются следующие методы: токенизация, лемматизация, удаление стоп-слов, синтаксический анализ, семантический анализ [16].

Токенизация – это процесс выделения отдельных слов, токенов. Речь здесь не идёт о выделении денотатов, токен может быть словом любой самостоятельной части речи (кроме предлога).

Лемматизация предполагает приведение языковой единицы к начальной форме, например, к форме единственного числа у имён существительных или неопределённой форме у глагола.

Удаление стоп-слов предполагает удаление языковых единиц, не несущих большой смысловой нагрузки. Данная

операция позволяет нейронной сети сконцентрироваться на ключевой информации.

Синтаксический анализ предполагает восстановление синтаксической конструкции и предикативных связей согласно правилам построения предложения используемого естественного языка.

Семантический анализ представляет собой самый сложный этап работы, так как нейронная сеть «воссоздаёт» смысл предложений и текста с разной степенью успешности, принимая во внимание законы сочетаемости слов, ряды синонимов / антонимов, контекст и ассоциативные связи. Поправка о разной степени успешности подразумевает проблемы и ограничения, возникающие у нейронных сетей на настоящем этапе развития. Так, неспособность нейронных сетей к пониманию скрытого смысла является одним из самых больших ограничений при работе с художественными текстами наряду с «непониманием» иронии и юмора. Трудности корректного считывания контекста и полная невозможность установления экстралингвистического контекста делают семантическую обработку текста механическим препарированием текста, выполняемым с помощью довольно виртуозного жонглирования языковыми единицами. Впрочем, речь идёт о состоянии способностей нейронных сетей в настоящий момент времени. Прогноз к улучшению качества осуществляемой обработки текста вполне благоприятен, учитывая огромные ежегодные инвестиции в эту сферу.

В данной статье делается попытка проанализировать тексты, полученные в результате обработки нейронной сетью исходного художественного текста, и сравнить их со встречными текстами, полученными в процессе психолингвистического эксперимента на понимание текста.

Материалы и методы

Материалами исследования послужили встречные тексты, полученные в ходе психолингвистического эксперимента на понимание текста, проведённого среди студентов 1 и 2 курса специальностей «Правоохранительная деятельность», «Програмная инженерия», «Нанотехнологии и наносистемы», «Электроэнергетика и электротехника» (52 участника) и преподавателей кафедры иностранных языков ЮЗГУ (3-е участников), всего – 55 человек. Исходный текст, понимание которого проверялось, представляет собой образец короткого художественного рассказа, перевод с английского языка рассказа «Appointment with Love» («Свидание с любовью») автора S. I. Kishor (Сумалит Иш-Кишор) [17]. В результате первого этапа эксперимента участниками эксперимента было записано 55 встречных текстов. Для этапа эксперимента, где непосредственно сравнивались результаты понимания текста человеком и ИИ системой, из 55 встречных текстов, записанных человеком (студентами и преподавателями – испытуемыми), было отобрано 7.

Дополнительно с помощью ИИ системы было сгенерировано 3 текста. Использовалось 2 разных ресурса, предлагающих услуги по машинной обработке текста. Сгенерированные тексты представляли собой продукты разной степени сжатия. Ресурс 1 «выдал» тексты с уровнем сжатия 40% и 80%. Ресурс 2 обработал текст, сжав содержание на 40%. Целью такой обработки было, во-первых, проследить, как и насколько отличаются тексты, сгенерированные разными ресурсами; во-вторых – как и насколько отличаются тексты с разным уровнем сжатия информации.

Для проведения эксперимента на сравнение встречных текстов была привлечена группа из 10 человек, 7 студентов 4 курса факультета дополнительного образования ЮЗГУ «Переводчик в сфере профессиональной коммуникации» и трое экспертов, преподавателей кафедры иностранных языков ЮЗГУ (кандидаты филологических наук, доценты). Задание на проведение сопоставительного анализа встречных текстов (далее экспериментальные тексты не будут разделяться на встречные, т. е. те, что были записаны студентами как результат понимания, и тексты – результаты машинной обработки ИИ системой; далее все 10 текстов будут называться встречными для упрощения идентификации) является трудоёмкой задачей, требующей определённых навыков обработки текстового материала. Для решения проблемы низкого экспертного уровня привлечённых студен-

тов были задействованы студенты 4 курса, обучающиеся по программе подготовки переводчиков, имеющие навыки работы с текстом и характеризующиеся хорошей языковой подготовкой. Перед экспериментальной группой (имеются в виду все 10 участников) не стояло задачи проведения сопоставительного анализа научными методами (в отличие от автора статьи, которая для анализа текстов использовала инструментарий лингвистики и психолингвистики). Вопросы, на которые следовало ответить, были подготовлены для «наивного пользователя», человека, умеющего читать и понимать прочитанное. Экспертная группа преподавателей (трое доцентов кафедры иностранных языков ЮЗГУ) была привлечена в качестве контрольной силы, выполняющей задание на понимание текста эталонным образом.

На начальном этапе все участники эксперимента ознакомились с содержанием рассказа «Свидание с любовью», прочитав текст на русском языке. Далее испытуемые оценивали встречные тексты различной природы и оценивали каждый текст по четырём критериям. Материалами эксперимента выступили 10 встречных текстов, результатов понимания исходного текста: 7 встречных текстов студентов и преподавателей и 3 результата обработки исходного текста ИИ системой. Приведём 4 примера использованных текстов. Тексты 1, 10 представляют собой пример обработки текста ИИ системой со сжатием 40 и 80%. Тексты 3, 7 являются встречными

текстами, результатом понимания студентом (3) и преподавателем (7). Исходный текст здесь не приводится, ссылка на него содержится в тексте данной статьи выше.

1. Лейтенант авиации, стоя на станции Гранд Централ, ожидает встречи с женщиной, чьи поддерживающие письма сопровождали его военные подвиги. Напряженность перед встречей охватывает его, несмотря на обычное чувство контроля. Вспоминая самый тяжелый воздушный бой, лейтенант вспоминает слова женщины из ее письма, которые придали ему сил и уверенности. Стремясь услышать ее настоящий голос, он внимательно наблюдает за потоком людей на станции, надеясь на скорое приближение момента встречи.

Пилот Блэндфорд обнаруживает книгу "Время страстей человеческих", на полях которой написаны размышления Холлис Мейнелл. Он находит ее адрес, пишет письмо, и начинается переписка. В течение тринадцати месяцев Холлис отвечает на его письма, даже когда они задерживаются. Блэндфорд убежден, что любит ее, и она в ответ. Однако она отказывается отправлять свою фотографию, утверждая, что внешность не имеет значения. Она предлагает встретиться лично в Нью-Йорке, чтобы решить судьбу их отношений после встречи.

Лейтенант Блэндфорд видит молодую женщину, которая привлекает его внимание своей красотой. Он шага-

ет к ней, но затем замечает Холлис Мейнелл, стоящую позади. Это женщина за сорок, но он чувствует к ней близость по духу. Он решает пригласить ее на ужин, испытывая горечь разочарования после ухода молодой женщины. Однако оказывается, что молодая красавица просила прикрепить розу к пальто Холлис и сообщить, что она ждет Блэндфорда в ресторане через дорогу, в рамках какого-то испытания. В итоге, Холлис соглашается помочь, и лейтенант отправляется на свидание с молодой женщиной.

10. Молодой лейтенант авиации пришел на вокзал за шесть минут до встречи с женщиной, с которой переписывался последние тринадцать месяцев, но ни разу не видел. Его сердце билось от волнения. Он встал возле справочной, чтобы встретить ее. Лейтенант вспомнил самый тяжелый воздушный бой, когда ее письмо с цитатой из псалма придало ему сил. Теперь он впервые услышит ее голос. За шесть минут до встречи мимо прошла девушка с цветком, но это был не тот цветок, который они условились.

Холлис Мейнелл отказывалась прислать свою фотографию, чтобы проверить искренность чувств. Лейтенант нашел ее адрес на книге "Время страстей человеческих", написал письмо и началась их переписка. Теперь он верил, что любит ее. За минуту до встречи к нему подошла красивая женщина, но позади стояла Холлис -

полная женщина за сорок в потрепанной одежде с розой на пальто.

Лейтенант колебался, но увидев сочувствие на ее лице, решился. Он поприветствовал ее, но она передала, что розу ей дала девушка в зеленом пальто, которая ждет его в ресторане напротив. Это было испытание от Холлис.

3. Однажды в Нью-Йорке молодой лейтенант авиации, только что вернувшийся с войны, стоял на станции, и пристально смотрел на часы. Как выяснилось он ждал женщину, которую ни разу не видел, но очень активно общался с ней письмами. Познакомился он с ней совершенно случайно, взяв книгу в библиотеке он заметил на полях приписки оставленные женщиной, на обложке книги было написано её имя. Он нашёл её номер по телефонному справочнику, и так началась их долгая переписка.

И вот время близится к свиданию. Они договорились, что у него в руке будет та самая книга, а у неё на плече роза. Тут мимо него прошла высокая, грациозная, красивая девушка, а за ней стояла полная женщина с розой на плече. Тут лейтенанта начало разрывать, он не знал, что ему делать, не так он всё это представлял. Ему хотелось побежать за той девушкой. Но подумав, он понял, что так поступать нельзя, и что возможно вместо любви выйдет прекрасная дружба. Он подошёл к женщине пригласил её на ужин. Но вдруг она сказала ему, что та прекрасная девушка дала мне эту розу, и сказа-

ла, что если вы пригласите меня на ужин, то она будет ждать Вас в кафе через дорогу. Это была проверка на настоящую любовь.

7. На вокзале Гранд Централ суета. Столько людей, а её нет. А будет ли она? Может. он всё придумал? Нет, невозможно такое придумать. Она писала на полях книги не для того, чтобы понравиться... Да и книга-то, книга... Не Золушка и не книга рецептов... Бремя страстей человеческих... Как женщина могла так точно видеть душу мужчины? Её пометки стали откровением, пропустить такой шанс встретить близкого тебе человека – значит быть идиотом ... А письма, её письма! Они стали его щитом, его бронёй там, в небе... Псалом 90, благословенные слова... Она сама стала его благословением. И вот. теперь он её увидит. Как жаль, что она отказалась прислать свою фотографию! У ангела должно быть лицо! Красивое лицо! Молодое лицо! Алая роза не видна нигде... Стоп, ах нет, это горошек, да и девочка юная совсем, не 29. Но... хороша. Это невыносимо, хочется курить. Она, да, точно она... Как хороша! Волосы, глаза, сама весна... Она, точно она! Нет... Или всё же? Хочешь что-то, солдатик? Ещё бы! Не уходи! Алая роза, нет сомнения... Алая роза на пиджаке. На пиджаке женщины... Полная, измученная что-ли. Как же так? Ну как же так? Живой в помощи Вышняго... Решено. Здравствуйте, Вы Холлис Мей-

нелл? Будем друзьями. Нет, не Холлис? Ах, чертовка... В ресторане напротив, значит, ждёт... Спасибо, дамочка, спасибо мамочка, здоровья твоим двум парням!

Результаты и их обсуждение

Для анализа понимания текста хорошо себя зарекомендовал денотатный анализ текста, разработанный А.И. Новиковым [18]. Суть метода заключается в качественном и количественном анализе установленных в процессе понимания денотатов и межденотатных связей, которые фиксируются либо с помощью графа, либо в таблице. Автором данной статьи денотатный анализ применялся в работе [13]. Приведём пример текста и денотатного графа, воссоздающего смысловую структуру текста. Отметим сразу, что текст, приводимый в качестве примера, был составлен для эксперимента с детьми дошкольного возраста, он примитивен с точки зрения простоты семантических и синтаксических связей. Тем не менее, он наглядно иллюстрирует, как можно проверить понимание, учитывая установленные испытуемым межденотатные связи.

Текст III

Айболит сидит за столом и выписывает рецепт. На его столе стоит телефон. Перед Айболитом на стульчике сидит мышка с перевязанной лапкой. За спиной Айболита стоит плачущая лиса. На кушетке лежит пёс с завязанным носом. Подмышкой у пса –

градусник. Около шкафа с лекарствами стоят корова и медведь, у них болит горло. Медведь держит в лапах банку с витаминами.

Пример построения графа простого нарративного текста представлен на рис. 2.

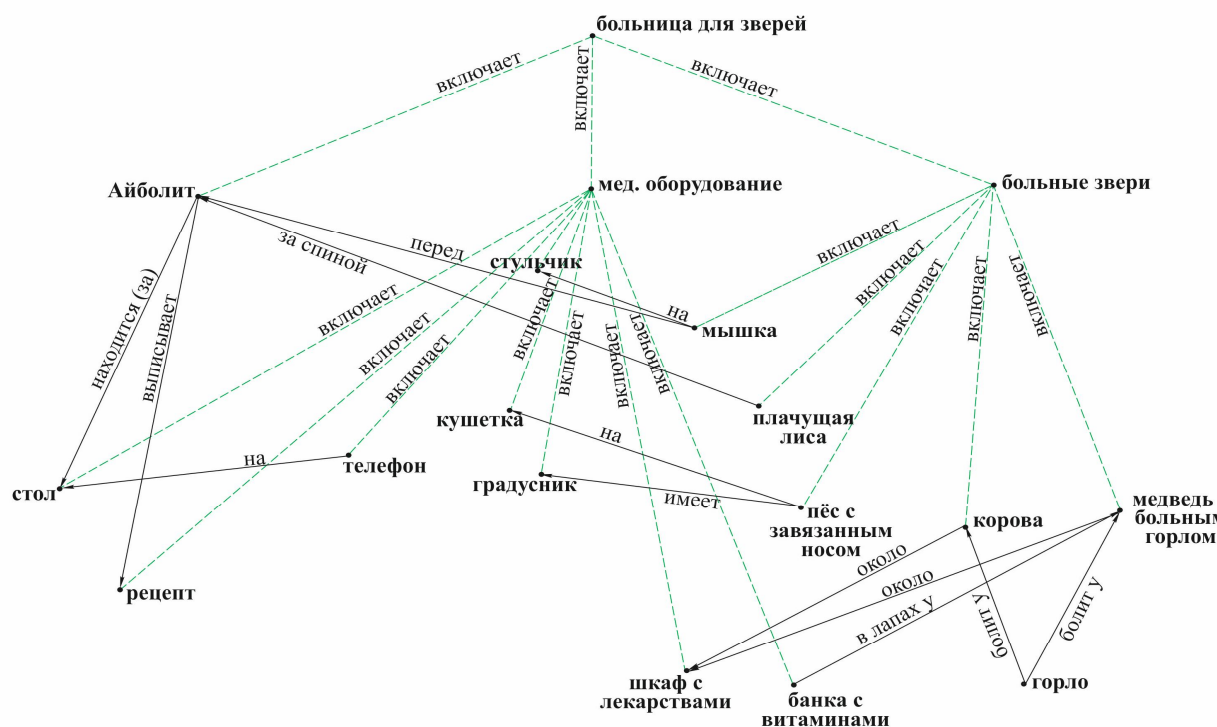


Рис. 2. Эталонный граф денотатной структуры текста III

Fig. 2. Reference graph of the denotational structure of text III

Этот метод может быть отчасти валиден при анализе текстов, сгенерированных ИИ системой. В эксперименте, который описывается в настоящей статье, в текстах 1, 10 успешно воссозданы как денотаты, так и связи между ними. Очевидно, что с помощью семантического анализа ИИ прекрасно устанавливает в тексте денотаты и межденотатные связи. Но глубинный, или скрытый, смысл (в случае нашего экспериментального текста это частично скрытый смысл), может остаться «непонятым».

Об этом говорит фраза (Текст 1): «В итоге, Холлис соглашается помочь, и лейтенант отправляется на свидание с молодой женщиной». ИИ система идентифицирует женщину, согласившуюся помочь, как молодую женщину. Но по замыслу автора рассказа Холлис и молодая женщина – это одно лицо, а женщина, согласившаяся помочь – это полноватая женщина за сорок с сидящими волосами. Этот факт не установлен ИИ системой, так как вывод о том, какая именно женщина является на самом де-

ле главной героиней по имени Холлис Мейнелл сложно сделать с помощью семантического анализа, используемого нейронными сетями.

Рассматривая надёжность денотатного анализа как метода исследования, следует также отметить, что он не вполне показателен в случае креативного подхода к созданию встречного текста. Это вариант текста 7. Преподаватель-участница эксперимента передала содержание рассказа от лица лейтенанта. Встречный текст 7 прекрасно воссоздаёт душевное состояние и мысли лейтенанта Блэнфорда, но не конструирует ситуацию, пропуская много деталей, и количество установленных денотатных связей гораздо меньше по сравнению с текстами 1, 10.

Обратимся непосредственно к эксперименту на сравнение встречных текстов. Перед началом экспериментальной сессии участникам объяснили значение понятий «полнота» и «точность» передачи содержания текста (первый и второй вопросы экспериментального задания). Полнота содержания предполагает упоминание максимального количества смысловых связей и отношений. Точность передачи содержания предполагает восстановление количества смысловых связей, достаточного для передачи содержания с сохранением ведущих смысловых линий и основного заложенного автором смысла. Концепция задания согласуется с теорией текста А.И. Новикова (см., напр. [18]), теорией понимания Н.И. Жинкина

(см., напр. [19]) и целой школой их последователей, к которым относит себя и автор статьи. Третий вопрос из четырёх предложенных (Можно ли по встречному тексту определить, понял ли автор встречного текста, какая из женщин – Х.М.?) может показаться чрезмерным исходя из очевидности положительного ответа. Сразу оговоримся, что, во-первых, при анализе текстов, сгенерированных ИИ системой, нельзя полагаться на веру и знания о понимании текстов человеком. Как было показано ранее в данной публикации, ИИ системы обрабатывают тексты механически, минуя стадию воссоздания ситуации, стадию, которая является не просто необходимой, но ключевой при понимании текста и которая делает возможным проникновение в глубинные смысловые структуры [20]. Интрига, «вложенная» С. Иш-Кишором, была с лёгкостью понята почти всеми участниками эксперимента (речь идёт о первом этапе эксперимента на понимание с написанием встречных текстов, в котором приняло участие 52 студента. В настоящей работе мы выбрали 7 встречных текстов из 52 имеющихся). Что касается текстов, сгенерированных ИИ системой, из трёх имеющихся текстов интрига была явно разгадана в одном, в остальных двух «понимание» интриги не носило очевидного характера. Четвёртый вопрос на установление авторства имел целью удовлетворение исследовательского интереса автора, вызванного желанием понять, имеют ли современные студен-

ты и преподаватели представление о текстах, сгенерированных ИИ, и смогут ли они отличить встречные тексты разной природы. Результаты экспериментальной сессии представлены в табл. 1. Тексты 1, 4, 10 сгенерированы ИИ си-

стемой, остальные написаны человеком (тексты 2, 3, 6, 8 – студентами, 5, 7, 9 – преподавателями). Мы предложили оценить ответ на вопрос по шкале от 1 до 10 и вычислили средний результат (табл. 1).

Таблица 1. Анализ встречных текстов, созданных человеком и сгенерированных ИИ системой

Table 1. Analysis of the counter texts created by a human and those generated by an AI system

№ текста / text №	Насколько полно передано содержание текста? / Text content completeness	Насколько точно передано содержание текста? / Text content fidelity	Понял ли автор встречного текста, какая из женщин - Х.М.?/ Has the counter text author understood which of the women is H. M.?	Авторство встречного текста – человек или ИИ система? / Is the counter text author – AI or a Human
текст 1	8,7	8,4	да – 1	человек – 5
			нет – 8	
			затрудняюсь ответить – 1	ИИ – 5
текст 2	7,2	6,3	да – 10	человек – 8
			нет – 0	
			затрудняюсь ответить – 0	ИИ – 2
текст 3	6,9	8,1	да – 10	человек – 4
			нет – 0	
			затрудняюсь ответить – 0	ИИ – 6
текст 4	4,9	6,1	да – 0	человек – 2
			нет – 7	
			затрудняюсь ответить – 3	ИИ – 8

№ текста / text №	Насколько полно передано содержание текста? / Text content completeness	Насколько точно передано содержание текста? / Text content fidelity	Понял ли автор встречного текста, какая из женщин - Х.М.? / Has the counter text author understood which of the women is H. M.?	Авторство встречного текста – человек или ИИ система? / Is the counter text author – AI or a Human
текст 5	7,4	9,2	да – 10	человек – 9
			нет – 0	
			затрудняюсь ответить – 0	ИИ – 1
текст 6	7,9	6,9	да – 6	человек – 8
			нет – 0	
			затрудняюсь ответить – 4	ИИ – 2
текст 7	5,1	9,6	да – 10	человек – 10
			нет – 0	
			затрудняюсь ответить – 0	ИИ – 0
текст 8	4,1	6,3	да – 9	человек – 7
			нет – 1	
			затрудняюсь ответить – 0	ИИ – 3
текст 9	9,8	9,9	да – 10	человек – 9
			нет – 0	
			затрудняюсь ответить – 0	ИИ – 1
текст 10	7,7	6,4	да – 9	человек – 7
			нет – 0	
			затрудняюсь ответить – 1	ИИ – 3

Очень показательными представляются результаты анализа текста 1 (текста, сгенерированного ИИ системой со степенью сжатия 40%). Оценки полноты и точности воссоздания смыслового содержания высоки – 8,7 и 8,4 соответственно. При этом интрига автора не раскрыта, женщина-друг по переписке не установлена правильно. Это отметили 8 участников эксперимента из 10. 1 затруднился с ответом, 1 ответил неверно. Оpoznать текст, написанный нейронной сетью, смогли только 5 из 10. Можно с полной уверенностью констатировать, что на фоне эффективной семантической обработки текста ИИ система не справляется с задачей установления глубинных смысловых структур и скрытого смысла.

Определить авторство встречного текста для участников эксперимента оказалось трудновыполнимой задачей. Испытуемым намеренно не сообщалось, сколько текстов написано нейронной сетью. Как показывают результаты, в сознании наивных пользователей языка и пользователей-профессионалов не сформировано чётких критериев, по которым с точностью опознаётся текст, сгенерированный ИИ системой. Так, встречные тексты, написанные преподавателями, характеризующиеся нормативным и корректным использованием языка, правильным построением предложений, отсутствием речевых, пунктуационных и орфографических ошибок, набрали 28 голосов из 30 в пользу написания человеком. То есть среднестатистический пользователь языка не очень

высокого мнения о качестве текстов, генерируемых нейронной сетью.

Креативный подход к написанию встречного текста (текст 7) не был критичен при оценке этого текста – пересказ от лица лейтенанта не снизил точности воссозданного смыслового содержания (9,6), полнота содержания при этом составила всего 5,1. Авторство текста 7 не вызвало ни у кого сомнений, все участники эксперимента опознали в авторе человека.

Выводы

Сопоставление встречных текстов, созданных в результате понимания текста человеком и в результате обработки текста на естественном языке нейронной сетью, позволяет сделать ряд выводов. Современные методы семантической обработки текста ИИ системой делают возможным получение на выходе полноценных текстовых произведений, созданных с учётом правил и норм естественного языка. Полнота смыслового содержания сгенерированного текста не зависит от структуры исходного текста. ИИ системы успешно воссоздают денотатную структуру текста и реконструируют синтаксическую. Доступ к большим базам данных позволяет обучать нейронную сеть на больших корпусах текстов, что отражается на повышении точности и вариативности используемых лексических единиц и конструктов. Точность передачи смыслового содержания текста варьируется. Она зависит, во-первых, от степени сжатия текста – чем она выше, тем меньше может быть точность, т.к. нейронная сеть

не в состоянии классифицировать денотатные связи на предмет значимости для основного смысла. Во-вторых, степень точности передачи смыслового содержания в немалой степени определяется успешностью / неуспешностью понимания глубинного скрытого смысла. Понимание скрытого смысла тесно связано с пониманием лингвистического и экстралингвистического контекста. Способность опознать модель ситуации, воссоздаваемую в исходном тексте, является залогом понимания скрытого смысла. ИИ система может довольно корректно и точно воссоздать поверхностную денотатную

структуру текста, но скрытые детали, меняющие в корне всё понимание текста, могут оказаться упущенными. На данном этапе развития ИИ системы не способны конструировать модель ситуации. Механизмы генерирования смысла текста ИИ системой путём механической семантической обработки, в корне отличающиеся от механизмов понимания текста человеком, чётко определяют направление развития и сферу применения компьютерных систем обработки естественного языка на ближайшую перспективу.

Список литературы

1. Горбачевская Е.Н., Краснов С.С. История развития нейронных сетей. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/istoriya-razvitiya-neyronnyh-setey>.
2. Mikolov T. et. al. Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space, arxiv.org. URL: <http://arxiv.org/pdf/1301.3781.pdf>.
3. Бобырь М. В. Обучение нейро-нечетких систем. М.: АРГАМАК-МЕДИА, 2017. 240 с.
4. Велихов П.Е. Машинное обучение для понимания естественного языка // Открытые Системы. СУБД. 2016. № 1. С.18–21. URL: <https://www.osp.ru/os/2016/01/13048649>.
5. Ананьев Б.Г. Психология чувственного познания. М.: Изд-во Акад. пед. наук РСФСР, 1960. 486 с
6. Блонский П.П. Память и мышление. М.: URSS: ЛЕНАНД, 2017. 204 с.
7. Бородай С. Ю. Язык и познание: Введение в пострелятивизм. М., 2019. 800 с.
8. Выготский Л. С. Мышление и речь. СПб.: Питер, 2019. 431 с.
9. Залевская А.А. Введение в психолингвистику. М.: РГГУ, 2007. 559 с.
10. Соколов А. Н. Внутренняя речь и мышление. М.: URSS, 2007. 248 с.
11. Мягкова Е.Ю. Навык чтения и проблемы понимания текста // Языковое бытие человека и этноса. Вып. 20. Материалы XV Березинских чтений. М.: ИНИОН РАН, 2018. С. 83–95.
12. Мягкова Е. Ю. Язык - эмоции - сознание - культура в теории А. Дамасио // Вопросы психолингвистики. 2022. № 4(54). С. 72-85. DOI 10.30982/2077-5911-2022-54-4-72-85.
13. Кружилина Т.В. Понимание текста в онтогенезе. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2016. 152 с.

14. Кружилина Т. В. Факторы, определяющие особенности речевого развития у детей // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 4–1(43). С. 216–219.
15. Белянин В.П. Психолингвистика. М.: Флинта, 2013. 416 с.
16. Manning Ch. Computational linguistics and deep learning. Computational Linguistics, 2016. URL: http://www.mitpressjournals.org/doi/full/10.1162/COLI_a_00239#.WQH8MBhh2qA.
17. Иш- Кишор С. Свидание с любовью. URL: http://sacralis.com/biblioteka/proza/2605-svidanie_s_lubovju.html?ysclid=ls0tcuhl7u170031708.
18. Новиков А.И. Семантика текста и ее формализация. М.: Наука, 1983. 215 с
19. Жинкин Н.И. О кодовых переходах во внутренней речи. М.: Культура, Акад. Проект, 2006. С. 251– 263.
20. Звягинцева В.В. Обращение в английском семейном дискурсе (экспериментальное исследование) // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Лингвистика и педагогика. 2012. № 2. С. 48–51.

References

1. Gorbachevskaya E.N., Krasnov S.S. *Istoriya razvitiya neyronnyh setej* [History of Neural Networks Development] [Elektronnyj resurs]. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/istoriya-razvitiya-neyronnyh-setey>.
2. Mikolov T. et. al. *Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space*, arxiv.org. URL: <http://arxiv.org/pdf/1301.3781.pdf> (data obrashcheniya: 24.01.2024).
3. Bobyr' M. V. *Obuchenie nejro-nechetkih sistem* [Training of Neuro-Fuzzy Systems]. Moscow, ARGAMAK-MEDIA, 2017. 240 p.
4. Velihov P.E. Mashinnoe obuchenie dlya ponimaniya estestvennogo yazyka [Machine Learning for Natural Language Understanding]. *Otkrytye Sistemy.SUBD*, 2016, no. 1, pp.18–21. Available at: <https://www.osp.ru/os/2016/01/13048649>.
5. Anan'ev B.G. *Psihologiya chuvstvennogo poznaniya* [Psychology of sensual cognition]. Moscow, 1960. 486 p.
6. Blonskij P.P. *Pamyat' i myshlenie* [Memory and cognition]. Moscow, URSS: LENAND Publ., 2017. 204 p.
7. Borodaj S. Yu. *Yazyk i poznanie: Vvedenie v postrelyativizm* [Language and cognition: Introduction to postrelativism]. Moscow, 2019. 800 p.
8. Vygotskij L. S. *Myshlenie i rech'* [Cognition and speech]. Saint Petersburg: Piter Publ., 2019. 431 p.
9. Zalevskaya A.A. *Vvedenie v psiolingvistiku* [Introduction to Psycholinguistics]. Moscow, RGGU Publ., 2007. 559 p.
10. Sokolov A. N. *Vnutrennyaya rech' i myshlenie* [Inner speech and cognition]. Moscow, URSS Publ., 2007. 248 p.

11. Myagkova E.YU. Navyk chteniya i problemy ponimaniya teksta [Reading skill and text understanding]. *Yazykovoe bytie cheloveka i etnosa. Vyp. 20. Materialy XV Berezinskih chtenij.* = *The linguistic existence of a person and an ethnic group. Issue 20. Materials of the XV Berezinsky readings.* Moscow, INION RAN Publ., 2018, pp. 83–95.
12. Myagkova E. Yu. Yazyk - emocii - soznanie - kul'tura v teorii A. Damasio [Language-emotion-recognition-culture in the theory of A. Damasio]. *Voprosy psiholingvistiki* = *Questions of Psycholinguistics*, 2022, no. 4(54), pp. 72-85. DOI 10.30982/2077-5911-2022-54-4-72-85.
13. Kruzhilina T.V. *Ponimanie teksta v ontogeneze* [Text Understanding in Ontogenesis]. Kursk, Yugo-Zapadnyj gosudarstvennyj universitet Publ., 2016. 152 p.
14. Kruzhilina T. V. Faktory, opredelyayushchie osobennosti rechevogo razvitiya u detej [Factors that Determine the Characteristics of Speech Development in Children]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 4–1(43), pp. 216–219.
15. Belyanin V.P. *Psiholingvistika* [Psycholinguistics]. Moscow, Flinta Publ., 2013. 416 p.
16. Manning Ch. Computational linguistics and deep learning. *Computational Linguistics*, 2016. Available at: http://www.mitpressjournals.org/doi/full/10.1162/COLI_a_00239#.WQH8MBhh2qA
17. Ish- Kishor S. *Svidanie s lyubov'yu* [Appointment with Love]. Available at: http://sacralis.com/biblioteka/proza/2605-svidanie_s_lubovju.html?ysclid=ls0tcuh17u170031708
18. Novikov N.A. *Semantika teksta i ee formalizaciya* [Text Semantics and its Formalization]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 215 p.
19. ZHinkin N.I. *O kodovykh perekhodakh vo vnutrennej rechi* [About code transitions in internal speech]. Moscow, Kul'tura Publ., Akad. Proekt, 2006, pp. 251– 263.
20. Zvyaginceva V.V. Obrashchenie v anglijskom semejnom diskurse (eksperimental'noe issledovanie) [Address in English family discourse (experimental study)]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Lingvistika i pedagogika* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Linguistics and Pedagogics*, 2012, no. 2, pp. 48–51.

Информация об авторе / Information about the Author

Кружилина Татьяна Владиславовна, кандидат филологических наук, доцент, доцент кафедры иностранных языков, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: t.kruzhilina@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5714-146X>, SPIN-код: 8142-0010, Researcher ID: 738898

Tatiana V. Kruzhilina, Cand. of Sci. (Phylologic), Associate Professor, Associate Professor of the Foreign Languages Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: t.kruzhilina@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5714-146X>, SPIN-код: 8142-0010, Researcher ID: 738898

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-4-117-131>

Методика выбора управляющих решений при оптимизации технологических режимов переработки железорудного сырья с использованием электромагнитных воздействий

А.В. Ананьева ¹ ✉

¹ Ассоциация субъектов инновационной деятельности в горной отрасли "Инновационные горные технологии"
Ленинский пр-т, д. 4, стр. 1а, г. Москва 119991, Российская Федерация

✉ e-mail: plotnikovaav@inbox.ru

Резюме

Цель исследования. В работе рассмотрен процесс селективного предразрушения межфазовых границ в железных рудах при использовании магнитно-импульсной обработки.

Методы. При анализе напряженно-деформированного состояния и вязкого разрушения выявлено относительное сходство критериев разрушения в основных минералах железных руд за счет магнитно-стрикционного деформирования зерен магнетита. Установлено, что прочность и вязкость разрушения магнетита превышает аналогичные свойства кальцитов, входящих в состав скарных железных руд, прочность и вязкость разрушения кварца превышает аналогичные свойства магнетита. Выявлено различие в характере разрушения скарных руд и железистых кварцитов.

Результаты. Сформулирован критерий оценки степени разупрочнения межфазовых границ в железных рудах за счет магнитно-импульсного воздействия на основе вероятностного подхода. Произведена теоретическая оценка степени селективного разупрочнения железных руд при магнитно-импульсной обработке с учетом прочностных и магнитно-стрикционных свойств магнетита.

Приведены результаты экспериментов наноиндентирования межфазовых границ до и после магнитно-импульсной обработки.

Заключение. Путем анализа длин развивающихся микротрещин под воздействием наноиндентера выявлена возможность снижения вязкости разрушения после магнитно-импульсной обработки железной руды.

Ключевые слова: управление технологическим процессом; недостаток исходной информации; физико-технологические закономерности; обогащение полезных ископаемых; измельчение; железные руды; магнитно-импульсная обработка; критерии селективного разупрочнения.

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

Для цитирования: Ананьева А.В. Методика выбора управляющих решений при оптимизации технологических режимов переработки железорудного сырья с использованием электромагнитных воздействий // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(4): 117-131. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-4-117-131>.

Поступила в редакцию 03.11.2023

Подписана в печать 30.11.2023

Опубликована 21.12.2023

Technique for Selecting Control Decisions in Optimizing Technological Modes of Processing Iron Ore Raw Materials Using Electromagnetic Influences

Anna V. Ananeva¹ ✉

¹ Association of subjects of innovative activity in the mining industry "Innovative mining technologies"
Leninsky ave., 4, building 1A, Moscow 119991, Russian Federation

✉ e-mail: plotnikovaav@inbox.ru

Abstract

Purpose of research. The paper considers the process of selective pre-destruction of interphase boundaries in iron ores by using magnetic-pulse treatment. When analyzing the stress-strain state and viscous fracture, the relative similarity of the fracture criteria in the main minerals of iron ores due to magnetically-striction deformation of magnetite grains.

Methods. It has been established that the strength and toughness of the destruction of magnetite exceeds the analogous properties of calcite in the composition of skarn iron ores, the strength and toughness of quartz fracture exceeds the analogous properties of magnetite. A difference in the character of the destruction of skarn ores and ferruginous quartzites. The criterion for estimating the degree of softening of interphase boundaries in iron ores due to the magnetic-impulse action based on the probabilistic approach is formulated.

Results. A theoretical estimate is made of the degree of selective softening of iron ores under magnetic-pulse treatment, taking into account the strength and magnetostriction properties of magnetite. The results of experiments on nanoindentation of interphase boundaries before and after magnetic-pulse processing are presented.

Conclusion. By analyzing the lengths of developing microcracks under the influence of a nanoindenter, the possibility of reducing the fracture toughness after a magnetic pulse treatment of iron ore

Keywords: technological process control; lack of initial information; physical and technological laws; mineral processing; barrel grinding; iron ores; magnetic pulse processing; criteria of selective softening.

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

For citation: Ananeva A. V. Technique for Selecting Control Decisions in Optimizing Technological Modes of Processing Iron Ore Raw Materials Using Electromagnetic Influences. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(4): 117-131 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-4-117-131>.

Received 03.11.2023

Accepted 30.11.2023

Published 21.12.2023

Введение

Развитие современных технологий переработки железорудного сырья ори-

ентировано на повышение эффективности. Очевидно, что весь технологический процесс подготовки руды к обогащению настроен на то, чтобы добить-

ся максимального извлечения полезных элементов и минимизировать потери полезного компонента [1, 2]. Это одно из ключевых условий для устойчивого развития горного производства и рационального использования природных ресурсов [3, 4]. Для оптимальной добычи полезных элементов необходимо правильно смешать рудные материалы и провести их через все этапы дробления и помола до получения частиц требуемого размера. Затем можно извлечь эти элементы с помощью наиболее подходящей для этого физической или химической технологии [5, 6, 7].

Важной частью обогащения ископаемых является разрушение границы фаз и получение отдельных частиц компонентов для их дальнейшего разделения по физическим и химическим характеристикам [8, 9, 10]. В случае сложных, упорных руд или промежуточных продуктов рациональными могут оказаться немеханические методики энергетического воздействия [11, 12].

С другой стороны, при одинаковой степени измельчения, минералы рудных и нерудных труднообогатимых пород обычно показывают меньшую степень раскрытия, чем средне- и легкообогатимые руды, и это полностью физически и химически объяснимо [13]. Для труднообогатимых железных руд следует отметить более низкое количество свободных рудных зерен и повышенное количество вкрапленников [6, 14].

Влияние минералого-петрографических факторов на обогатимость прояв-

ляется в характере структурных особенностей и корреляционных связей параметров вещественного состава и строения руд с показателями обогащения [15, 16, 17] и является основой для создания новых, более эффективных методов.

Для эффективного управления технологическим процессом в современных условиях создаются «цифровые подсказчики», которые вырабатывают экспертные решения на основе анализа информационных потоков, собираемых системой датчиков (сенсоров), а методы управления становятся комплексными и содержат новые управляемые параметры исходного сырья как напрямую, так и через использование специального оборудования.

Как правило, эти решения являются вероятностными из-за отсутствия (или недостаточности) исходной информации. Для повышения точности подаваемых в систему управления данных предлагается дополнить недостающую информацию использованием физико-технологических зависимостей, связывающих различные факторы и результаты технологического процесса.

В настоящей статье рассматривается анализ потенциальных физико-технологических зависимостей.

Материалы и методы

Объектом исследования является процесс рудоподготовки с использованием предварительной магнитно-импульсной обработки (МИО). Методы

исследования базируются на теоретическом сравнении параметров разрушения, взятых из известных силовых моделей, включая энергетические параметры разрушения из теории Баландина и модели вязкого разрушения по Ирвину. Экспериментальные исследования основываются на анализе процесса трещинообразования методом наноиндетирования.

Исходные предпосылки
для построения методики

Очевидно, что в настоящее время больший упор делается на использование уже существующих физических и химических законов обработки (переработки) железорудного сырья, и открыть что-то новое практически невозможно, однако некоторая комбинация уже существующих методов позволяет получить более эффективные решения. Приводимая в настоящем разделе информация необходима для составления общей методики.

Разупрочняющий эффект магнитопульсовой обработки (МИО) обусловлен рядом физических процессов, включая магнитострикцию магнетитовых зерен, обратный пьезоэлектрический эффект в нерудной фазе (в случае железистых кварцитов), движение заряженных дислокаций и др. [18, 19, 20].

МИО проводится как промежуточный этап подготовки руды к механическому измельчению. Трещинообразование под воздействием механических нагрузок на этапах дробления и измельчения во многом зависит от упругопла-

стических свойств руды. Селективность разрушения определяется степенью снижения прочности границ срастания минеральной и неминеральной фаз. Таким образом, большое значение имеют контактные напряжения, возникающие в результате МИО на границах между рудной и нерудной фазами.

Критерий разрушения по теории Баландина [21] имеет вид:

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3 - (\sigma_{сж} - \sigma_p)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_p\sigma_{сж}, \quad (1)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения;

$\sigma_p, \sigma_{сж}$ – пределы прочности на растяжение и сжатие.

При магнитострикционном объемном изменении формы магнетитовых зерен на границе раздела фаз создаются сжимающие радиальные контактные напряжения $\sigma_{конт.}$ и тангенциальные растягивающие напряжения, величина которых вдвое меньше контактных напряжений.

Тогда критерий разрушения по теории Баландина [21] примет вид:

$$\sigma_{конт} > \frac{2}{3} \sqrt{\sigma_{сж}\sigma_p}, \quad (2)$$

где $\sigma_{конт}$ – величина контактных напряжений на границе между рудной и нерудной фазами, вызванная магнитострикционным изменением формы зерен.

Если условие (2) выполнено, то происходит полное разрушение на границе фаз. Если условие не выполняется, возможно частичное снижение прочности границ. На рис. 1 представлены значения критических контактных напряжений для основных минералов в железных рудах.

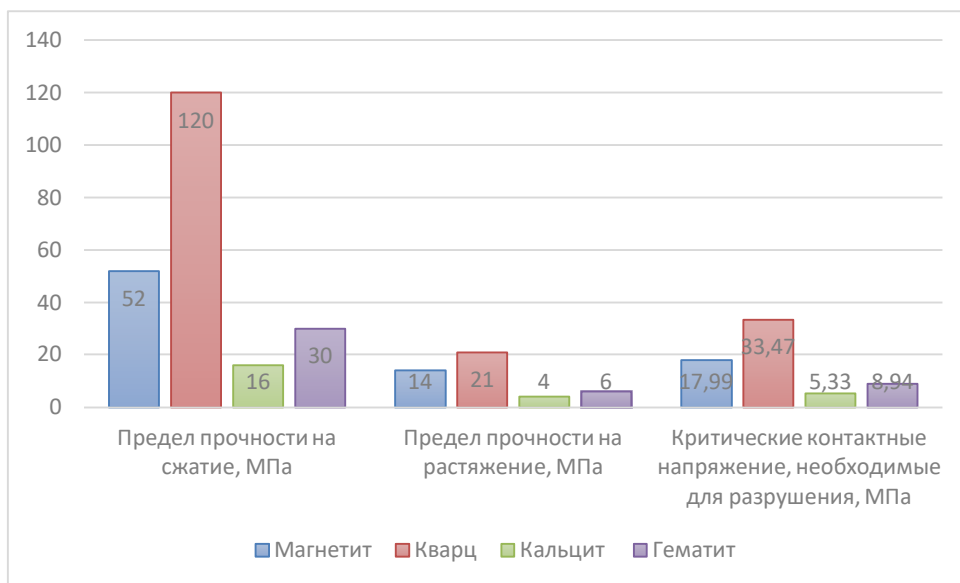


Рис. 1. Критические контактные напряжения для различных минералов

Fig. 1. The critical contact stress for various minerals

Следует отметить, что прочностные свойства горных пород и минералов определяют условия разрушения массива, однако они не полностью характеризуют такие технологические характеристики, как, к примеру, измельчаемость. Это объясняется тем, что под воздействием на массив критическими нагрузками формируется макротрещина, длина которой значительно превышает характерный размер минерального зерна [22]. В процессах дробления и измельчения происходят множественные акты разрушения. Таким образом, процесс дезинтеграции определяется энергетическими затратами на новообразованную поверхность. Так, например, используются: критерий Риттингера, характеризующий величину энергетических затрат на разрушение прямо пропорциональную вновь образованной поверхности [23, 24]: энергетические затраты на новообразованную поверхность

определяются параметром γ (Дж/м²) – энергия единицы вновь образованной поверхности. Значение γ связано с вязкостью разрушения (параметр Ирвина) и механическими характеристиками следующим образом:

$$\gamma = \frac{(1-\nu^2) \cdot K^2}{2 \cdot E}, \quad (3)$$

где E – модуль упругости минерала;

K – коэффициент вязкости разрушения Ирвина, Н/м^{3/2};

ν – коэффициент Пуассона.

На основании исследований, представленных в работе [26], на рис. 2 показаны рассчитанные значения удельной энергии новообразованной поверхности γ для отдельных минералов.

Проведем сравнение параметров разрушения для разных минералов по теориям Баландина и Ирвина. При этом свойства магнетита принимаются в качестве стандартного эталона. Результаты сравнения приведены на рис. 3.

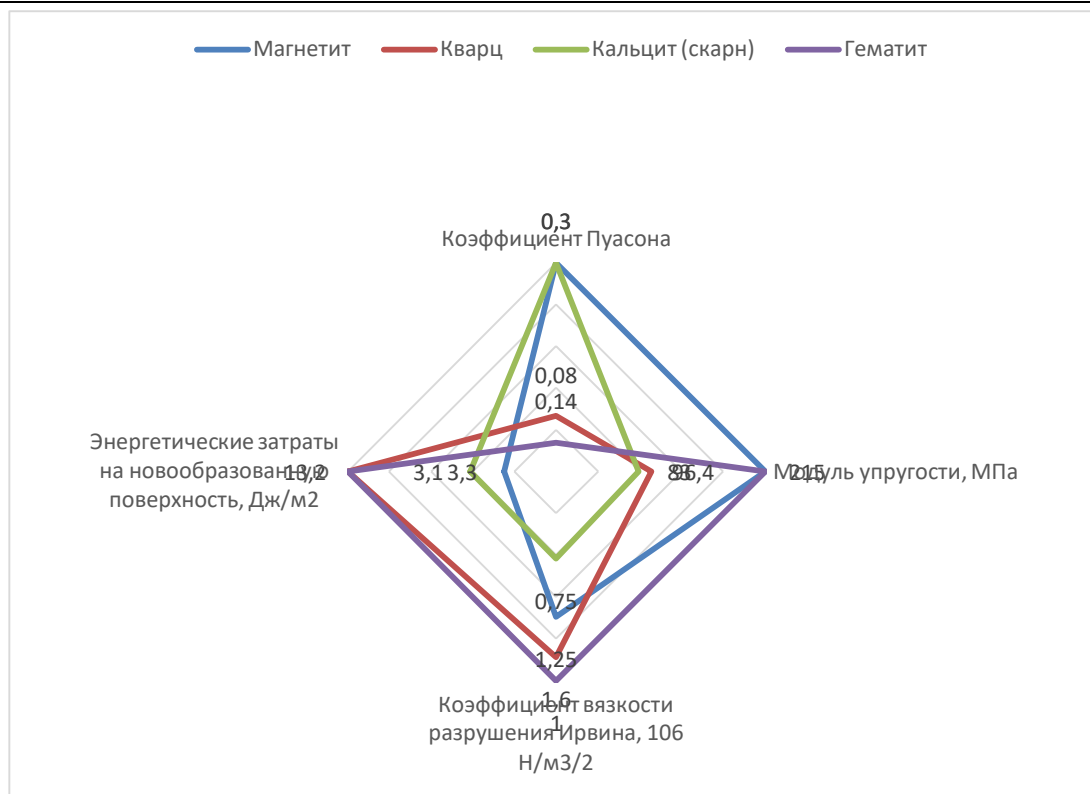


Рис. 2. Удельная энергия вновь образованной поверхности для различных минералов

Fig. 2. Specific energy of the newly formed surfaces for various minerals

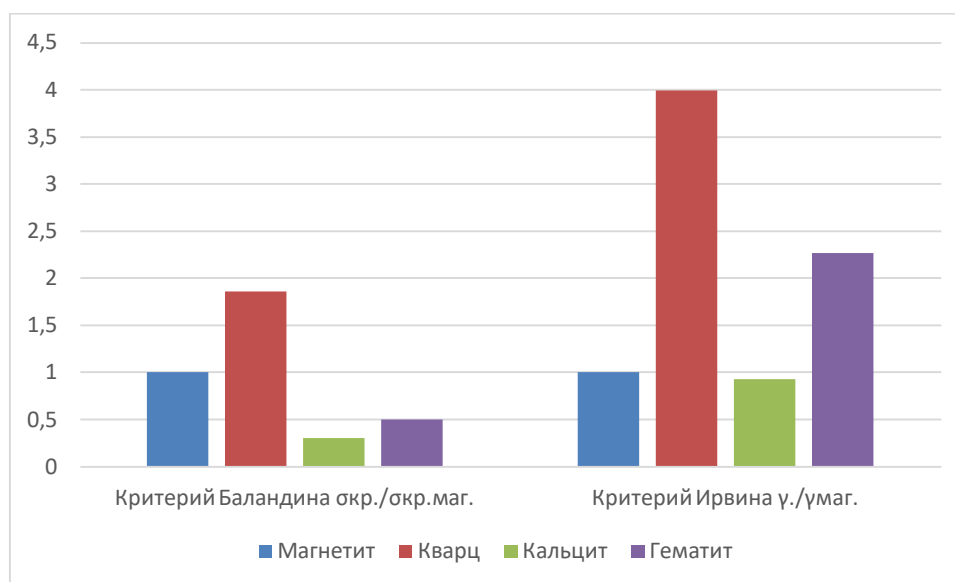


Рис. 3. Сопоставление механических свойств минералов относительно магнетита по критериям Баландина ($\sigma_{кр.}/\sigma_{кр.маг.}$) и Ирвина ($\gamma./\gamma_{маг.}$)

Fig. 3. Comparison of the mechanical properties of minerals with respect to magnetite according to the criteria of Balandin and Irvine

По данным, представленным на рис. 3, можно сделать вывод, что различия в прочностных свойствах основных минералов по параметрам Баландина и Ирвина относительно свойств магнетита носят одинаковый характер. Как было продемонстрировано в работах [26, 27], предельное значение магнитоострикционного изменения формы магнетита равно $\lambda = 0,6 \times 10^{-4}$ и недостаточно для создания критических контактных напряжений. Таким образом, магнито-импульсная обработка может обеспечивать только избирательное предразрушение границ срастания минеральной и неминеральной фаз.

Предварительное разрушение может начаться при появлении пластических деформаций в самых слабых местах зон сращения минералов в горной породе. Обычно это происходит при нагрузках, равных 0.4 - 0.66 от критического напряжения [28, 29, 25].

Тогда принимаем, что степень разупрочнения определяется отношением:

$$W = \frac{\sigma_{\text{конт.}} - k\sigma_{\text{кр.}}}{\sigma_{\text{бал}} - k\sigma_{\text{кр.}}}, \quad (4)$$

принимаем, что k лежит в диапазоне 0,4 – 0,66 от $\sigma_{\text{кр.}}$, что позволит оценить степень межзернового разупрочнения [26]. Расчетные значения степени снижения прочности находятся в интервале от 0 до 20%.

Методика выбора управляющих решений

Представленные выше предпосылки позволяют сформулировать методи-

ку выбора управляющих решений при оптимизации технологических режимов переработки железорудного сырья с использованием электромагнитных воздействий:

1. Определение гранулометрических, физико-химических параметров исходного сырья.

2. Оценка сырья по критерию разрушения – следует выбирать минимальное значение напряжения, при котором происходит полное разрушение на границе фаз (см. формула (2)). Оптимальность в этом случае определяет необходимую напряженность для оказания воздействия на сырье. Очевидно, что недостаточная напряженность не будет проводить разрушение на границе фаз, а избыточное напряжение будет затрачивать лишнюю энергию.

3. Оценка сырья по критерию Риттингера (формула (3)), которая охарактеризует величину энергетических затрат на разрушение – по сути оно прямо пропорционально вновь образованной поверхности – таким образом получаем второй критерий оптимальности по величине поверхностного напряжения. Аналогично предыдущему критерию выбор параметров электромагнитных воздействий характеризуется достаточным полем, которое необходимо создать для получения эффекта, и превышение которого будет характеризоваться избыточным энергопотреблением.

4. Комплексование критериев. Создаваемые при этом условия должны удовлетворять ограничениям, накладываемым на процесс.

ваемым на промышленные установки и условиям работы.

В работе [30] показаны результаты исследований влияния магнитно-импульсной обработки железистых кварцитов на коэффициент вязкости разрушения на границе срастания магнетита и кварца. Оценка величины коэффициента вязкости разрушения (K_c) проводилась путем

внедрения наноиндентора в зону срастания магнетита и кварца [31].

Предлагаемая методика была апробирована на ряде экспериментов, которые дали результаты, представленные на рис. 4 и 5. Можно сделать выводы, что магнитно-импульсная обработка снижает коэффициент вязкости разрушения от 2% до 19%.

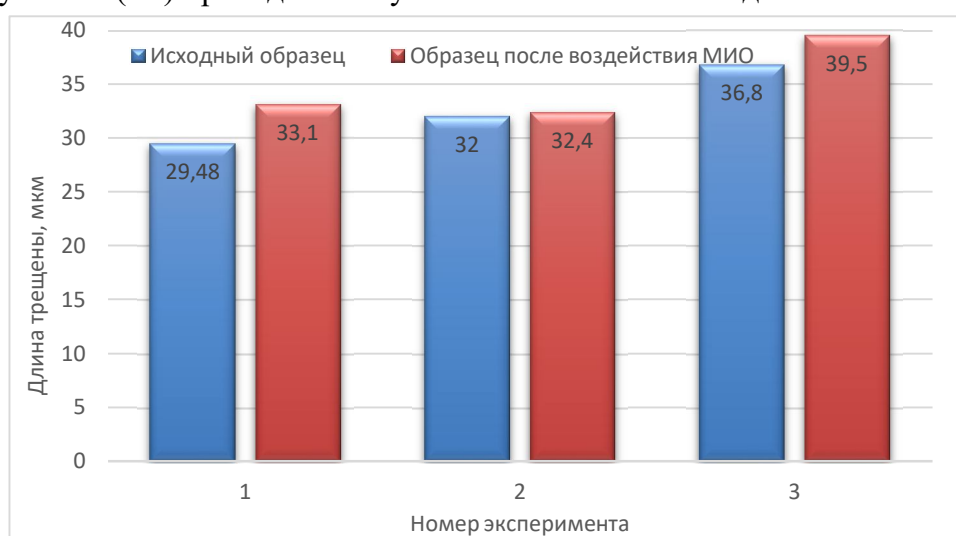


Рис. 4. Линейный размер микротрещин в образце при наноиндентировании до и после воздействия МИО

Fig. 4. Linear size of microcracks in the sample during nanoindentation before and after exposure to MIO

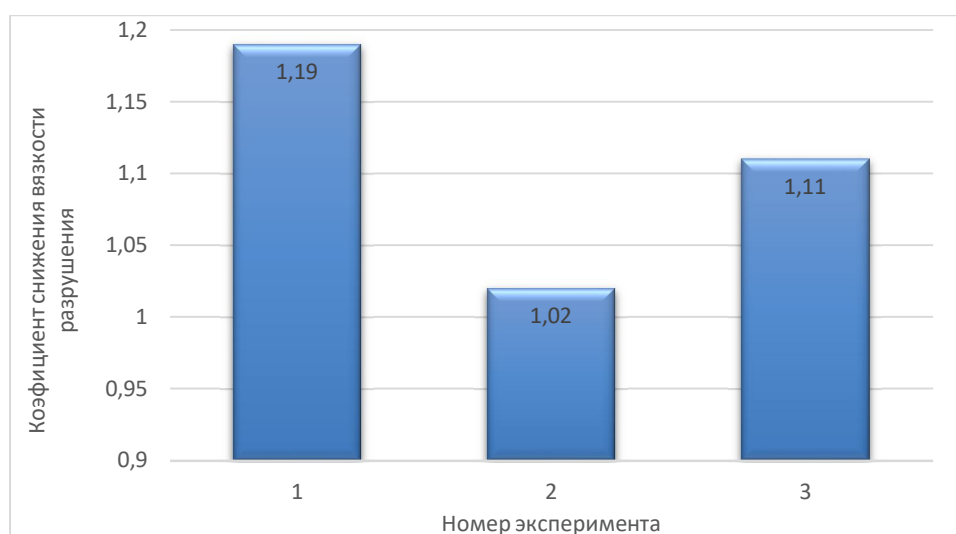


Рис. 5. Коэффициент снижения вязкости разрушения образца после воздействия МИО

Fig. 5. The coefficient of reduction of the fracture viscosity of the sample after exposure to MIO

Встраивание оборудования магнитно-импульсной обработки в состав измельчительного комплекса должно повлиять на процесс измельчения, так как в рудном материале снижаются механические свойства. Оборудование магнитно-импульсной обработки является подсистемой измельчительного комплекса, что потребует расширения объема информационных потоков таким образом, чтобы прирост объема измельчаемой руды был связан со степенью ее разупрочнения.

В ранее проведенных исследованиях [32] рассматривался подход к описанию процесса самоизмельчения железистых кварцитов на примере Лебединского ГОКа. Модель мельницы мокрого самоизмельчения по каналу расход руды Q и мощность мельницы P описывалась уравнением:

$$W_{MMC(p)} = \frac{5}{19,5p+1} \times \frac{1}{2,4p+1}. \quad (5)$$

В модели (5) коэффициент усиления по каналу $Q - P$ равен

$$\frac{P}{Q} = k = 5. \quad (6)$$

Таким образом, применение МИО можно рассматривать как возмущающее воздействие на процесс работы измельчительного комплекса.

Выводы

1. Отличия в прочности основных минералов согласно моделям Баландина и Ирвина в отношении свойств магнетита одинаковы, следовательно, для изучения селективного разрушения применимо силовое моделирование Баландина.

2. Экспериментально установлено, что при МИО происходит снижение коэффициента вязкости разрушения в диапазоне от 2% до 19%, что соответствует расчетной оценке по формуле (4), при следующих свойствах магнетита: магнитострикционная деформация $\lambda = 0,6 \times 10^{-4}$, предел прочности на сжатие $\sigma_{сж} = 52$ МПа, предел прочности на растяжение $\sigma_p = 14$ МПа.

3. Сформулированная методика позволяет повысить эффективность технологических режимов переработки железорудного сырья с использованием электромагнитных воздействий.

Список литературы

1. Mine operating costs and the potential impacts of energy and grinding / James A. Curry, Mansel J. L. Ismay, Graeme J. Jameson // Minerals Engineering. 2014. 56: 70-80. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.10.020.
2. Improving the control system of concentration plants based on express control of dissemination of magnetic minerals / A. Chumakov, V. Prischepov, K. Melekhina, A. Ivannikov // 2021, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 684 012005. DOI: 10.1088/1755-1315/684/1/012005.

3. Litvinenko V. S., Tsvetkov P. S., Molodtsov K. V. The social and market mechanism of sustainable development of public companies in the mineral resource sector // *Eurasian Mining*. 2020(1). Pp. 36–41. DOI: 10.17580/em.2020.01.07.
4. Обеспечение экологической безопасности при внедрении ресурсовозобновляемых технологий / М. М. Хайрутдинов, П. А. Каунг, З. Я. Чжо, Ю. С. Тюляева // *Безопасность труда в промышленности*. 2022. № 5. С. 57-62. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-5-57-62.
5. Современные тенденции технического прогресса в переработке железных руд / Т. И. Юшина, Е. Л. Чантурия, А. М. Думов, А. В. Мясков // *Горный журнал*. 2021. № 11. С. 75–83. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.10.
6. Clout J. M. F., Manuel J. R. Mineralogical, chemical, and physical metallurgical characteristics of iron ore. *Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability*, 2021, p. 59–108. DOI: 10.1016/B978-0-12-820226-5.00012-4.
7. Express determination of the grain size of nickel-containing minerals in ore material / A. Ivannikov, A. Chumakov, V. Prischepov, K. Melekhina // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 38. Part 4. Pp. 2059-2062. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.141.
8. Gutsche O., Fuerstenau D. W. Influence of Particle Size and Shape on the Comminution of Single Particles in a Rigidly Mounted Roll Mill // *Powder Technology*. 2004. 143–144. 186–195. DOI: 10.1016/j.powtec.2004.04.013.
9. Comminution modeling using mineralogical properties of iron ores / A. Mwanga, M. Parian, P. Lamberg, J. Rosenkranz // *Minerals Engineering*. 2017, 111, 182-197. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.06.017.
10. Моделирование и оптимизация процесса рудоподготовки комплексных руд при их дезинтеграции в мельнице самоизмельчения / К. А. Мелехина, П. П. Ананьев, А. В. Плотникова, А. С. Тимофеев, С. А. Шестак // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020. № 10. С. 95–105. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-95-105.
11. Usov A., Tsukerman V. Prospective of electric impulse processes for the study of the structure and processing of mineral raw materials // *Developments in Mineral Processing*. 2000. 13: 8-15. DOI: 10.1016/S0167-4528(00)80008-3.
12. Бабич А. В., Винников В. А. Экспериментальные исследования структурных изменений минеральных зерен пиритосодержащих руд в СВЧ полях // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019. № 6. С. 106–114. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-106-114.
13. On the issue of typical grain size assessment by the methods of broadband laser optoacoustics / A. Kravcov, A. Konvalinka, V. A. Vinnikov, E. A. Ertuganjva, I. A. Shibaev, P. N. Ivanov // *Key Engineering Materials*. 2017. 755. Pp. 212–218. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.755.212.

14. Kuskov V. B., Lvov V. V., Yushina T. I. Increasing the recovery ratio of iron ores in the course of preparation and processing // CIS Iron and Steel Review. 2021. Vol. 21. № 1. Pp. 4—8. DOI: 10.17580/cisirs.2021.01.01.
15. Jankovic A. Comminution and classification technologies of iron ore. Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability. 2021. Pp. 269 – 308. DOI: 10.1016/B978-0-12-820226-5.00013-6.
16. Selective disintegration justification based on the mineralogical and technological features of the polymetallic ores / Т., Aleksandrova N. Nikolaeva, A. Afanasova, A. Romashev, V. Kuznetsov // Minerals. 2021. 11(8), 851. DOI: 10.3390/min11080851.
17. Пелевин А. Е. Использование результатов фазового состава магнетитовой руды для прогнозирования выхода концентрата // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 5—1. С. 131—144. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_131.
18. Головин Ю. И., Моргунов Р. Б., Иванов В. Е. Термодинамические и кинетические аспекты разупрочнения ионных кристаллов импульсным магнитным полем // Физика твердого тела. 1997, 39 (11): 2016-2018.
19. Ананьев П. П., Гридин О. М., Самерханова А. С. Взаимосвязь свойств и электромеханическая чувствительность природных минералов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008, 5: 184-189.
20. Плотникова А. В. Ресурсосберегающая технология переработки труднообогатимых руд на основе магнитно-импульсного воздействия // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2013, 9: 69-70. DOI: 10.17073/0368-0797-2013-9-69-70.
21. Каркашадзе Г. Г. Механическое разрушение горных пород. М.: МГГУ, 2004. 222.
22. Winiarski B., Guz I. A. The effect of cracks interaction for transversely isotropic layered material under compressive loading // Finite Elements in Analysis and Design. 2008. 44 (4): 197-213. DOI:10.1016/j.finel.2007.11.021.
23. Биленко Л. Ф. Закономерности измельчения в барабанных мельницах. М.: Недра, 1984. 200 с.
24. Lojkowski W., Fecht H. J. The structure of intercrystalline interfaces // Progress in Materials Science. 2000. 45 (5–6): 339-568. DOI: 10.1016/s0079-6425(99)00008-0.
25. Arutyunyan A. R., Arutyunyan R. A. Application of the Fracture Mechanics and Reliability Methods to the Fatigue Problem // Procedia Materials Science. 2014. 3: 1291-1297. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.06.209.
26. Гончаров С. А., Ананьев П. П., Иванов В. Ю. Разупрочнение горных пород под действием импульсных электромагнитных полей. М.: МГГУ, 2006. 91 с.
27. Гридин О. М., Гончаров С. А. Электромагнитные процессы. М.: МГГУ, 2009. 498 с.
28. Шатемиров Д. К., Тилегенов К. Т. Особенности акустической эмиссии при релаксации горных пород // Вестник КРСУ. 2006. 6 (7): 51-55.

29. Лавров А. В., Шкуратник В. Л., Филимонов Ю. Л. Акусто-эмиссионный эффект памяти в горных породах. М., 2004. 456 р.
30. Разупрочнение межфазных границ железистых кварцитов под влиянием магнитно-импульсной обработки / А. И. Тюрин, А. М. Купряшкин, П. П. Ананьев, С. В. Ермаков, А. В. Плотникова // Вестник Тамбовского университета. Естественные и технические науки. 2013. 18 (4). С. 1699-1700.
31. Исследование прочностных свойств отдельных фаз и межфазных границ сложных многофазных материалов на примере горных пород / А. И. Тюрин, С. Д. Викторов, А. Н. Кочанов, А. В. Шуклинов, Т. С. Пирожкова, И. А. Шуварин, А. А. Самодуров // Вестник Тамбовского университета. Естественные и технические науки. 2016. 21 (3): 1368-1374. DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1368-1374.
32. Осипова Н.В., Ананьев П.П. Исследование модели функционирования измельчительного комплекса с применением импульсной электромагнитной обработки руды // Научный вестник Московского государственного горного университета. 2012, 8: 98-102.

References

1. James A. Curry, Mansel J. L. Ismay, Graeme J. Jameson, Mine operating costs and the potential impacts of energy and grinding. *Minerals Engineering*. 2014. 56: 70-80. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.10.020.
2. Chumakov A., Prischepov V., Melekhina K., Ivannikov A.. Improving the control system of concentration plants based on express control of dissemination of magnetic minerals. 2021, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 684 012005. doi:10.1088/1755-1315/684/1/012005.
3. Litvinenko V. S., Tsvetkov P. S., Molodtsov K. V. The social and market mechanism of sustainable development of public companies in the mineral resource sector. *Eurasian Mining*, 2020(1), pp. 36–41. DOI: 10.17580/em.2020.01.07.
4. Khayrutdinov M. M., Kaung P. A., Chzho Z. Ya., Tyulyaeva Y. S. Obespechenie ekologicheskoi bezopasnosti pri vnedrenii resursovozobnovlyaemykh tekhnologii [Ensuring Environmental Safety in the Implementation of the Resource-renewable Technologies]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2022(5), pp. 57–62. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-5-57-62.
5. Yushina T. I., Chanturia E. L., Dumov A. M., Myaskov A. V. Sovremennye tendentsii tekhnicheskogo progressa v pererabotke zheleznykh rud [Modern trends of technological advancement in iron ore processing]. *Gornyi Zhurnal*, 2021, (11), pp. 75–83. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.10.

6. Clout J. M. F., Manuel J. R. Mineralogical, chemical, and physical metallurgical characteristics of iron ore. *Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability*, 2021, pp. 59–108. DOI: 10.1016/B978-0-12-820226-5.00012-4
7. Ivannikov A., Chumakov A., Prischepov V., Melekhina K. Express determination of the grain size of nickel-containing minerals in ore material. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 38, part 4, pp. 2059–2062. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.141.
8. Gutsche O., Fuerstenau D. W. Influence of Particle Size and Shape on the Comminution of Single Particles in a Rigidly Mounted Roll Mill. *Powder Technology*, 2004, 143–144, 186–195. DOI: 10.1016/j.powtec.2004.04.013.
9. Mwanga A., Parian M., Lamberg P., Rosenkranz J. Comminution modeling using mineralogical properties of iron ores. *Minerals Engineering*, 2017, 111, pp. 182–197. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.06.017.
10. Melekhina K. A., Ananyev P. P., Plotnikova A. V., Timofeev A. S., Shestak S. A. Modelirovanie i optimizatsiya protsessa rudopodgotovki kompleksnykh rud pri ikh dezintegratsii v mel'nitse samoizmel'cheniya [Modeling and optimization of complex ore pretreatment by disintegration in autogenous mills]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2020(10), pp. 95–105. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-95-105.
11. Usov A., Tsukerman V. Prospective of electric impulse processes for the study of the structure and processing of mineral raw materials. *Developments in Mineral Processing*. 2000. 13: 8–15. DOI: 10.1016/S0167-4528(00)80008-3.
12. Babich A. V., Vinnikov V. A. Eksperimental'nye issledovaniya strukturnykh izmenenii mineral'nykh zeren piritosoderzhashchikh rud v SVCh polyakh [Experimental investigations of structural changes of pyrite-containing ores mineral grains in the microwave fields]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2019, 2019(6), pp. 106–114. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-106-114.
13. Kravcov A., Konvalinka A., Vinnikov V. A., Ertuganjva E. A., Shibaev I. A., Ivanov P. N. On the issue of typical grain size assessment by the methods of broadband laser optoacoustics. *Key Engineering Materials*, 2017, 755, pp. 212–218. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.755.212.
14. Kuskov V. B., Lvov V. V., Yushina T. I. Increasing the recovery ratio of iron ores in the course of preparation and processing. *CIS Iron and Steel Review*. 2021, vol. 21, no 1, pp. 4–8. DOI: 10.17580/cisir.2021.01.01.
15. Jankovic A. Comminution and classification technologies of iron ore. *Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability*, 2021, 269 – 308. DOI: 10.1016/B978-0-12-820226-5.00013-6.

16. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A., Romashev A., Kuznetsov V. Selective disintegration justification based on the mineralogical and technological features of the polymetallic ores. *Minerals*, 2021, 11(8), 851. DOI: 10.3390/min11080851.
17. Pelevin A. E. Ispol'zovanie rezul'tatov fazovogo sostava magnetitovoi rudy dlya prognozirovaniya vykhoda kontsentrata [Using the results of the phase composition of magnetite ore to predict the yield of concentrate]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2022(5-1), pp. 131–144. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_131.
18. Golovin Yu. I., Morgunov R. B., Ivanov V. E. Termodinamicheskie i kineticheskie aspekty razuprochneniya ionnykh kristallov impul'snym magnitnym polem [Thermodynamic and kinetic aspects of the softening of ionic crystals by a pulsed magnetic field]. *Fizika tverdogo tela = Solid State Physics*. 1997, 39 (11): 2016-2018.
19. Ananiev P. P., Gridin O. M., Samerchanova A. S. Vzaimosvyaz' svoystv i elektromekhanicheskaya chuvstvitel'nost' prirodnykh mineralov [Interrelation of properties and electromechanical sensitivity of natural minerals]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2008, 5: 184-189.
20. Plotnikova A. V. Resursosberegayushchaya tekhnologiya pererabotki trudnoobogatimyykh rud na osnove magnitno-impul'snogo vozdeystviya [Resource-saving technology for processing refractory ores based on the magnetic-impulse action]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya = Bulletin of Higher Educational Institutions. Ferrous metallurgy*. 2013. 9: 69-70. DOI: 10.17073/0368-0797-2013-9-69-70.
21. Karkachadze G. G. *Mekhanicheskoe razrushenie gornyykh porod* [Mechanical destruction of rocks]. Moscow, MSMU Publ., 2004, 222 p.
22. Winiarski B., Guz I. A. The effect of cracks interaction for transversely isotropic layered material under compressive loading. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2008, 44 (4): 197-213. DOI: 10.1016/j.finel.2007.11.021.
23. Bilenko L. F. *Zakonomernosti izmel'cheniya v barabannykh mel'nitsakh* [Regularities barrel grinding]. Moscow, Nedra Publ., 1984, 200 p.
24. Lojkowski W., Fecht H. J. The structure of intercrystalline interfaces. *Progress in Materials Science*. 2000. 45 (5–6): 339-568. DOI: 10.1016/s0079-6425(99)00008-0.
25. Arutyunyan A. R., Arutyunyan R. A. Application of the Fracture Mechanics and Reliability Methods to the Fatigue Problem. *Procedia Materials Science*. 2014, 3: 1291-1297. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.06.209.
26. Goncharov S. A., Ananiev P. P., Ivanov V. Yu. *Razuprochnenie gornyykh porod pod deystviem impul'snykh elektromagnitnykh polei* [Softening of rocks under the action of pulsed electromagnetic fields]. Moscow, MSMU Publ., 2006, 91 p.
27. Gridin O. M., Goncharov S. A. *Elektromagnitnye protsessy* [Electromagnetic processes]. Moscow, MSMU Publ., 2009. 498 p.

28. Shatemirov D. K., Tilegenov K. T. Osobennosti akusticheskoi emissii pri relaksatsii gornykh porod [Features of acoustic emission in the relaxation of rocks]. *Vestnik KRSU = Bulletin KRSU*. 2006. 6 (7): 51-55.
29. Lavrov A. V., Shkuratnik V. L., Filimonov Yu. L. *Akusto-emissionnyi effekt pamyati v gornykh porodakh* [Acousto-emission memory effect in rocks]. Moscow, 2004. 456 p.
30. Turin A. I., Kupryashkin A. M., Ananiev P. P., Ermakov S. V., Plotnikova A. V. Razuprochnenie mezhfaznykh granits zhelezistyykh kvartsitov pod vliyaniem magnitno-impul'snoi obrabotki [Softening of interfaces ferruginous quartzite under the influence of magnetic-pulse processing]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Bulletin of Tambov University. Natural and Technical Sciences*. 2013, 18 (4): 1699-1700.
31. Tyurin A. I., Viktorov S. D., Kochanov A. N., Shuklinov A. V., Pirozhkova T. S., Shuvarin I. A., Samodurov A. A. Issledovanie prochnostnykh svoystv otdel'nykh faz i mezhfaznykh granits slozhnykh mnogofaznykh materialov na primere gornykh porod [Investigation of the strength properties of individual phases and interphase boundaries of complex multiphase materials on the example of rocks]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Bulletin of Tambov University. Natural and Technical Sciences*. 2016, 21 (3): 1368-1374. DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1368-1374.
32. Osipova N.V., Ananyev P.P. Issledovanie modeli funktsionirovaniya izmel'chitel'nogo kompleksa s primeneniem impul'snoi elektromagnitnoi obrabotki rudy [Study of the functioning model of the grinding complex using pulsed electromagnetic processing of ore]. *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta = Scientific Bulletin of Moscow State Mining University*. 2012, 8: 98-102.

Информация об авторе / Information about the Author

Ананьева Анна Валериевна, заместитель генерального директора, Ассоциация субъектов инновационной деятельности в горной отрасли "Инновационные горные технологии", г. Москва, Российская Федерация, e-mail: plotnikovaav@inbox.ru

Anna V. Ananyeva, Deputy General Director, Association of subjects of innovative activity in the mining industry "Innovative mining technologies", Moscow, Russian Federation, e-mail: plotnikovaav@inbox.ru

Научно-методический подход к оценке своевременности оперативного управления маршрутизацией движения автомобиля в городской агломерации

А.С. Белов¹, А.Н. Реформат¹ ✉, Е.Л. Трахинин¹, Н.И. Биркун¹

¹ Академия ФСО России

ул. Приборостроительная, д. 35, г. Орел 302015, Российская Федерация

✉ e-mail: reforasx@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Целью настоящей статьи является разработка научно-методического подхода к оценке своевременности принятия решения при оперативном управлении маршрутизацией движения автомобиля в городской агломерации. Своевременность проявляется в снижении времени на подготовку решения на изменение маршрута движения автомобиля, доставляющего грузы в условиях возможного (прогнозируемого) нарастания дорожного затора на перекрестках и улицах, пересекающих установленный маршрут движения в городской агломерации.

Методы. Представленный подход базируется на основных положениях теории управления в организационных системах, теории поведения рационального потребителя, математической статистике, имитационном моделировании.

Результаты. Разработан вариант обобщенной схемы цикла оперативного управления маршрутизацией автомобиля в городской агломерации. Предложена последовательность оценки времени принятия решения при оперативном управлении маршрутизацией движения автомобиля, причем отдельные этапы последовательности оценки реализуют основные функции разработанного варианта цикла оперативного управления. Получены экспериментальные зависимости времени анализа параметров маршрута при оперативном управлении от количества и качества рассматриваемых маршрутов в среде имитационного моделирования AnyLogic 8.4.0.

Заключение. В статье рассматривается подход к оценке своевременности принятия решения при оперативном управлении маршрутом движения автомобиля доставляющего грузы в городской агломерации. Для минимизации времени принятия оперативного решения предлагается прогнозирование интенсивности нарастания дорожного затора и оценку качества маршрута. Подход позволяет на основе прогнозирования состояния дорожной обстановки в точках пересечения маршрута движения и улиц с высокой вероятностью образования дорожного затора, а также, с учетом количества и качества маршрутов, повысить своевременность принятия решения на изменение маршрута движения автомобиля, доставляющего грузы в городской агломерации.

Ключевые слова: оперативное управление; своевременность; маршрутизация; прогнозирование; время принятия решения; автомобиль.

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

Для цитирования: Научно-методический подход к оценке своевременности оперативного управления маршрутизацией движения автомобиля в городской агломерации / А.С. Белов, А.Н. Реформат, Е.Л. Трахинин, Н.И. Биркун // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(4): 132-145. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-4-132-145>.

Поступила в редакцию 13.10.2023

Подписана в печать 06.12.2023

Опубликована 21.12.2023

Scientific and Methodological Approach to Assessing Timeliness Operational Management of Vehicle Routing in an Urban Agglomeration

Andrei S. Belov ¹, Andrei N. Reformat ¹ ✉, Egor L. Trakhinin ¹, Nikolay I. Birkun ¹

¹ Academy of the Federal Guard Services of Russia
35, Priborostroitel'naya str., Orel 302015, Russian Federation

✉ e-mail: reforasx@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. The purpose of this article is to develop a scientific and methodological approach to assessing the timeliness of decision-making in the operational management of car traffic routing in an urban agglomeration. Timeliness is manifested in reducing the time to prepare a decision to change the route of a car delivering goods in conditions of a possible (predicted) increase in traffic congestion at intersections and streets crossing the established route in an urban agglomeration.

Methods. The presented approach is based on the basic principles of management theory in organizational systems, the theory of rational consumer behavior, mathematical statistics, and simulation modeling.

Results. A variant of the generalized scheme of the operational control cycle for the routing of a car in an urban agglomeration has been developed. A sequence of estimation of decision-making time for operational control of vehicle traffic routing is proposed, and the individual stages of the evaluation sequence implement the main functions of the developed version of the operational control cycle. Experimental dependences of the time of analysis of route parameters during operational management on the quantity and quality of the routes under consideration in the AnyLogic 8.4.0 simulation environment are obtained.

Conclusion. The article considers an approach to assessing the timeliness of decision-making in the operational management of the route of a car delivering goods in an urban agglomeration. To minimize the time for making an operational decision, it is proposed to predict the intensity of traffic congestion and assess the quality of the route. The approach allows, based on forecasting the state of the road situation at the intersection points of the route and streets with a high probability of traffic congestion, as well as, taking into account the number and quality of routes, to increase the timeliness of making a decision to change the route of a car delivering goods to an urban agglomeration.

Keywords: operational management; timeliness; routing; forecasting; decision-making time; car.

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

For citation: Belov A. S., Reformat A. N., Trakhinin E. L., Birkun N. I. Scientific and Methodological Approach to Assessing Timeliness Operational Management of Vehicle Routing in an Urban Agglomeration. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(4): 132-145 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-4-132-145>.

Received 13.10.2023

Accepted 06.12.2023

Published 21.12.2023

Введение

Интернет торговля быстро развивается, становится удобнее и доступнее. Увеличивается количество пользователей интернет магазинов, а интернет покупки становятся такой же частью повседневной жизни, как и покупка товаров в обычном магазине. Объем рынка интернет торговли составил за 2022 год 5 660 млн. рублей, продемонстрировав рост в рублях на 38% по сравнению с 2021 годом, а количество заказов увеличилось на 65%, составив 2 816 млн. Количество отправок купленных товаров выросло на 56% [1].

Согласно исследованиям аналитической компании *Data Insight* [1], наиболее важными характеристиками доставки для покупателей являются скорость доставки, стоимость доставки, соответствие сроков доставки указанным при заказе. Значительный рост количества заказов в интернет-торговле обуславливает увеличение спроса на курьерскую доставку и доставку до пункта выдачи в городской агломерации. Доставка мелких партий груза осуществляется наиболее часто с применением легких коммерческих автомобилей. По данным агентства «Автостат Инфо», количество легких коммерческих автомобилей в 2021 году выросло более чем на 25%, а за 2021-2022 годы только первичной регистрации подверглось 226 126 автомобилей [2, 3].

Компактность автомобилей данного класса позволяет проезжать по узким переулкам, маневрировать в городских пробках. Несмотря на это, планирование маршрутов в городской агломерации сопряжено с необходимостью учета ограничений и обработкой значительного объема исходной информации для рациональной организации маршрутов движения и управления перевозками [4, 5]. Необходимо выбрать показатели, характеризующие выполнение составленного плана объектом управления. Для организации доставки грузов «точно в срок» важно оценивать не только эффективность выполнения плана объектом управления, но и эффективность работы субъекта управления [6, 7, 8]. В табл. 1 приведены механизмы оценки и контроля, позволяющие в режиме реального времени осуществлять оперативное управление [9, 10].

Перечисленные механизмы позволяют вырабатывать управленческие решения основанные на оценке данных, получаемых от объекта управления. Однако отсутствие прогнозирования не позволяет заранее выработать управляющие воздействия для минимизации внешних воздействий. Предлагаемый научно-методический подход оценки своевременности оперативного управления отличается от приведенных механизмов оценки и контроля (табл. 1) составлением прогноза влияния внешних факторов на состояние маршрута движения ТС. Своевременность дости-

гается выработкой управляющих воздействий на основе составленного прогноза, позволяющих заблаговременно, до ухудшения параметров доставки, изменить маршрут движения.

Актуальность работы проявляется в увеличении нагрузки на дорожную сеть, в частности в увеличении количества автомобильных заторов в городской агломерации (рис. 1).

Таблица 1. Механизмы оценки и контроля

Table 1. Evaluation and control mechanisms

Название / Name	Описание / Description
Механизм опережающего самоконтроля	Механизм позволяет оценивать возможные отклонения результатов деятельности объекта управления от плана. Он состоит в том, что штрафы агентов при корректировке плана тем меньше, чем раньше они сообщают об этой корректировке, и эти штрафы меньше, чем штрафы за невыполнение плана
Механизм комплексного оценивания	Механизм позволяет регулярно своевременно оценивать результаты деятельности объекта управления, а также изменения, происходящие с ним, как в результате функционирования объекта, так и в зависимости от влияния внешней среды

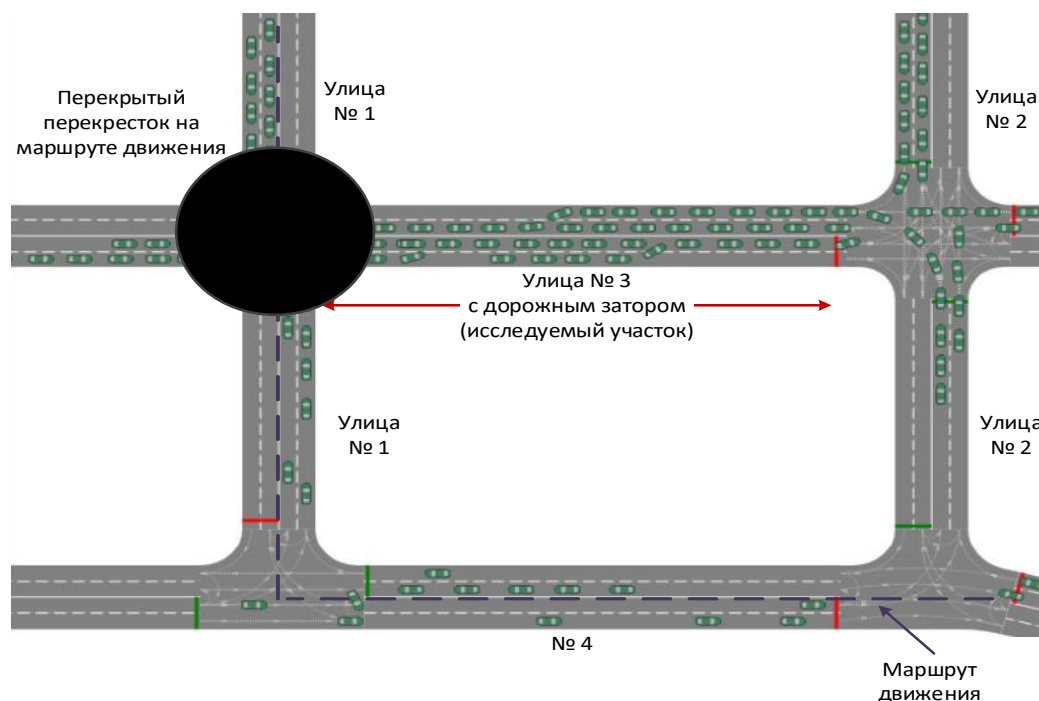


Рис. 1. Схематичное представление возникновения автомобильного затора в городской агломерации

Fig. 1. Schematic representation of the occurrence of traffic congestion in an urban agglomeration

Под образованием затора понимается ситуация отсутствия возможности выехать на перекресток или пересечь его из-за его перекрытия автомобилями, выехавшими на разрешающий сигнал светофора, но которые не смогли покинуть перекресток до запрещающего сигнала светофора из-за образовавшегося впереди автомобильного затора (рис. 1, перекрестки улиц № 1 и № 3, № 2 и № 3). Это приводит к увеличению количества автомобилей ожидающих возможности пересечь перекресток, что влечет за собой образование затора на прилегающих улицах (рис. 1, очередь на улице № 1). На рис. 1 пунктирной линией обозначен маршрут движения автомобиля, доставляющего грузы. Очевидно, что образование затора на улице № 1, прилегающей к улице № 3, могло не произойти при условии освобождения перекрестка автомобилями, движущимися по улице № 3.

Образование автомобильных заторов в определенных местах является случайным и не может быть в полном объеме учтено на этапе планирования маршрутов доставки грузов. В такой ситуации резко снижается эффективность транспортировки грузов, так как сбивается график доставки, задействованность работников и техники, возрастают расходы на доставку грузов, выплаты неустойки и т.д. [11, 12].

Одним из вариантов снижения расходов является оценка и снижение времени на подготовку решения на измене-

ние маршрута движения автомобиля, доставляющего грузы в условиях нарастания дорожного затора на перекрестках и улицах, при оперативном управлении.

Материалы и методы

При оперативном управлении учитывается неопределенность будущих состояний внешней среды и ее воздействия на объект управления – автомобиль, доставляющий груз [13].

Уменьшить неопределенность возможно за счет поступления новой информации непосредственно в ходе оперативного управления. При анализе и сравнении информации, характеризующей процесс доставки грузов согласно разработанному ранее плану, возможно обнаружить отклонения «плановых» значений. В случае возникновения несущественных отклонений параметров доставки, необходима корректировка действий в рамках оперативного управления [14, 15]. Задача оперативного управления решается непосредственно в ходе движения автомобиля и заключается в определении рациональных управляющих воздействий для достижения «плановых» параметров движения по маршруту с учетом всей имеющейся в текущий момент информации [16, 17, 18]. При этом важная роль отводится оперативному управлению и его основным функциям. На рис. 2 представлен вариант цикла оперативного управления маршрутизацией автомобиля в городской агломерации.



Рис. 2. Обобщенная схема цикла оперативного управления маршрутизацией автомобиля в городской агломерации

Fig. 2. The generalized scheme of the cycle of operational control of the routing of the car in the urban agglomeration

В блоке мониторинга параметров маршрута определяется величина отклонения получаемых параметров доставки груза $y_i^{проект}$ от требуемых параметров $y_i^{треб}$, характеризующих целевое состояние организационной системы. Отклонения параметров вызваны внешними воздействиями $y_{внеш}$, под которыми понимается образование дорожных заторов на улице, пересекающей установленный маршрут движения с перекрытием перекрестка пересечения улиц № 1 и № 3 (см. рис. 1). Полученные отклонения параметров $\Delta y_i^{проект}$ сравнивают с допустимым отклонением $\Delta y_i^{треб}$. Прогнозирование состояния маршрутов с учетом внешних воздействий в местах пересечения установленного маршрута

движения автомобиля с улицами, на которых возможно образование дорожных заторов позволит оценить последующее развитие ситуации на маршруте движения с учетом новых данных ($y_i^{проект}$). Он необходим для описания будущего состояния существующего маршрута движения и альтернативных маршрутов кратчайшего объезда дорожного затора. Кроме того, результаты прогноза покажут, насколько будут отличаться ($\Delta y_i^{проект}$) от требуемых значений ($y_i^{треб}$) показатели, характеризующие движение автомобиля, доставляющего грузы по указанным маршрутам. Основываясь на прогнозе, возможно заблаговременно, до момента перекрытия маршрута движения дорожным затором, сформиро-

вать и довести до объекта оперативного управления управляющие воздействия по изменению маршрута движения автомобиля для недопущения нарушения сроков доставки грузов и связанных с этим дополнительных расходов.

Получив управляющие воздействия, выработанные субъектом оперативного управления, объект оперативного управления изменяет поведение в соответствии с полученной информацией. Одновременно с этим, продолжается сбор, систематизация и передача новой информации о ходе выполнения поставленных задач $u_i^{\text{проект}}$.

В случаях, когда необходимо изменение маршрута движения, важно учитывать два условия. Первое условие – длина дорожного затора изменяется во времени, т.е. свободный в определенный момент времени перекресток может быть перекрыт затором через некоторое время. Для понимания его распространения необходим прогноз интенсивности нарастания длины затора λ . Второе условие – автомобиль, доставляющий груз, подвижен и предельное время оперативного управления $t_{\text{реш ОУ}}$ (принятие решения об изменении маршрута движения) не превышает время движения автомобиля до точки, ближайшей к дорожному затору, в которой возможно изменить маршрут движения. За это время субъект управления должен рассмотреть $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ альтернативных маршрутов доставки,

провести анализ возможности использования указанных маршрутов для выбора наиболее рационального варианта.

Целью настоящей статьи является разработка научно-методического подхода к оценке своевременности принятия решения при оперативном управлении. Своевременность проявляется в снижении времени на подготовку решения по изменению маршрута движения автомобиля, доставляющего грузы в условиях нарастания дорожного затора на перекрестках и улицах, пересекающих установленный маршрут движения, за счет прогнозирования интенсивности нарастания затора. Основным показателем выбрано время принятия решения при оперативном управлении ($t_{\text{реш ОУ}}$). Минимизация $t_{\text{реш ОУ}}$ позволит повысить своевременность принятия решения.

$$t_{\text{реш ОУ}}(a, \lambda, k_a) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где a – количество маршрутов движения; k_a сред – усредненная оценка качества всех маршрутов.

Ограничения: $a \geq 2, \lambda > 0, k \rightarrow 0$.

Допущения: в подходе учитываются ситуации, когда автомобили выезжают на перекресток, но не покидают его после окончания разрешающей движение фазы работы светофора вследствие образовавшегося за перекрестком затора.

Подход представлен в виде блок-схемы:

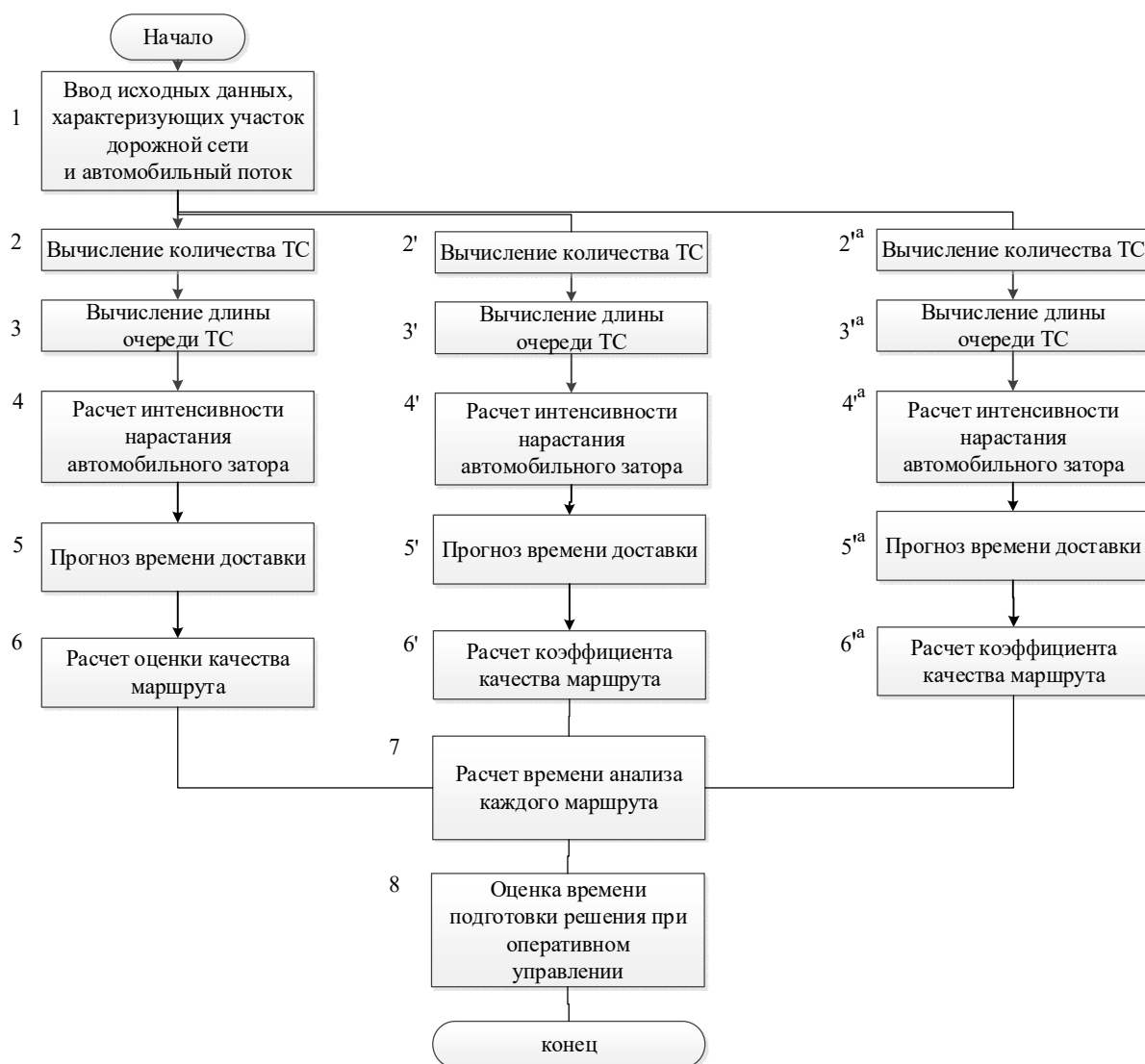


Рис. 3. Блок-схема последовательности оценки времени принятия решения при оперативном управлении маршрутизацией движения автомобиля, доставляющего груз в городской агломерации

Fig. 3. Block diagram of the sequence of estimating the decision-making time for operational control of the routing of a car delivering cargo in an urban agglomeration

В блоке 1 вводят исходные данные: $d_{ав}$ – дистанция между ТС в очереди перед стоп-линией светофора; $(N(t_n)-l)$ – количество дистанций между автомобилями; l – длина одного ТС; t_1 , t_2 – значение времени в начале и конце интервала времени, на котором находят интенсивность нарастания дорожного затора; $L(t_1)$ – длина дорожного затора в

момент времени t_1 ; $L(t_2)$ – длина дорожного затора в момент времени t_2 ; λ – интенсивность нарастания дорожного затора; $t_{реб}$ – время, отведенное на доставку груза; $\Delta t_{анализ\ марш}$ – время анализа одного варианта маршрута движения, $A=\{a_1,...,a_n\}$ – количество маршрутов.

В блоке 2 вычисляют количество ТС на исследуемом участке дорожной

сети – $N(t_n)$, ожидающих зеленого сигнала светофора.

$$N(t_n) = \begin{cases} N+1, & \text{если автомобиль} \\ & \text{въезжает на исследуемый участок} \\ N-1, & \text{если автомобиль} \\ & \text{покидает исследуемый участок,} \end{cases} \quad (2)$$

где N – количество автомобилей на исследуемом участке улицы.

Учитываются автомобили, находящиеся на исследуемом участке улицы (см. рис. 1).

В блоке 3 определяют длину дорожного затора на исследуемом участке улицы (см. рис. 1) в момент времени t_n :

$$L(t_n) = N(t_n) * l + (N(t_n) - 1) * d_{ав}, \quad (3)$$

где $N(t_n)$ – количество автомобилей на исследуемом участке улицы в момент времени t ; l – длина одного ТС; $d_{ав}$ – дистанция между ТС в очереди перед стоп-линией светофора.

В блоке 4 рассчитывают интенсивность, с которой изменялась длина очереди, т.е. интенсивность изменения дорожного затора – $\lambda_r(t)$ на интервале времени от t_1 до t_2 на исследуемом участке улицы (см. рис. 1):

$$\lambda_r(t_n) = \frac{L(t_2) - L(t_1)}{t_2 - t_1}, \quad (4)$$

где $L(t_1)$ – длина дорожного затора в момент времени t_1 ; $L(t_2)$ – длина дорожного затора в момент времени t_2 .

В блоке 5 измеряют время доставки грузов на a -м маршруте – $t_{дост\ a}$. Рассчитывают изменение времени доставки груза для маршрута a :

$$\Delta t_{дост\ a} = |t_{треб} - t_{дост\ a}|, \quad (5)$$

где $t_{треб}$ – время, отведенное на доставку груза; $t_{дост\ a}$ – время доставки груза на маршруте a (с учетом нарастания дорожного затора).

В блоке 6 оценивают качество маршрута k_a с учетом данных о времени изменения доставки груза на маршруте a :

$$k_a = \frac{\Delta t_{дост\ a}}{t_{треб}}, \quad (6)$$

где $\Delta t_{дост\ a}$ – изменение времени доставки груза для маршрута a ; $t_{треб}$ – время, отведенное на доставку груза.

Коэффициент k_a покажет, насколько параметры измененного маршрута (напр. времени доставки) изменятся по отношению к параметрам исходного маршрута доставки груза.

В блоке 7 рассчитывают время, необходимое на анализ параметров маршрута a_i с учетом оценки качества маршрута:

$$\Delta t_{\text{анализ марш}}^a = \Delta t_{\text{анализ марш}} * k_a, \quad (7)$$

где $\Delta t_{\text{анализ марш}}$ – время анализа одного варианта маршрута движения; k_a – коэффициент качества маршрута a .

В блоке 8 оценивают время, необходимое для подготовки решения по изменению маршрута движения автомобиля, доставляющего грузы при оперативном управлении с учетом количества i рассматриваемых маршрутов:

$$t_{\text{реш ОУ}} = \sum_{i=1}^i \Delta t_{\text{анализ марш}}^a, \quad (8)$$

где $\Delta t_{\text{анализ марш}}^a$ – время, необходимое на анализ параметров маршрута a_i .

На основании получаемых данных о развитии дорожной обстановки и

оценки времени подготовки решения субъект оперативного управления принимает решение о необходимых управляющих воздействиях при оперативном

управлении маршрутизацией автомобиля, доставляющего грузы в городской агломерации.

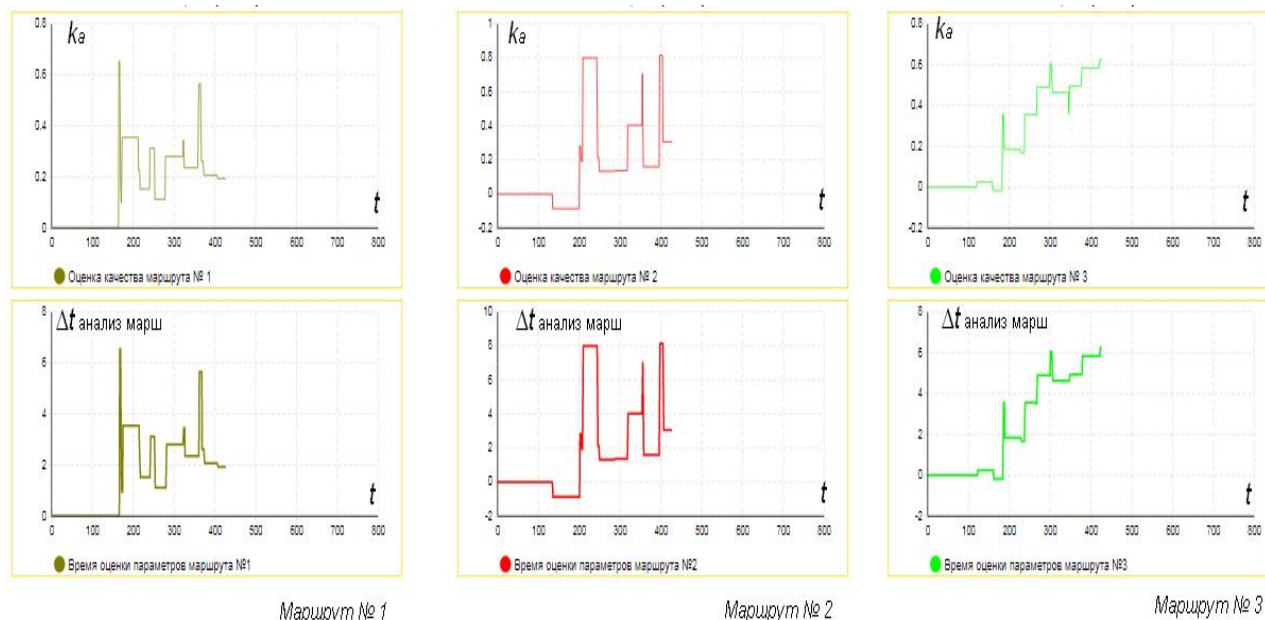


Рис. 4. Зависимость времени анализа параметров маршрута при оперативном управлении от качества рассматриваемых маршрутов

Fig. 4. The dependence of the time of analysis of route parameters during operational management on the quality of the routes under consideration

Результаты и их обсуждение

Описанный в данной статье подход реализуется в среде имитационного моделирования *AnyLogic* [19] и позволяет своевременно принимать решения при оперативном управлении маршрутизацией движения автомобиля, доставляющего грузы в городской агломерации с учетом образования автомобильных заторов на улицах, пересекающих установленный маршрут движения.

Результаты анализа параметров маршрута проявляются в отклонении параметра доставки (например $\Delta t_{\text{анализ марш}}$, рис. 4) от исходного параметра. Воз-

можные отклонения могут привести к нарушению логистической цепочки, штрафам и другим негативным последствиям. Минимальные значения коэффициента k_a определяют более точное совпадение параметров измененного маршрута по сравнению с исходным маршрутом доставки груза. В соответствии с гипотезой рационального поведения [20] измененный маршрут доставки грузов по предлагаемым параметрам, наиболее близко приближающийся к исходному маршруту, выбирают при необходимости замены исходного маршрута.

Выводы

Научно-методический подход позволяет на основе прогнозирования состояния дорожной обстановки в точках пересечения маршрута движения и улиц с высокой вероятностью образования дорожного затора, а также, с учетом количества и качества маршрутов, оценить своевременность принятия реше-

ния на изменение маршрута движения автомобиля, доставляющего грузы в городской агломерации.

Получены экспериментальные зависимости времени анализа параметров маршрута при оперативном управлении от количества и качества рассматриваемых маршрутов в среде имитационного моделирования *AnyLogic 8.4.0*.

Список литературы

1. Интернет-торговля в России 2022 // Аналитическая компания Data insight : официальный сайт. URL: https://datainsight.ru/eCommerce_2022 (дата обращения: 25.07.2023).
2. Рынок новых LCV в 2022 году // ООО «АВТОСТАТ» : официальный сайт. URL: <https://www.autostat.ru/press-releases/53560/> (дата обращения: 26.07.2023).
3. Транспорт России информационно-статистический бюллетень 2022 год: электронный // Министерство транспорта Российской Федерации: официальный сайт. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/7/12386> (дата обращения: 26.07.2023).
4. Белов А. С., Реформат А. Н., Трахинин Е. Л. Подход к определению рационального маршрута движения транспортных средств в условиях повышенной загруженности автомобильных дорог в городской агломерации // Информационные системы и технологии. 2023. № 1 (135). С. 46–52.
5. Реформат А. Н., Белов А. С., Добрышин М. М. Формализованная модель рационального управления маршрутом движения транспортных средств в городе // Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта: IV Всероссийская научно-практическая конференция: сборник статей (Екатеринбург, 16 декабря 2022 года). Екатеринбург : изд-во Урал. ун-та, 2023. С. 39-42.
6. Утенин В. Причины низкой эффективности российских компаний // Корпоративный менеджмент: URL: https://www.cfin.ru/management/controlling/low_eff_reasons.shtml (дата обращения 30.09.2023).
7. Белов А. С., Трахинин Е.Л., Реформат А. Н. Оценка уровня профессиональной пригодности должностных лиц ситуационных центров // Применение современных информационных технологий в служебно- боевой деятельности (26 апреля 2022 года): сборник статей межвузовской научно-практической конференции / под общ. ред. Д.В. Мироманова. Пермь: Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации, 2022. С. 5-9.

8. Человеческий фактор в управлении: сборник статей. М.: КомКнига, 2006. 496 с. URL: <https://www.iprbookshop.ru/8497.html>.
9. Бурков В.Н., Буркова И.В., Новиков Д.А. Механизмы управления / под ред. Д. А. Новикова. М.: УРСС (Editorial URSS), 2011.
10. Теория управления (дополнительные главы) / Д.А. Новиков, Б.Р. Андриевский, М.В. Балашов [и др.]; под ред. Д. А. Новикова. М.: ЛЕНАНД, 2019. 552 с.
11. Гаджинский А. М. Логистика. М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2007. 472 с.
12. Модели и методы теории логистики / В.С. Лукинский, В.В. Лукинский, Ю.В. Малевич [и др.]; под ред. В. С. Лукинского. СПб.: Питер, 2008. 448 с.
13. Коновальчук Е.В., Новиков Д.А. Модели и методы оперативного управления проектами. М.: ИПУ РАН, 2004. 63 с.
14. Новиков Д.А. Методология управления. М.: Либроком, 2011.
15. Поспелов Д. А. Ситуационное управление. Теория и практика. М.: Наука, 1986. 284 с.
16. Новиков Д.А. Управление проектами: организационные механизмы. М.: ПМСОФТ, 2007. 140 с.
17. Воропаев В.И. Управление проектами в России. М.: Аланс, 1995. 225 с.
18. Новиков Д.А. Кибернетика: Навигатор. История кибернетики, современное состояние, перспективы развития. М.: ЛЕНАНД, 2016. 160 с.
19. Субботенко О. А. Основы имитационного моделирования сложных процессов и организационно-технических систем в среде AnyLogic. Орёл : Академия ФСО России, 2022. 302 с.
20. Бурков В.Н., Коргин Н.А., Новиков Д.А. Введение в теорию управления организационными системами / под ред. чл.-корр. РАН Д.А. Новикова. М.: Либроком, 2009. 264 с.

References

1. Internet-torgovlya v Rossii 2022 [Online trading in Russia 2022]. *Analytical company Data insight: official website*. Available at: https://datainsight.ru/eCommerce_2022 (accessed: 25.07.2023).
2. Rynok novykh LCV v 2022 godu [New LCV market in 2022]. *AUTOSTAT LLC: official website*. Available at: <https://www.autostat.ru/press-releases/53560/> (accessed: 26.07.2023).
3. *Transport Rossii. Informatsionno-statisticheskii byulleten' 2022 god* [Transport of Russia. Information and Statistical bulletin for 2022]. Available at: <https://mintrans.gov.ru/documents/7/12386> (accessed: 26.07.2023).

4. Belov A. S., Reformaty A. N., Trakhinin E.L. Podkhod k opredeleniyu ratsional'nogo marshruta dvizheniya transportnykh sredstv v usloviyakh povyshennoi zagruzhennosti avtomobil'nykh dorog v gorodskoi aglomeratsii [An approach to determining the rational route of vehicles in conditions of high traffic congestion in urban agglomeration]. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii = Information Systems and Technologies*, 2023, no. 1 (135), pp. 46-52.

5. Reformat A. N., Belov A. S., Dobrynin M. M. [Formalized model of rational management of the route of vehicles in the city]. *Innovatsionnoe razvitie tekhniki i tekhnologii nazemnogo transporta: IV Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya: sbornik statei* [Innovative development of land transport equipment and technologies. Collection of articles IV All-Russian Scientific and Practical Conference]. Yekaterinburg, 2023, pp. 39-42 (In Russ.).

6. Utenin V. Prichiny nizkoi effektivnosti rossiiskikh kompanii [The reasons for the low efficiency of Russian companies]. *Corporate management*. Available at: https://www.cfin.ru/management/controlling/low_eff_reasons.shtml (accessed: 30.09.2023).

7. Belov A. S., Trakhinin E.L., Reformat A. N. Reformat A. N. [Assessment of the level of professional fitness of officials of situational centers]. *Primenenie sovremennykh informatsionnykh tekhnologii v sluzhebno-boevoi deyatelnosti. Sbornik statei mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Application of modern information technologies in service and combat activities. Collection of articles of the interuniversity scientific and practical conference]; ed. by D.V. Miromanov. Perm, 2022, pp. 5-9 (In Russ.).

8. *Chelovecheskii faktor v upravlenii. Sbornik statei* [The human factor in management. Collection of articles]. Moscow, KomKniga Publ., 2006. 496 p. Available at: <https://www.iprbookshop.ru/8497.html>.

9. Burkov V.N. I. Burkova. V. D. Novikov.A. *Mekhanizmy upravleniya* [Management mechanisms]; ed. by N. D. A. Novikov. Moscow: URSS (Editorial URSS) Publ., 2011.

10. Novikov D.A., Andrievsky B.R., Balashov M.V., etc. *Teoriya upravleniya (dopolnitel'nye glavy)* [Management Theory (additional chapters)]. Moscow, Lenenergo Publ., 2019. 552 p.

11. Gadzhinskii A. M. *Logistika* [Logistics]. Moscow, 2007, 472 p.

12. Lukinsky V.S., Lukinsky V.V., Malevich Yu.V. et al. *Modeli i metody teorii logistiki* [Models and methods of logistics theory]. St. Petersburg, Peter Publ., 2008. 448 p.

13. Konovalchuk E.V., Novikov D. A. *Modeli i metody operativnogo upravleniya projektami* [Models and methods of operational project management]. Moscow, IPU RAS Publ., 2004. 63 p.

14. Novikov D. A. *Metodologiya upravleniya* [Management Methodology]. Moscow, Librocom Publ., 2011.

15. Pospelov D. A. *Situatsionnoe upravlenie. Teoriya i praktika* [Situational management. Theory and practice]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 284 p.

16. Novikov D. A. *Upravlenie proektami: organizatsionnye mekhanizmy* [Project management: organizational mechanisms]. Moscow, PMSOFT Publ., 2007, 140 p.
17. Voropaev V.I. *Upravlenie proektami v Rossii* [Project management in Russia]. Moscow, Alanson Publ., 1995, 225 p.
18. Novikov D. A. *Kibernetika: Navigator. Istoriya kibernetiki, sovremennoe sostoyanie, perspektivy razvitiya* [Cybernetics: Navigator. History of cybernetics, current state, development prospects]. Moscow, Lenenergo Publ., 2016, 160 p.
19. Subbotina O. A. *Osnovy imitatsionnogo modelirovaniya slozhnykh protsessov i organizatsionno-tekhnicheskikh sistem v srede AnyLogic* [Fundamentals of simulation modeling of complex processes and organizational and technical systems in the AnyLogic environment]. Orel, 2022. 302 p.
20. Burkov V.N., Korgin N.A., Novikov D.A. *Vvedenie v teoriyu upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Introduction to the theory of management of organizational systems]. Moscow, Librocom Publ., 2009. 264 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Белов Андрей Сергеевич, доктор технических наук, доцент, Академия ФСО России, г. Орел, Российская Федерация, e-mail: reforasx@yandex.ru

Andrei S. Belov, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Academy of the Federal Guard Services of Russia, Orel, Russian Federation, e-mail: reforasx@yandex.ru

Реформат Андрей Николаевич, Академия ФСО России, г. Орел, Российская Федерация, e-mail: reforasx@yandex.ru

Andrei N. Reformat, Academy of the Federal Guard Services of Russia, Orel, Russian Federation, e-mail: reforasx@yandex.ru

Трахинин Егор Леонидович, кандидат технических наук, Академии ФСО России, г. Орел, Российская Федерация, e-mail: reforasx@yandex.ru

Egor L. Trakhinin, Cand. of Sci. (Engineering), Academy of the Federal Guard Services of Russia, Orel, Russian Federation, e-mail: reforasx@yandex.ru

Биркун Николай Иванович, кандидат педагогических наук, доцент, Академии ФСО России, г. Орел, Российская Федерация, e-mail: reforasx@yandex.ru

Nikolay I. Birkun, Cand. of Sci. (Pedagogic), Academy of the Federal Guard Services of Russia, Orel, Russian Federation, e-mail: reforasx@yandex.ru

Когнитивное моделирование управления рисками грузового порта

И.О. Бондарева¹ ✉

¹ Астраханский государственный технический университет
ул. Татищева, д. 16, г. Астрахань 414056, Российская Федерация

✉ e-mail: i.o.bondareva@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Повышение эффективности бизнес-процессов грузового порта на основе использования технологии управления рисками, базирующейся на применении когнитивного моделирования.

Методы. Предложено когнитивное моделирование управления рисками грузового порта, основанное на комплексном поэтапном применении концепции многоуровневого целеполагания, предполагающей доскональную проработку целей грузового порта, а также показателей оценки достижимости целей путем разработки сбалансированной системы показателей (ССП) и построения логико-вероятностной (ЛВ) модели; логико-онтологической модели, разработанной на базе связей, установленных ЛВ-моделью; имитационной модели, используемой для проверки рекомендаций по корректировке элементов рассматриваемой системы, выработанных на основе запросов к онтологической модели, с целью выбора наиболее приемлемых вариантов рекомендаций или комбинаций таковых и формирования на их основе управленческих решений.

Результаты. На основе сформулированной цели исследования и поставленных задач была разработана концепция когнитивного моделирования, предполагающая использование знаний о связях между рисками, целями, показателями оценки деятельности порта, а также уточняющими коэффициентами и характере их влияния друг на друга с целью выработки рекомендаций по управлению рисками грузового порта на основе запросов к онтологической модели. Имитационная модель в рамках предлагаемого концептуального подхода позволяет вырабатывать управленческие решения по корректировке операционных составляющих системы с целью недопущения рискованных ситуаций в долгосрочной перспективе (на тактическом и стратегическом уровнях) с учетом влияния внешних факторов. Когнитивное моделирование основывается в данной работе на интеграции логико-вероятностном, логико-онтологическом и имитационном моделировании.

Заключение. В результате реализации поставленных цели и задач предложена когнитивная модель управления рисками грузового порта. Данная модель объединяет в себе различные виды моделирования и учитывает различные уровни управления. В качестве управленческих решений в результате экспериментов с имитационной моделью выбираются наиболее результативные рекомендации, сгенерированные на основании запроса к онтологической модели.

Ключевые слова: когнитивное моделирование; логико-онтологическое моделирование; управление рисками; логико-вероятностное моделирование; поддержка принятия решений; онтология; имитационное моделирование.

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

Для цитирования: Бондарева И.О. Когнитивное моделирование управления рисками грузового порта // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(4): 146-163. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-4-146-163>.

Поступила в редакцию 15.11.2023

Подписана в печать 02.12.2023

Опубликована 21.12.2023

Cognitive Modeling of Cargo Port Risk Management

Irina O. Bondareva¹ ✉

¹ Astrakhan State Technical University
16, Tatishchev str., Astrakhan 414056, Russian Federation

✉ e-mail: i.o.bondareva@mail.ru

Abstract

Purpose of research. Increasing the efficiency of cargo port business processes through the use of risk management technology based on the application of a cognitive modeling.

Methods. A cognitive modeling of cargo port risk management is proposed, based on a comprehensive step-by-step application of the concept of multi-level goal setting, which involves a thorough elaboration of the cargo port's goals, as well as indicators for assessing the achievability of goals by developing a balanced scorecard (BSS) and constructing a logical-probabilistic (LP) model; a logical-ontological model developed on the basis of the connections established by the LP model; a simulation model used to check recommendations for adjusting the elements of the system under consideration, developed on the basis of queries to the ontological model, in order to select the most acceptable options for recommendations or combinations thereof and formulate management decisions based on them.

Results. Based on the formulated purpose of the study and the assigned tasks, a concept of cognitive modeling was developed, which involves the use of knowledge about the connections between risks, goals, indicators for assessing port activities, as well as clarifying coefficients and the nature of their influence on each other in order to develop recommendations for managing the risks of a cargo port at based on queries to the ontological model. The simulation model within the framework of the proposed conceptual approach allows us to develop management decisions on adjusting the operational components of the system in order to prevent risk situations in the long term (at the tactical and strategic levels) taking into account the influence of external factors. Cognitive modeling is based in this work on the integration of logical-probabilistic, logical-ontological and simulation modeling.

Conclusion. As a result of the implementation of the set goals and objectives, a cognitive model of cargo port risk management was proposed. This model combines various types of modeling and takes into account different levels of management. As a result of experiments with a simulation model, the most effective recommendations generated based on a query to the ontological model are selected as management decisions.

Keyword: cognitive modeling; logical-ontological modeling; risk management; logical-probabilistic modeling; decision support; ontology; simulation modeling.

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

For citation: Bondareva I. O. Cognitive Modeling of Cargo Port Risk Management. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(4): 146-163 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-4-146-163>.

Received 15.11.2023

Accepted 02.12.2023

Published 21.12.2023

Введение

Условия развития современной рыночной конъюнктуры диктуют предприятиям наиболее динамично развивающихся отраслей, к которым бесспорно можно отнести и предприятия транспортной логистики, необходимость следования современным тенденциям управления организационными системами. Разработка и постоянное поэтапное использование методов и концепций управления различными бизнес-процессами является залогом стабильного развития компаний на рынке, а также укрепления конкурентных позиций. Наряду с этим современные организационные системы видят в качестве перспективного направления развития возможность предвосхищения и предвидения вероятных к наступлению нежелательных событий, которые могут нести негативный характер воздействия на деятельность организации и приводить к деструктивным последствиям [1, 2]. В связи с этим большое количество организационных систем, включая грузовые порты, на сегодняшний день озадачены разработкой действующего механизма управления рисками [3, 4], причем наличие в нем когнитивной составляющей является одним из ключевых элементов в силу развития современных интеллектуальных технологий управления знаниями и данными. **Цель работы** – повышение эффективности бизнес-процессов груз-

зового порта на основе использования технологии управления рисками, базирующейся на применении когнитивного моделирования.

Материалы и методы

Когнитивное моделирование управления рисками грузового порта основывается на идее использования концепции многоуровневого целеполагания и представляет собой последовательную структуру применения следующих методов и построения на их основе структурных и логических связей. В первую очередь на основе общеизвестного метода управления организационными системами Сбалансированная система показателей были определены 5 перспектив (финансы, клиенты, логистические процессы, а также внешняя и внутренняя социальная ответственность), в рамках которых сформулированы все цели грузового порта [5]. Определено, что недостижение целей представляет собой для порта рисковую ситуацию на стратегическом уровне управления, т.е. недостижение какой-либо цели порта – это риск для порта, связанный с этой конкретной целью. Так как структура целей согласно концепции ССП носит древовидное иерархическое строение, то можно сделать вывод о том, что недостижение любой из целей более низкого уровня обязательно негативно сказывается на генеральной цели порта. Согласно дан-

ному умозаключению и выстроена структура рисков грузового порта, основывающаяся на взаимозависимости всех структурных элементов. Далее причинно-следственные связи были дополнены показателями оценки достижимости целей, недостижение которыми нормативных значений рассматривается как риски тактического уровня управления. Риски операционного уровня сложились путем детализации части показателей оценки по ряду индикаторов детализации: видам грузов, видам оказываемых услуг и структурным подразделениям, что дало ещё большую возможность углубиться в причинно-следственную связь между рисками и элементами, их характеризующими и определяющими.

На основе структуры ССП были построены логическая и вероятностная модели, симбиоз которых представляет гибридную ЛВ-модель, объединяющую сценарии риска для объектов-целей и связанных с ними показателями оценки на различных уровнях управления. Данная модель позволяет сформулировать взаимосвязи между структурными элементами управления – рисками, целями, показателями и детализированными показателями [6, 7, 8].

ЛВ-модель с детально проработанными взаимосвязями и причинно-следственными явлениями стала основой для разработки онтологической модели управления рисками грузового порта [9].

Онтология O_{CPRM} управления рисками грузового порта была представлена в следующем виде [10]:

$$O_{CPRM} = \{OD^C, OD^O, OD^D, OD^A\},$$

где все элементы OD представляет утверждения, соответствующие уровню схемы онтологии O_{CPRM} , так связанные с ними множества представляют следующие утверждения: OD^C – утверждения, соответствующие сформулированным концептам (классам) онтологической модели; OD^O – утверждения, описывающие объектные свойства концептов онтологической модели, используемые для обозначения связей между концептами; OD^D – утверждения, характеризующие свойства данных и, наконец, OD^A – множество аксиом, определяющих и формулирующих основные ограничения для всех имеющихся элементов множеств OD^C, OD^O, OD^D [11].

Множество OD^C содержит три основных родительских класса концептов онтологической модели (рис.1):

$$OD^C = \{OD^C_G, OD^C_I, OD^C_R\},$$

где OD^C_G представляет класс концептов «Цели» и содержит сведения о Целях, сформулированных для порта; OD^C_I – класс «Показатели», содержит информацию о Показателях достижимости обозначенных целей; OD^C_R – класс «Риски», содержит сведения о Рисках, связанных целями и обозначенными показателями.

Множество OD^C_G , представляющее класс концептов «Цели», описывается следующей совокупностью:

$$OD^C_G = \{GN, OD^C_{DG}, OD^C_{LGS}\},$$

включает экземпляр GN , соответствующий главной цели грузового порта (повышение конкурентоспособности), и два дочерних класса: OD_{DG}^C – «Подцели», содержащий сведения о детализированных (уточняющих) Целях, а также OD_{LGS}^C – «Уровень целеполагания», содержащий сведения об уровнях целеполагания, к которым относятся каждая из детализированных целей. Таких уровней согласно ССП и ЛВ-модели было выделено четыре:

$$OD_{LGS}^C = \{OD_{1LGS}^C, OD_{2LGS}^C, OD_{3LGS}^C, OD_{4LGS}^C\},$$

OD_{1LGS}^C , OD_{2LGS}^C , OD_{3LGS}^C и OD_{4LGS}^C включают уточняющие Цели соответствующего уровня целеполагания (с 1 по 4).

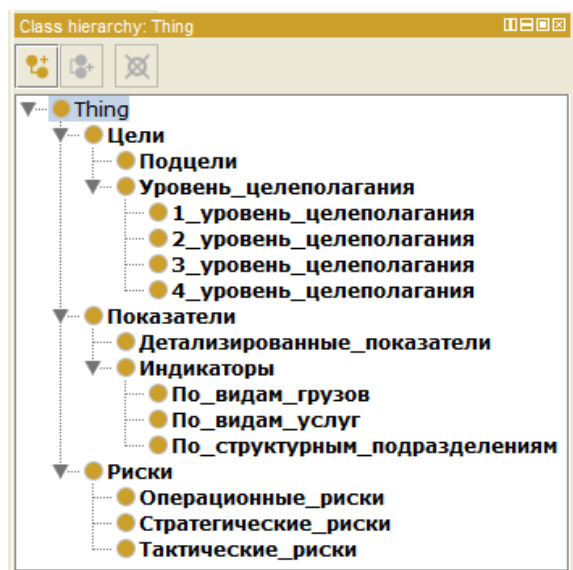


Рис. 1. Иерархическая структура классов онтологической модели

Fig. 1. Hierarchical structure of ontological model classes

Рис. 2 демонстрирует все экземпляры класса [12] «Цели», соответствующие целям порта, обозначенным в ССП и ЛВ-модели.

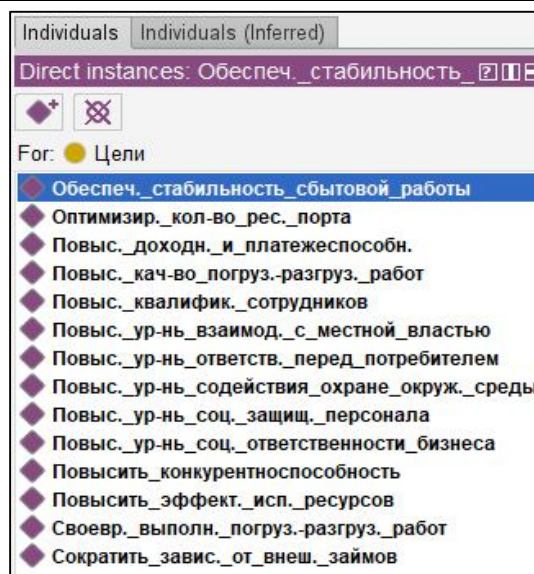


Рис. 2. Экземпляры класса «Цели»

Fig. 2. Instances of the class “Goals”

Необходимость представления целей в виде многоуровневой структуры (дерева целей) согласно специфике ССП в онтологической модели были созданы следующие связи, являющиеся по сути взаимнообратными: OD_{DbG}^O – «подразделяется_на_цель», позволяющая подразделить цель на уточняющие её подцели, и OD_{ClG}^O – «объединяется_в_цель», позволяющая объединить подцели в крупную цель высостоящего уровня. Наличие данных целей позволило осуществить построение дерева целей грузового порта с использованием редактора онтологий Protégé (рис. 3).

Условные обозначение экземпляров класса OD_G^C соответствуют обозначениям целей, принятым в построенной ЛВ-модели: GN_1 – сократить зависимости от внешних займов; GN_2 – повысить эффективность использования ресурсов; GN_3 – повысить уровень социальной ответственности бизнеса; GN_4 – по-

высить доходность и платежеспособность. Множество элементов класса OD_{ILGS}^C :

$$OD_{ILGS}^C = \{GN_1, GN_2, GN_3, GN_4\}.$$

Цель GN_1 детализируется на цели второго уровня целеполагания: GN_{11} – повысить квалификацию сотрудников и GN_{12} – повысить уровень ответственно-

сти перед потребителями. Цель GN_2 на: GN_{21} и GN_{22} – оптимизировать количество ресурсов порта. GN_3 – GN_{31} и GN_{32} – повысить уровень социальной защищенности персонала. Цель GN_4 детализируют GN_{41} и GN_{42} – обеспечить стабильность сбытовой работы.

$$OD_{2LGS}^C = \{GN_{11}, GN_{12}, GN_{21}, GN_{22}, GN_{31}, GN_{32}, GN_{41}, GN_{42}\}.$$

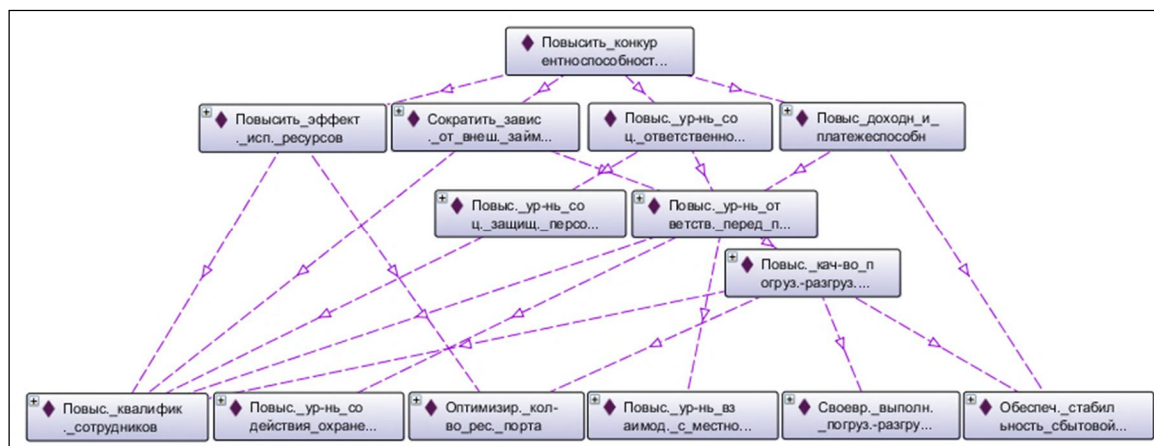


Рис. 3. Дерево целей грузового порта

Fig. 3. Tree of cargo port objectives

Третий уровень целеполагания представлен декомпозицией цели GN_{12} на следующие цели: GN_{11} , GN_{121} – повысить уровень содействия охране окружающей среды; GN_{122} – повысить уровень взаимодействия с местной властью; GN_{123} – повысить качество погрузочно-разгрузочных работ.

$$OD_{3LGS}^C = \{GN_{11}, GN_{121}, GN_{122}, GN_{123}\}.$$

На четвёртом уровне целеполагания представлены цели, декомпозирующие GN_{123} : GN_{11} , GN_{121} , GN_{21} , GN_{122} , GN_{1231} – своевременное выполнение погрузочно-разгрузочных работ и GN_{41} :

$$OD_{4LGS}^C = \{GN_{11}, GN_{121}, GN_{21}, GN_{122}, GN_{1231}\}.$$

Разработанная структура связей и определение характера этих связей были проверены на предмет правильности

построения данных связей с помощью встроенного в Protégé инструмента логического вывода Reasoner [13, 14]. Полученные с его помощью выводы позволили судить о корректности ввода данных, в том числе для взаимосвязи стратегической цели со всеми детализирующими (рис. 4). Записи на желтом (бежевом) фоне представляют непосредственно логические выводы, полученные на основе определения структуры связей между индивидами, записи на белом фоне – знания, заложенные в редактор вручную.

Аналогичным образом был задан и описан родительский класс «Показатели», представляющий множество следующих параметров:

$$OD^C_I = \{OD^C_{DI}, OD^C_{IDI}\},$$

где OD^C_{DI} представляет подкласс «Детализированные показатели», а OD^C_{IDI} – подкласс «Индикаторы», на основе которых осуществляется детализация показателей.

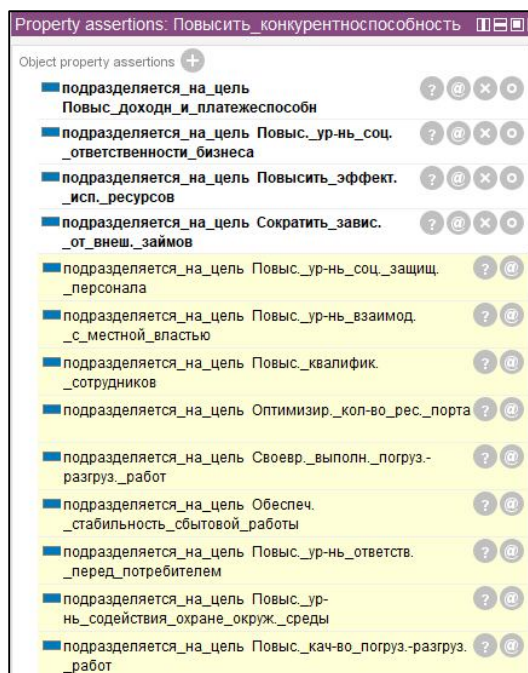


Рис. 4. Логические выводы инструмента Reasoner (взаимосвязь главной цели порта со всеми детализирующими)

Fig. 4. Logical conclusions of the Reasoner tool (relationship of the main goal of the port with all the detail ones)

Подкласс «Индикаторы» OD^C_{IDI} содержит ещё 3 подкласса:

$$OD^C_{IDI} = \{OD^C_{ICT}, OD^C_{ITS}, OD^C_{ISS}\},$$

характеризующих детализацию показателя по: OD^C_{ICT} – видам грузов; OD^C_{ITS} – видам предоставляемых услуг; OD^C_{ISS} – структурным подразделениям грузового порта.

Индикаторы оценки связаны с показателями связью DO^O_{DI} – «детализирует_показатель», и подразумевает, что показатель, связью DO^O_{DI} – «детализи-

руется_индикатором» (обратная связь DO^O_{DI}) детализируется на все имеющиеся индикаторы.

Помимо основных объектных свойств в онтологии присутствуют три составные связи: OD^O_{HI} «имеет_индикатор», OD^O_{DoI} «зависима_от_показателя» и OD^O_{DoDI} «зависима_от_индикатора», рассматриваемые также в качестве объектных свойств, но носящих составной характер. Создание данных связей позволило отразить «межуровневую» зависимость между целями, оценивающими их показателями и индикаторами детализации показателей.

Связь OD^O_{HI} «имеет_индикатор» состоит из цепочки связей OD^O_{SbI} «оценивается_показателем» и OD^O_{DI} «детализируется_на_индикатор», объединенными между собой оператором «о», с помощью которого задаются цепочки свойств, в owl-терминологии:

$$OD^O_{HI} = < OD^O_{SbI} \text{ o } OD^O_{DI} >.$$

Связь OD^O_{DoI} «зависима_от_показателя» обозначает, что, если цель подразделяется на цель, которая напрямую оценивается показателем, то эта цель будет зависима от показателя (оценивающего цель на нижнем уровне) и состоит из цепочки связей OD^O_{DbG} «подразделяется_на_цель» и OD^O_{SbI} «оценивается_показателем», в owl-терминологии:

$$OD^O_{DoI} = < OD^O_{DbG} \text{ o } OD^O_{SbI} >.$$

Связь OD^O_{DoDI} «зависима_от_индикатора» обозначает, что, если цель подразделяется на цель, которая напрямую оценивается показателем, который в свою очередь детализируется индикатором,

тором, то эта цель будет зависима от индикатора (детализирующего показатель на нижнем уровне) и состоит из цепочки связей OD^O_{DbG} «подразделяется_на_цель», OD^O_{Sbl} «оценивается_показателем» и OD^O_{Dtl} «детализируется_на_индикатор», в терминологии owl:

$$OD^O_{DoDI} = \langle OD^O_{DbG} \circ OD^O_{Sbl} \circ OD^O_{Dtl} \rangle.$$

Класс «Риски» OD^C_R по аналогии с основными классами «Цели» и «Показатели» включает в себя дочерние классы $\{OD^C_{SR}, OD^C_{TR}, OD^C_{OR}\}$, где OD^C_{SR} – стратегические риски, представляющие недостижение поставленной цели; OD^C_{TR} – тактические риски – недостижение показателем заданного нормативного значения; OD^C_{OR} – операционные риски – недостижение детализированным показателем заданного нормативного значения.

Все вышеперечисленные объектные свойства онтологической модели описаны следующей совокупностью (рис. 5):

$$OD^O = \{ OD^O_{DbG}, OD^O_{CtG}, OD^O_{EG}, OD^O_{Sbl}, OD^O_{DI}, OD^O_{Dtl}, OD^O_F, OD^O_{HI}, OD^O_{DoI}, OD^O_{DoDI} \}.$$

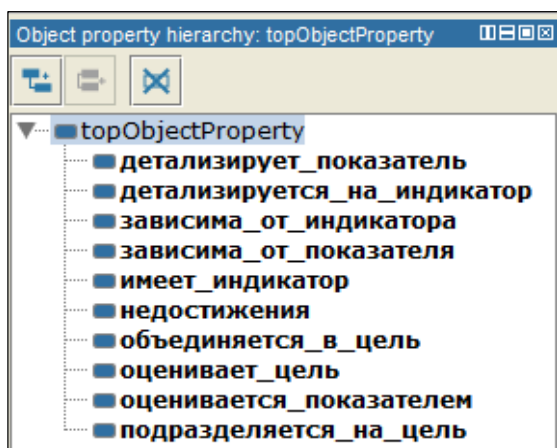


Рис. 5. Объектные свойства онтологической модели

Fig. 5. Object properties of the ontological model

Помимо объектных свойств в разработанной онтологической модели определены и заданы элементы Data properties, они необходимы для описания свойств данных OD^D экземпляров класса «Показатели».

Основными составляющими данного множества являются следующие вложенные свойства-данные:

$$OD^D = \{ OD^D_{FI} \}, OD^D_{FI} = \{ OD^D_I \},$$

$$OD^D_I = \{ OD^D_{SI} \},$$

где OD^D_{FI} – представляет свойство данных «Формула показателя» и включает составные вспомогательные показатели OD^D_{SI} , входящие в формулу расчета показателя, посредством соответствия свойства данных «Показатель» OD^D_I одноименному классу OD^C_I .

В качестве примера рассмотрим свойство данных «общее количество осуществленных работ». Оно распространяется на элементы класса «Показатели», используется для расчета показателя, соответствующего по наименованию свойству данных «Процент погрузочных работ, выполненных в срок», а также имеет стандартный тип свойства данных OD^D – «Строка» и принимает одно из значений «увеличивается», «уменьшается», либо «без изменения». Описание всех имеющихся свойств, включая объектные и свойства данных, связанных с конкретным экземпляром «Коэффициент абсолютной ликвидности» класса «Показатели» в качестве примера приведено на рис. 6.

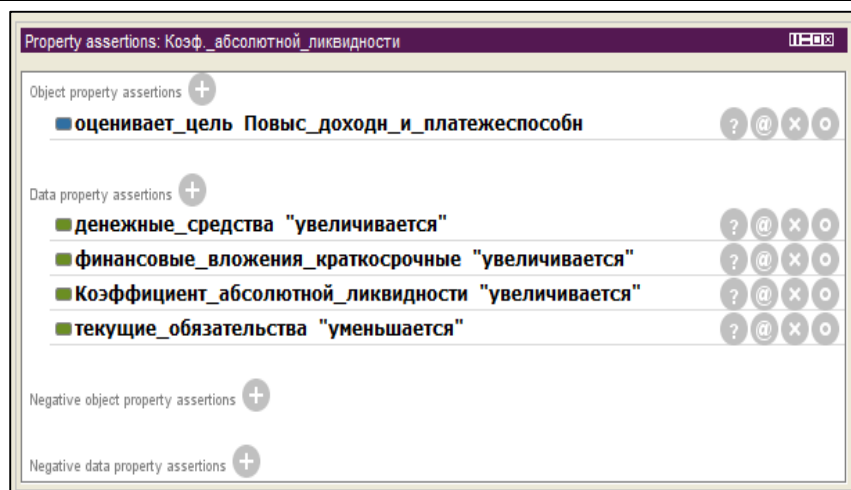


Рис. 6. Описание свойств, связанных с экземпляром «Коеффициент абсолютной ликвидности» класса «Показатели»

Fig. 6. Description of properties associated with the “Absolute liquidity ratio” instance of the “Indicators” class

Онтологическая модель управления рисками порта $OCPRM$ включает в себя ограничения OD^A , определяющие связи между классами и их экземплярами. Всего было определено 10 таких ограничений. В качестве примера приведены только некоторые из них:

1. Одну цель (подцель) может оценивать несколько показателей (отношение «один ко многим»):

$$OD_G^C 1 \xrightarrow{OD_{Sbl}^O} \infty OD_1^C.$$

2. Один показатель может оценивать несколько целей:

$$OD_1^C 1 \xrightarrow{OD_{EG}^O} \infty OD_G^C.$$

3. Одна цель может быть подразделена на несколько уточняющих (детализированных целей). Или цель может быть соотнесена с другой целью (включая подцель) отношением «один ко многим» для объектного свойства OD_{DbG}^O :

$$OD_G^C 1 \xrightarrow{OD_{DbG}^O} \infty OD_{DG}^C.$$

Результаты и их обсуждение

Представленная и описанная онтологическая модель управления рисками грузового порта включает все причинно-следственные связи между элементами, определенные концепцией многоуровневого целеполагания, базирующейся на методах ССП и ЛВ-моделирования. Онтологическая модель была реализована в редакторе онтологий Protégé, использующем язык онтологического моделирования OWL (англ. Web Ontology Language) [15, 16]. Инструментарий данного программного комплекса позволяет на основе выстроенных связей между всеми составными элементами онтологии осуществлять выборку различных параметров по определенным условиям.

Рассмотрим пример, соответствующий цепочке: цель «Повысить качество погрузочно-разгрузочных работ» подразделяется на цели «Повысить ква-

лификацию сотрудников», «Оптимизировать количество ресурсов порта», «Своевременное выполнение погрузочно-разгрузочных работ» и «Обеспечить стабильность сбытовой работы», которые оцениваются показателями «Процент сотрудников, квалификация которых соответствует занимаемой должности», «Затраты на обучение», «Процент погрузочных работ, выполненных в срок» (рассмотрим только те показатели, которые имеют детализацию), данные показатели детализируются по структурным подразделениям и по видам грузов. Согласно установленной цепочке свойств, цель «Повысить эффективность использования ресурсов» будет зависима от индикаторов по видам грузов: «Железо листовое», «Асбест», «Железо швеллер», «Песок», а также по структурным подразделениям: «Тальманский отдел», «Коммерческий отдел», «Руководство порта» и т.д. (рис.7).

Property assertions: Повыс_кач-во_пoгpуз.-paзгpуз._paбo
зависима_от_индикатора Железо_листовое
зависима_от_индикатора Технический_отдел
зависима_от_индикатора Тальманский_отдел
зависима_от_индикатора Асбест
зависима_от_индикатора Коммерческий_отдел
зависима_от_индикатора Руководство_порта
зависима_от_индикатора Обеспечивающие_отделы
зависима_от_индикатора Отдел_грузовых_операций
зависима_от_индикатора Складской_комплекс
зависима_от_индикатора Железо_швеллер
зависима_от_индикатора Песок

Рис. 7. Результат логического вывода цепочки «зависима_от_индикатора» от Reasoner

Fig. 7. Inference result of the "depends_on_indicator" chain from Reasoner

Помимо того, что инструмент Reasoner [17] выдаёт результаты на основе логических преобразований, он также даёт объяснение (или несколько, в зависимости от степени проработанности логических высказываний) каждому из них, так, например, логический вывод о том, что цель «Повысить конкурентоспособность» зависима от индикатора «Тальманский отдел», объясняется 36-ю различными способами (рис. 8).

Например, необходимо узнать, какие цели зависят от показателя «Коэффициент абсолютной ликвидности» и «Коэффициент интенсивного использования оборудования» (вместе) и что можно сделать, с показателями расчёта коэффициентов. Понятно, что, изменив один из этих показателей, мы повлияем на большинство связанных с ними целей, но представим ситуацию, в которой нам хотелось бы узнать, на какие цели повлияют эти показатели именно при совместном изменении.

Для этого в DL Query необходимо осуществить выборку по нескольким показателям. Результат показывает, что *совместное* изменение этих двух коэффициентов повлияет на такие цели, как «Повысить доходность и платежеспособность» и «Повысить конкурентоспособность» (рис. 9).

Далее с помощью инструмента SPARQL Query делаем запрос о значениях показателей (рис. 10).

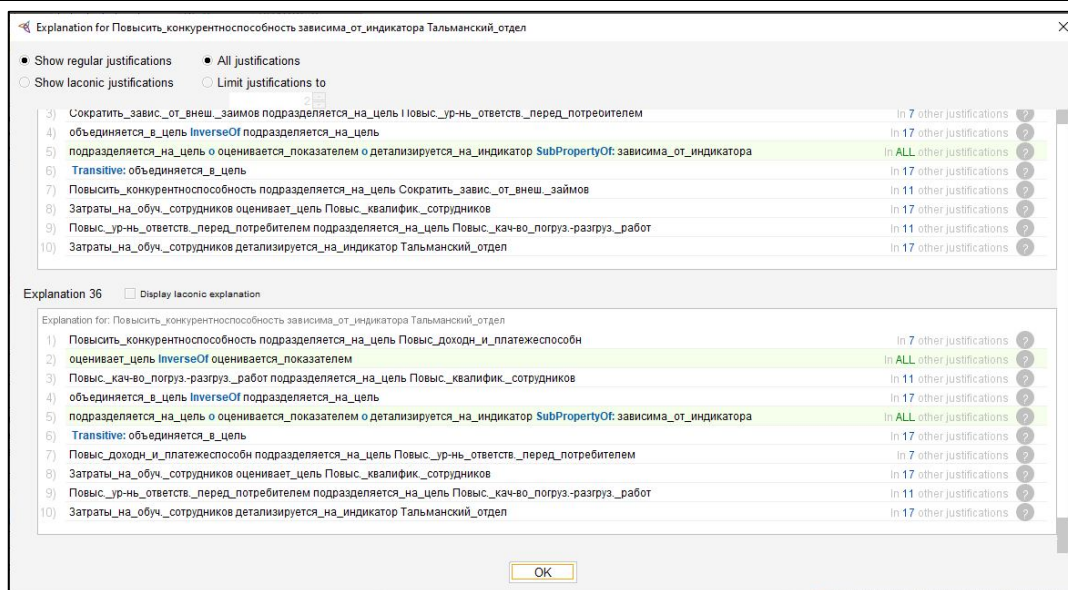


Рис. 8. Объяснение инструмента Reasoner получившегося результата

Fig. 8. Reasoner tool's explanation of the resulting result

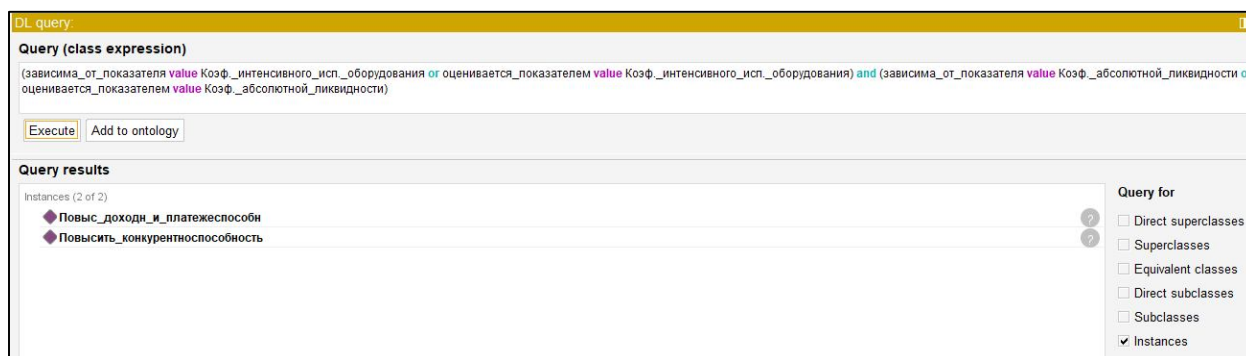


Рис. 9. Результат работы выборки

Fig. 9. Result of sampling

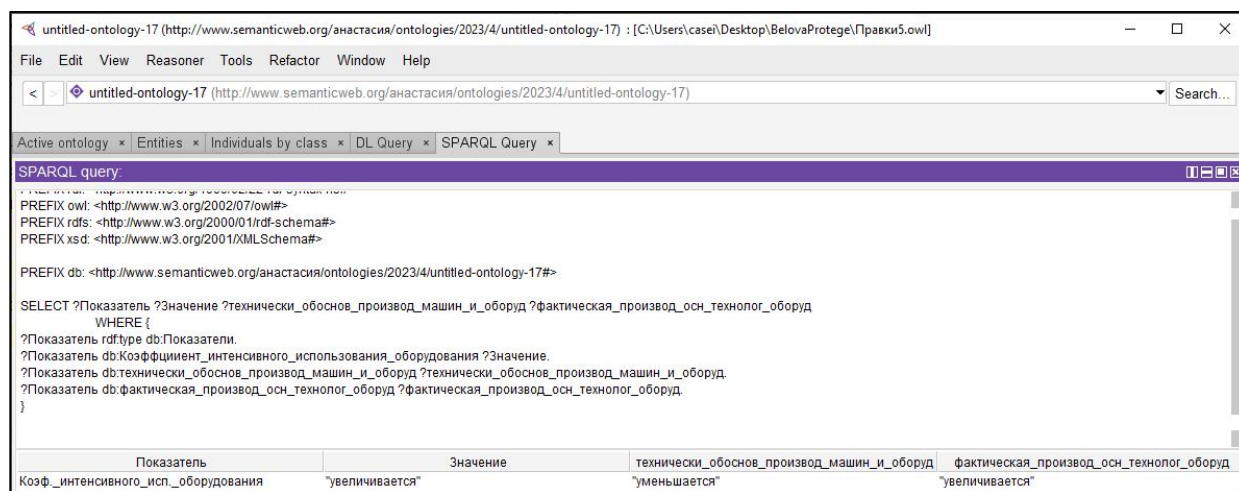


Рис. 10. Результат запроса в SPARQL Query

Fig. 10. Query result in SPARQL Query

В результате получаем, что чтобы «Коэффициент интенсивного использования оборудования» увеличился, нужно уменьшить параметр «технически обремененная производительность машин и оборудования» и увеличить «фактиче-

скую производительность основного технологического оборудования». Аналогично формируется запрос о показателе «Коэффициент абсолютной ликвидности». Результат отработки запроса представлен на рис. 11.

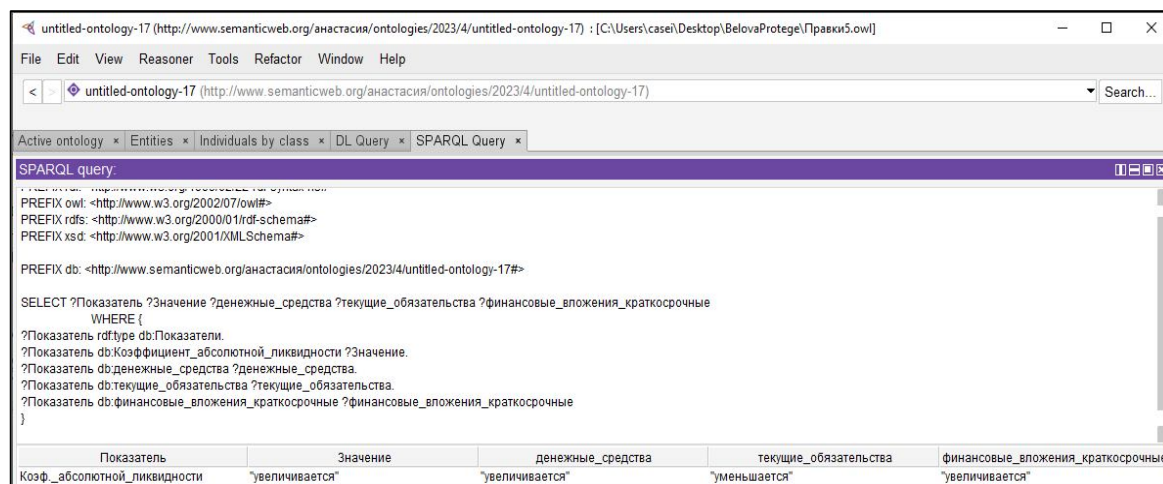


Рис. 11. Результат запроса в SPARQL Query

Fig. 11. Query result in SPARQL Query

Из запроса видно, что чтобы «Коэффициент абсолютной ликвидности» увеличился, нужно увеличить вложения «денежных средств», а также «финансовых краткосрочных вложений» и погасить «текущие обязанности».

Соответственно, исходя из рассмотренной ситуации, по результатам запросов можно сделать вывод о том, что, увеличив, например, фактическую производительность основного технологического оборудования порта и уменьшив текущие обязанности, можно повысить доходность и платежеспособность порта, тем самым повлияв на главную стратегическую цель компании — повышение конкурентоспособности.

С целью систематизации полученной структуры взаимодействия различ-

ных методов, используемых в данном исследовании, дополняющих и раскрывающих друг друга, и составляющих представленную в работе концепцию когнитивного моделирования управления рисками грузового порта, была построена схема, демонстрирующая этапность и характер применения используемых методов (рис. 12).

На основе рекомендаций, выработанных онтологической моделью, могут базироваться эксперименты с имитационной моделью, результаты которых используются с целью корректировки операционных характеристик для повышения эффективности управления на тактическом и стратегическом уровнях (рис.12) [18].

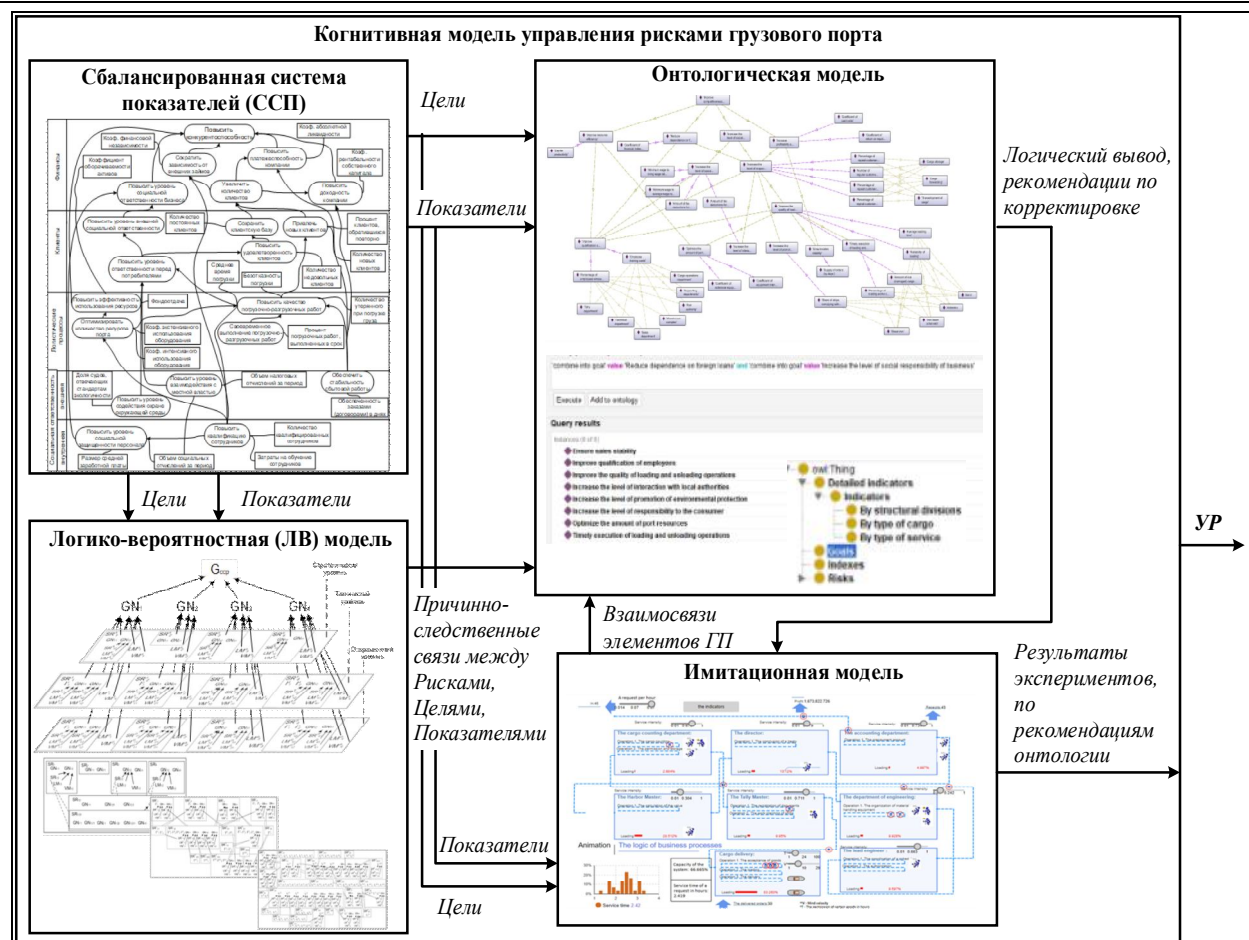


Рис. 12. Когнитивная модель управления рисками грузового порта

Fig. 12. Cognitive model of cargo port risk management

С другой стороны, имитационная модель является в некоторой степени поставщиком «знаний» для онтологической модели. На основании выявленных в имитационной модели закономерностей в онтологической модели выстраиваются дополнительные взаимосвязи со структурными характеристиками (элементами) имитационной модели, а также структурными элементами рассматриваемого экономического объекта – грузового порта. Т.е. наличие имитационной модели со всеми учтенными в ней элементами реальной системы позволяют ещё более детально проработать причинно-следственные связи между

элементами и наступающими событиями, а также предварительно проверить полученные рекомендации по корректировке режима работы того или иного элемента системы (грузового порта) и осуществить выбор наиболее приемлемого и эффективного управленческого решения [19, 20]. Таким образом, двойная направленность функционирования имитационной модели на онтологическую модель и наоборот наряду с использованием ССП и ЛВ-моделирования является исключительно передовым методом когнитивного моделирования, представленным в данной работе.

Выводы

По результатам сформулированной цели исследования была разработана технология когнитивного моделирования управления рисками грузового порта. Наличие когнитивной составляющей обеспечивается используемыми методами исследования: ЛВ-моделью, а именно построенными сценариями рисков, позволяющими получить четко выстроенную структуру взаимосвязей между рисками различных уровней управления, а также в логической описательной части данной модели, созданной на основе сценариев и дополняющей имеющиеся связи; онтологической моделью и её логической описательной составляющей, которая также выстроена на основе концепции многоуровневого целеполагания и ЛВ-модели, дополняя их различного рода отношениями – объектными свойствами и свойствами данных, определяющими характер и степень имеющихся взаимосвязей.

Имитационная модель в данной работе, с одной стороны, представляет собой инструмент прогнозирования и выявления возможных рисков ситуаций путем проведения экспериментов, расчета значений показателей и вероят-

ностей достижения целей, с другой стороны, дает возможность оценить характер влияния различных выработанных онтологической моделью рекомендательных решений по корректировке тех или иных параметров в условиях различных факторов влияния с целью выявления наиболее приемлемого и использования его в качестве управленческого решения. Выработка эффективных управленческих решений оперативного уровня позволяет добиваться желаемого результата – не наступления рискованных ситуаций – в более долгосрочной перспективе.

Следующий этап расширения онтологической модели автор видит в дополнении ее элементами имитационной модели и системы в целом (грузового порта), оказывающими влияние (прямое либо косвенное) на уточняющие коэффициенты, входящие в формулы расчета показателей оценки и детализированных показателей с целью ещё более глубокой проработки связей и характера влияния, например, различных ресурсных и параметрических составляющих на показатели (посредством их структурных составляющих коэффициентов), цели (посредством показателей) и риски (посредством влияния на цели).

Список литературы

1. Ho M. W., Ho (David) K. H. Risk management in large physical infrastructure investments: the context of seaport infrastructure development and investment // *Maritime Econom. Log.*. 2006. № 8 (2). Pp. 140–168. <https://doi.org/10.1057/palgrave.mel.9100153>

2. Emergency risk assessment and management / M. S. Gasparian, I. A. Kiseleva, V. A. Titov, L. A. Olenev // *Nexo Revista Científica*. 2022. Vol. 35. No. 1. Pp. 165-173. DOI 10.5377/nexo.v35i01.13927.
3. Бурдукова Н. Ю. Система управления рисками: сравнительный анализ методов управления рисками организации // *Modern Science*. 2022. № 8. С. 14-19.
4. Лаптева О. Г., Киселева Н. В. Автоматизация процесса управления рисками на предприятиях нефтегазовой промышленности: анализ автоматизированных систем управления рисками // *Вестник науки и образования*. 2021. № 5-1(108). С. 5-13.
5. Cognitive Model of the Balanced Scorecard of Manufacturing Systems / O. Protalinsky, A. Khanova, I. Bondareva [et al.] // *Studies in Systems, Decision and Control*. 2021. Vol. 337. Pp. 575-586. DOI 10.1007/978-3-030-65283-8_47.
6. Старжинская Н. В., Чернова А. И. Логико-вероятностное моделирование надежности удаленного автоматизированного радиотехнического поста Системы управления движением судов // *Морские интеллектуальные технологии*. 2022. № 3-1(57). С. 333-339. DOI 10.37220/MIT.2022.57.3.043.
7. Цицашвили Г. Ш. Логико-вероятностное моделирование по модульному принципу // *Дальневосточный математический журнал*. 2019. Т. 19, № 1. С. 114-118.
8. Балалов В. В. Применение компьютерных технологий динамического и логико-вероятностного моделирования для расчетов инженерных систем // *Актуальные проблемы строительной отрасли и образования - 2022: сборник докладов Третьей Национальной научной конференции (Москва, 19 декабря 2022 года)*. М.: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2023. С. 863-868.
9. Бондарева И.О. Комплексный анализ рисков грузового порта на основе логико-вероятностного и имитационного моделирования // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2020; 24(4): 91-106. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-91-106>.
10. Способ формирования дескриптивной модели процесса оперативного восстановления изделий ВВТ группировки ПВО на основе онтологий / О.В. Анисимов, В. А. Коробко, А.С. Догадов, А.Д. Зюзина // *Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли*. 2020. Т. 12. № 3. С. 30-46. doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-3-30-46
11. Bondareva I., Khanova A.A. Multi-level Management of Organizational Systems on the Basis of Risk Cascading, Logical-Probabilistic Modeling and Simulation. *Studies in Systems, Decision and Control*, vol/ 2022. 416. Springer, Cham.
12. Development an ontology based intelligence search system for goods for an online store on the CS-Cart platform / G. Gleb, Z. Vladimir, F. Aleksey, R. Anton // *Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем*. 2021. No. 5. P. 277-280.

13. Дедков Д. А. Программные продукты для создания онтологий. Система Protege // Тенденции развития Интернет и цифровой экономики: труды III Всероссийской с международным участием научно-практической конференции (Симферополь- Алушта, 04–06 июня 2020 года). Симферополь- Алушта, 2020. С. 205.
14. Фаррахова А. И. Создание онтологии процесса производства детали в редакторе Protege // Мавлютовские чтения: материалы XVI Всероссийской молодежной научной конференции (Уфа, 25–27 октября 2022 года). Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2022. Т. 6. С. 363-368.
15. Раюшкин Э. С., Колесникова В. О., Канубриков Н. Н. Построение онтологической модели "Астрономия" средствами программного обеспечения Protege // Молодой ученый. 2021. № 26(368). С. 27-32.
16. Окрушко Е. А. Создание двуязычной онтологии средствами программной оболочки PROTEGE // Российская наука: тенденции и возможности: сборник научных статей. Т. 4. М.: Из-во "Перо", 2020. С. 147-154.
17. Васильева Е. С., Сосорева А. И. Разработка онтологии по физическим эффектам в программе Protege // Инженерные кадры - будущее инновационной экономики России. 2020. № 4. С. 27-31.
18. Logical-probabilistic and simulation modeling as a toolkit for complex analysis and risk management of a cargo port / I. O. Bondareva, M. V. Shendo, T. V. Luneva, A. A. Khanova // E3S Web of Conferences, Moscow, 2020. Pp. 02027. DOI 10.1051/e3sconf/202022402027.
19. Simulation and risk management of financial activities in the digital economy era / M. S. Gasparian, I. A. Kiseleva, V. A. Titov, L. A. Olenov // Nexo Revista Científica. 2021. Vol. 34, № 4. Pp. 1388-1395. DOI 10.5377/nexo.v34i04.12684.
20. Stankovets A. V. Station Simulation with Anylogic in Logistics // Логистика в современном мире. Проблемы и решения: материалы Национальной мультиязычной научно-практической конференции. Новосибирск, 2021. С. 180-187.

References

1. Ho M. W., Ho (David), K. H. Risk management in large physical infrastructure investments: the context of seaport infrastructure development and investment. *Maritime Econom. Log.*, 2006, no. 8 (2), pp. 140–168. <https://doi.org/10.1057/palgrave.mel.9100153>
2. Gasparian M. S., Kiseleva I. A., Titov V. A., Olenov L. A. Emergency risk assessment and management. *Nexo Revista Científica*, 2022, vol. 35, no 1, pp. 165-173. DOI 10.5377/nexo.v35i01.13927.
3. Burdukova N. Yu. Sistema upravleniya riskami: sravnitel'nyi analiz metodov upravleniya riskami organizatsii [Risk management system: comparative analysis of organizational risk management methods]. *Modern Science*, 2022, no 8, pp. 14-19.

4. Lapteva O. G., Kiseleva N. V. Avtomatizatsiya protsessa upravleniya riskami na predpriyatiyakh neftegazovoi promyshlennosti: analiz avtomatizirovannykh sistem upravleniya riskami [Automation of the risk management process at oil and gas industry enterprises: analysis of automated control systems]. *Vestnik nauki i obrazovaniya = Bulletin of Science and Education*, 2021, no 5-1(108), pp. 5-13.

5. Protalinsky O., Khanova A., Bondareva I. [et al.] Cognitive Model of the Balanced Scorecard of Manufacturing Systems. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2021, vol. 337, pp. 575-586. DOI 10.1007/978-3-030-65283-8_47.

6. Starzhinskaya N. V., Chernova A. I. Logiko-veroyatnostnoe modelirovanie nadezhnosti udalennogo avtomatizirovannogo radiotekhnicheskogo posta Sistemy upravleniya dvizheniem sudov [Logical-probabilistic modeling of the reliability of a remote automated radio technical post of a ship traffic control system]. *Morskije intellektual'nye tekhnologii = Marine Smart Technologies*, 2022, no. 3-1(57), pp. 333-339. DOI 10.37220/MIT.2022.57.3.043.

7. Tsitsiashvili G. Sh. Logiko-veroyatnostnoe modelirovanie po modul'nomu printsipu [Logical-probabilistic modeling according to the modular principle]. *Dal'nevostochnyi matematicheskii zhurnal = Far Eastern Mathematical Journal*. 2019, vol 19, no 1, pp. 114-118.

8. Balalov V. V. [Application of computer technologies of dynamic and logical-probabilistic modeling for calculations of engineering systems]. *Aktual'nye problemy stroitel'noi otrasli i obrazovaniya - 2022. Sbornik dokladov Tret'ei Natsional'noi nauchnoi konferentsii* [Current problems of the construction industry and education - 2022. Collection of reports of the Third National Scientific Conference]. Moscow, 2023, pp. 863-868 (In Russ).

9. Bondareva I. O. Comprehensive Risk Analysis of a Cargo Port Based on Logic-Probabilistic and Simulation Modeling. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(4): 91-106 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-91-106>.

10. Anisimov O.V., Korobko V. A., Dogadov A.S., Zyuzina AD. Sposob formirovaniya deskriptivnoi modeli protsessa operativnogo vosstanovleniya izdelii VVT gruppировки PVO na osnove ontologii [A method for forming a descriptive model of the process of operational restoration of weapons and military equipment of an air defense group based on ontologies]. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli = High Technology in Space Exploration of the Earth*, 2020, vol 12, no 3, pp. 30-46. doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-3-30-46.

11. Bondareva I., Khanova A.A. "Multi-level Management of Organizational Systems on the Basis of Risk Cascading, Logical-Probabilistic Modeling and Simulation". *Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 2022, 416. Springer, Cham.

12. Gleb G., Vladimir Z., Aleksey F., Anton R. Development an ontology based intelligence search system for goods for an online store on the CS-Cart platform. *Otkrytye semanticheskie tekhnologii proektirovaniya intellektual'nykh system = Open Semantic Technologies for Designing Intelligent Systems*, 2021, no. 5, pp. 277-280.

13. Dedkov D. A. [Software products for creating ontologies. Protege system]. *Tendentsii razvitiya Internet i tsifrovoy ekonomiki. Trudy III Vserossiiskoi s mezhdunarodnym uchastiem nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Proceedings of the III All-Russian scientific and practical conference with international participation]. Simferopol-Alushta, 2020. 205 p. (In Russ).
14. Farrakhova A. I. [Creating an ontology of the part production process in the Protege editor]. *Mavlyutovskie chteniya. Materialy XVI Vserossiiskoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii* [Mavlyutov's readings. Materials of the XVI All-Russian Youth Scientific Conference]. Ufa, 2022, vol 6, pp. 363-368. (In Russ)
15. Rayushkin E. S., Kolesnikova V. O., Kanubrikov N. N. Postroenie ontologicheskoi modeli "Astronomiya" sredstvami programmnoy obespecheniya Protégé [Construction of the ontological model "Astronomy" using Protege software]. *Molodoi uchenyi = Young Scientist*. 2021, no 26(368), pp. 27-32.
16. Okrushko E. A. [Creation of a bilingual ontology using the PROTEGE software shell]. *Rossiiskaya nauka: tendentsii i vozmozhnosti. Sbornik nauchnykh statei* [Russian science. Trends and opportunities. Collection of scientific articles]. Moscow, Pero Publ., 2020, vol. 4, pp. 147-154 (In Russ.).
17. Vasil'eva E. S., Sosoreva A. I. Razrabotka ontologii po fizicheskim effektam v programme Protégé [Development of an ontology for physical effects in the Protege program]. *Inzhenernye kadry - budushchee innovatsionnoi ekonomiki Rossii = Engineering Personnel - the Future of the Innovative Economy of Russia*, 2020, no 4, pp. 27-31.
18. Bondareva I. O., Shendo M. V., Luneva T. V., Khanova A. A. Logical-probabilistic and simulation modeling as a toolkit for complex analysis and risk management of a cargo port. *E3S Web of Conferences*, Moscow, 2020, pp. 20-27. DOI 10.1051/e3sconf/202022402027.
19. Gasparian M. S., Kiseleva I. A., Titov V. A., Olenov L. A. Simulation and risk management of financial activities in the digital economy era. *Nexo Revista Científica*, 2021, vol. 34, no 4, pp. 1388-1395. DOI 10.5377/nexo.v34i04.12684.
20. Stankovets A. V. Station Simulation with Anylogic in Logistics. *Logistika v sovremennom mire. Problemy i resheniya: materialy Natsional'noi mul'tiyazychnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Logistics in the modern world. Problems and solutions. Materials of the National Multilingual Scientific and Practical Conference]. Novosibirsk, 2021, pp. 180-187.

Информация об авторе / Information about the Author

Бондарева Ирина Олеговна, кандидат технических наук, доцент, Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Российская Федерация, e-mail: i.o.bondareva@mail.ru

Irina O. Bondareva, Cand of Sci. (Engineering), Associate Professor, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation, e-mail: i.o.bondareva@mail.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). Пристательные 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: 305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, 94. ЮЗГУ, редакционно-издательский отдел.

Тел.(4712) 22-25-26, тел/факс (4712) 50-48-00.

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>.