

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия

**Юго-Западного
государственного
университета**

Научный журнал

Том 26 № 1 / 2022



Proceedings

**of the Southwest
State University**

Scientific Journal

Vol. 26 № 1 / 2022



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

Научный рецензируемый журнал

Основан в 1997 г.

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

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

В журнале публикуются оригинальные работы, 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: 05.13.05; 2.3.1; 2.3.2; 2.3.3; 2.3.4; 2.3.6; 1.2.2.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

Бхаттачарья Сиддхартха PhD, профессор, ректор Раджнагар Махалавидья (филиал Университета Бурдвана) (Индия);

Бьянко Лино, д-р философии (PhD), профессор международной академии архитектуры, профессор Университета архитектуры, строительства и геодезии (г. София, Болгария), старший преподаватель Университета Мальты (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, профессор РАН, 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, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия);

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

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

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

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

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

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

Грабовый Кирилл Петрович, Московский государственный строительный университет (национальный исследовательский 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 №ФС77-42691 от 16.11.10).

ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

Префикс DOI:10.21869

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

© Юго-Западный государственный университет, 2022



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 31.03.2022.

Дата выхода в свет 30.05.2022. Формат 60x84/8.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 19,9.

Тираж 1000 экз. Заказ 25.

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: 05.13.05; 2.3.1; 2.3.2; 2.3.3; 2.3.4; 2.3.6; 1.2.2..

EDITOR-IN-CHIEF

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

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

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

EDITORIAL BOARD

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

Bhattacharya Siddhartha PhD, Professor, Rector of Rajnagar Mahalavidya (Burdwan University Branch) (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);

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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);

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

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

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

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

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

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

Vladimir I. Kolchunov, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Russian Academy of Architecture
and Construction Sciences Advisor, 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
(ПИ №ФЦ77-42691 of 16.11.10).

ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

DOI Prefix:10.21869

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

Printing office:

Printing Center

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

Subscription and distribution:

the journal is distributed by subscription.
Subscription index 41219
in the General Catalogue "Pressa Rossii"

Publication frequency: quarterly

Free price

Original lay-out design: E. Mel'nik

© Southwest State University, 2022



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

Singed to print 31.03.2022.

Release date 30.05.2022. Format 60x84/8.

Offset paper. Printer's sheets 19,9.

Circulation 1000 copies. Order 25.

16+

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Оригинальные статьи

Демпфирующий резец с автоматической сменой режущей пластины.....	8
<i>Новиков С.Г., Малыхин В.В., Гайдаш Н.М.</i>	

СТРОИТЕЛЬСТВО

Оригинальные статьи

Сравнительный анализ типовых и энергоэффективных решений малоэтажного жилого здания на основе BIM-модели	20
<i>Бредихин В.В., Кулаков К.Ю., Учнина Т.В., Пышная А.С.</i>	
Эксплуатация светлого излучателя на биогазе	43
<i>Ермаков Н.О., Чуйкин С.В.</i>	

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Оригинальные статьи

Методика выбора способа управления распределенными информационными системами в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры.....	57
<i>Клименко А. Б.</i>	
Модель и методика формирования оптимальной совокупности оборудования контроля и поверки предприятий автомобилестроительного кластера.....	73
<i>Аверченкова Е.Э., Шабанов А.А.</i>	
Технология виртуального сопряжения в процессе имитационного моделирования сложнофункциональных модулей систем управления промышленных роботов и многокоординатных мехатронных систем	92
<i>Зеленский А.А., Жданова М.М., Абдуллин Т.Х., Воронин В.В.</i>	
Совместное моделирование нечеткой двусвязной системы управления продольным точением в MSC.Adams и Matlab	116
<i>Белоусов А. В., Рыбина А. В.</i>	
Моделирование течения неньютоновских жидкостей в тороидальном канале инерционного вискозиметра с системой технического зрения	129
<i>Корнаева Е. П., Стебаков И. Н., Корнаев А. В., Дрёмин В. В.</i>	
Реализация агентно-базированных метакомпьютерных систем и приложений.....	148
<i>Карамышева Н.С., Свищев Д.С., Попов К.В., Зинкин С.А.</i>	
К сведению авторов	172

CONTENT

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original articles

Damping Cutters with Variable Rigidity	8
---	----------

Novikov S.G., Malykhin V.V., Gaidash N.M.

CONSTRUCTION

Original articles

Comparative Analysis of Typical and Energy-Efficient Solutions of a Low-Rise Residential Building Based on a Bim Model	20
---	-----------

Bredikhin V. V., Kulakov K. Y., Uchinina T. V., Pyshnaya A. S.

Operation of a Light Emitter on Biogas	43
---	-----------

Ermakov N. O., Chuikin S. V.

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Original articles

A Technique of the Distributed Information Systems Control Method Choice under the High Network Dynamics Conditions	57
--	-----------

Klimenko A. B.

Model and Methodology for Optimal Equipment Setting for Monitoring and Verification of Enterprises of the Automotive Cluster	73
---	-----------

Averchenkova E. E., Shabanov A. A.

Virtual Interface Technology in the Process of Simulation of Complex Functional Modules of Control Systems for Industrial Robots and Multi-Axis Mechatronic Systems.....	92
---	-----------

Zelensky A. A., Zhdanova M. M., Abdullin T. Kh., Voronin V. V.

Joint Modeling of a Fuzzy Two-Connected Longitudinal Turning Control System in MSC. Adams and Matlab	116
---	------------

Belousov A. V., Rybina A. V.

Non-Newtonian Fluid Flow Modeling in the Inertial Viscometer with a Computer Vision System	129
---	------------

Kornaeva E. P., Stebakov I. N., Kornaev A. V., Dremine V. V.

Implementation of Agent-Based Metacomputersystems and Applications.....	148
--	------------

Karamysheva N. S., Svishchev D. S., Popov K.V., Zinkin S. A.

information of the authors	172
---	------------

Демпфирующий резец с автоматической сменой режущей пластины

Новиков С.Г.¹, Малыхин В.В.²✉, Гайдаш Н.М.²

¹ Региональный открытый социальный институт
ул. Маяковского, д. 85, г. Курск 305009, Российская Федерация

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

✉ e-mail: malykhin1946@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Важнейшей задачей в области машиностроения является увеличение эффективности производства за счет рационального использования оборудования, повышения производительности труда, уменьшения трудоемкости технологических операций при обеспечении требуемого качества. В неавтоматизированном производстве механизированы только рабочие движения инструмента. Установка, настройка и замена инструмента, а также контроль над его состоянием осуществляются оператором или наладчиком. Решение проблемы повышения производительности токарных операций возможно только путем автоматизации вспомогательных движений.

Одним из нескольких существующих способов сокращения вспомогательного времени является автоматическая замена непереключаемых режущих пластин в токарных резцах. Однако известные конструкции подобных сборных резцов не позволяют достичь требуемого качества обработки из-за неэффективности демпфирования возникающих в процессе резания вибраций. Точность обработки при резании во многом зависит от конструкции инструмента и используемых при его изготовлении материалов. Эти материалы в конструкции инструмента рассеивают энергию колебаний, таким образом уменьшают вибрацию и обеспечивают получение требуемой точности.

Целью и задачами разработки является повышение качества обработки и стойкости инструмента за счет конструктивных решений, увеличивающих жесткость резцов и значительно демпфирующих колебания при точении.

Методы. Использование материала с высоким демпфированием для снижения вибраций.

Результаты. Увеличение эффективности демпфирования колебаний резца за счет виброизоляции его сборных частей от державки материалом с высоким демпфированием.

Заключение. Предлагаемый демпфирующий резец с автоматической сменой режущей пластины позволяет достичь технического результата по повышению качества обработки, стойкости инструмента и увеличить время между сменами режущей пластины.

Ключевые слова: демпфирующий сборный резец; державка; сменная режущая пластина; материал с высоким демпфированием; качество обработки; стойкость инструмента; виброизоляция.

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

Для цитирования: Новиков С.Г., Малихин В.В., Гайдаш Н.М. Демпфирующий резец с автоматической сменой режущей пластины // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(1): 8-19. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-8-19>.

Поступила в редакцию 26.11.2021

Подписана в печать 09.02.2022

Опубликована 31.03.2022

Damping Cutters with Variable Rigidity

Sergei G. Novikov ¹, Vitaliy V. Malykhin ² ✉, Nikolay M. Gaidash ²

¹ Regional Open Social Institute
85 Mayakovsky str., Kursk 305009, Russian Federation

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

✉ e-mail: malykhin1946@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The most important task in the field of mechanical engineering is to increase production efficiency through the rational use of equipment, increase in labor productivity, and reduce the labor intensity of technological operations while ensuring the required quality. In manual production, only the working movements of the tool are mechanized. Installation, adjustment and replacement of the tool, as well as control over its condition, are carried out by the operator or the fitter. The solution to the problem of increasing the productivity of turning operations is possible only by automating auxiliary movements.

One of several existing ways to reduce non-regrowth time is the automatic replacement of non-regrowth cutting inserts in turning tools. However, the known designs of such assembled cutters do not allow achieving the required quality of processing due to the ineffectiveness of damping vibrations arising during the cutting process. The machining accuracy during cutting largely depends on the design of the tool and the materials used in its manufacture. These materials in the construction of the tool dissipate vibration energy, thus reducing vibration and ensuring the required accuracy.

The purpose and objectives of the development are to improve the quality of processing and tool life through design solutions that increase the rigidity of the cutters and significantly damping vibrations during turning.

Methods. Use of high damping material to reduce vibration.

Results. Increasing the efficiency of damping vibrations of the cutter due to vibration isolation of its prefabricated parts from the holder with a material with high damping.

Conclusion. The proposed damping cutter with automatic change of the cutting insert allows you to achieve a technical result to improve the quality of processing, tool life and increase time between insert changes.

Keywords: damping assembly cutter; holder; replaceable cutting insert; high damping material; processing quality; tool durability; vibration isolation.

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

For citation: Novikov S.G., Malykhin V.V., Gaidash N.M. Damping Cutters with Variable Rigidity. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(1): 8-19 (In Russ.). [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2022-26-1-8-19](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-8-19).

Received 26.11.2021

Accepted 09.02.2022

Published 31.03.2022

Введение

Точность обработки деталей в машиностроении связана с многочисленными факторами, взаимодействующими в процессе формообразования поверхностей. При токарной обработке важнейшую роль играет инструмент, а именно, резец и материалы, используемые в его конструкции [1,2,3,4,5,6,7,8,9].

Одним из перспективных направлений совершенствования инструмента является применение демпфирующих резцов, для уменьшения и исключения негативного влияния вибраций на точность и качество обработки. Авторами предложено несколько конструкций резцов [2,3,10,11,12-14,15,16,17] с упругой связью с системой станок-приспособление-инструмент-деталь (СПИД), при этом в одних резцах режущая пластина с узлом ее крепления демпфирующей вставкой изолирована от державки, а в других – вставка из материала с высоким демпфированием разделяет державку с режущей пластиной от резцедержателя, что позволяет:

- снизить уровень вибрации в процессе за счет возможности минимизации воспринимаемых державкой сил резания путем подбора жесткости материала с высоким демпфированием вставки;

- повысить качество обработки изделий, так как демпфирующая вставка не дает возможности контактирования режущей пластины с державкой или державки с резцедержателем, поэтому происходит высокоэффективное демпфирование различных вибраций [7] и ударных нагрузок, возникающих в процессе резания [2-6,10,11,7,12,13,14,18,19].

Общим недостатком указанных демпфирующих резцов является то, что в их конструкциях не предусмотрена автоматическая смена режущей пластины.

Важнейшей задачей в области машиностроения является повышение эффективности производства и производительности труда [20] путем рационального использования оборудования, уменьшения трудоемкости технологических операций при обеспечении требуемого качества [20]. Решением проблемы повышения производительности токарных операций и сокращения вспомогательного времени является автоматическая замена неперетачиваемых режущих пластин в токарных резцах. Однако, известные конструкции [1, 16, 20, 21] подобных сборных резцов не обеспечивают требуемого качества обработки из-за неэффективности демпфирования, возникающих в процессе резания вибраций.

Известны работы [8,9], в которых приведены резцы с автоматической сменой изношенной режущей пластины. Анализ конструкций сборных резцов [8,9] с механизмом автоматической смены режущей пластины показал наличие следующих недостатков:

Наличие в конструкции двух цилиндрических и пакета тарельчатых пружин, расположенных последовательно в державке, значительно снижает жесткость резца [21] и не позволяет достигнуть требуемых качества обработки и стойкости инструмента.

Втулка, фиксирующая на державке опорную пластину, изготовлена из материала, не обладающего свойством высокого демпфирования, поэтому не уменьшает возникающие вибрации.

Толкатель, цилиндрический штифт и шток не виброизолированы от державки, что также не позволяет создать обработанную поверхность необходимого качества.

Цель работы. Повышение качества обработки и стойкости инструмента разработкой конструкции резца с виброгасящими свойствами и автоматической сменой изношенной пластины.

Материалы и методы

Технический результат по повышению качества обработки и стойкости резца достигается тем, что в резце с автоматической сменой изношенной режущей пластины применены детали, выполненные из материала с высоким демпфированием и установленные в

державке резца с предварительным напряжением сжатия.

На рисунке представлена разработанная конструкция демпфирующего резца.

Резец состоит из державки 1, в которой размещены режущая пластина 2 с опорной пластиной 3, [18,20], механизма сброса режущей пластины 2, включающий толкатель 5, который взаимодействует с боковой поверхностью пластины 2, размещенный в направляющей [20] втулке 6, механизм закрепления пластины 2, состоящий из пластинчатой пружины 7 для взаимодействия с передней поверхностью режущей пластины, шток 9 с регулировочной гайкой 10, цилиндрический штифт 11 для взаимодействия с отверстием режущей пластины 2, установленный с возможностью осевого перемещения в отверстиях, выполненных в опорной пластине 3 и державке 1.

Шток 9 имеет клиновой участок 12 [18] для взаимодействия с цилиндрическим штифтом 11, размещенным соосно с регулировочным винтом 14. Толкатель 5 установлен с возможностью взаимодействия с вставкой 15 между его торцом и державкой 1. Цилиндрический штифт 11 расположен на подпятнике 16, установленным над регулировочным винтом 14. Шток 9 размещен в цилиндрической втулке 17 с возможностью взаимодействия с упомянутой регулировочной гайкой 10. Вставка 15, подпятник 16, цилиндрическая 17, фиксирующая 4 и регулировочно-направ-

ляющая 6 втулки выполнены из материала с высоким демпфированием. Вставка 15 и подпятник 16 установлены в державке 1 с предварительным напряжением сжатия.

Подготовку демпфирующего сборного резца к работе производят в такой последовательности.

Вставка 15, подпятник 16, цилиндрическая 17, фиксирующая 4 и регулировочно-направляющая 6 втулки изготовлены из материала с высоким демпфированием, могут гасить радиальные и осевые вибрации, а также эксплуатироваться под различными напряжениями и испытывать значительные деформации.

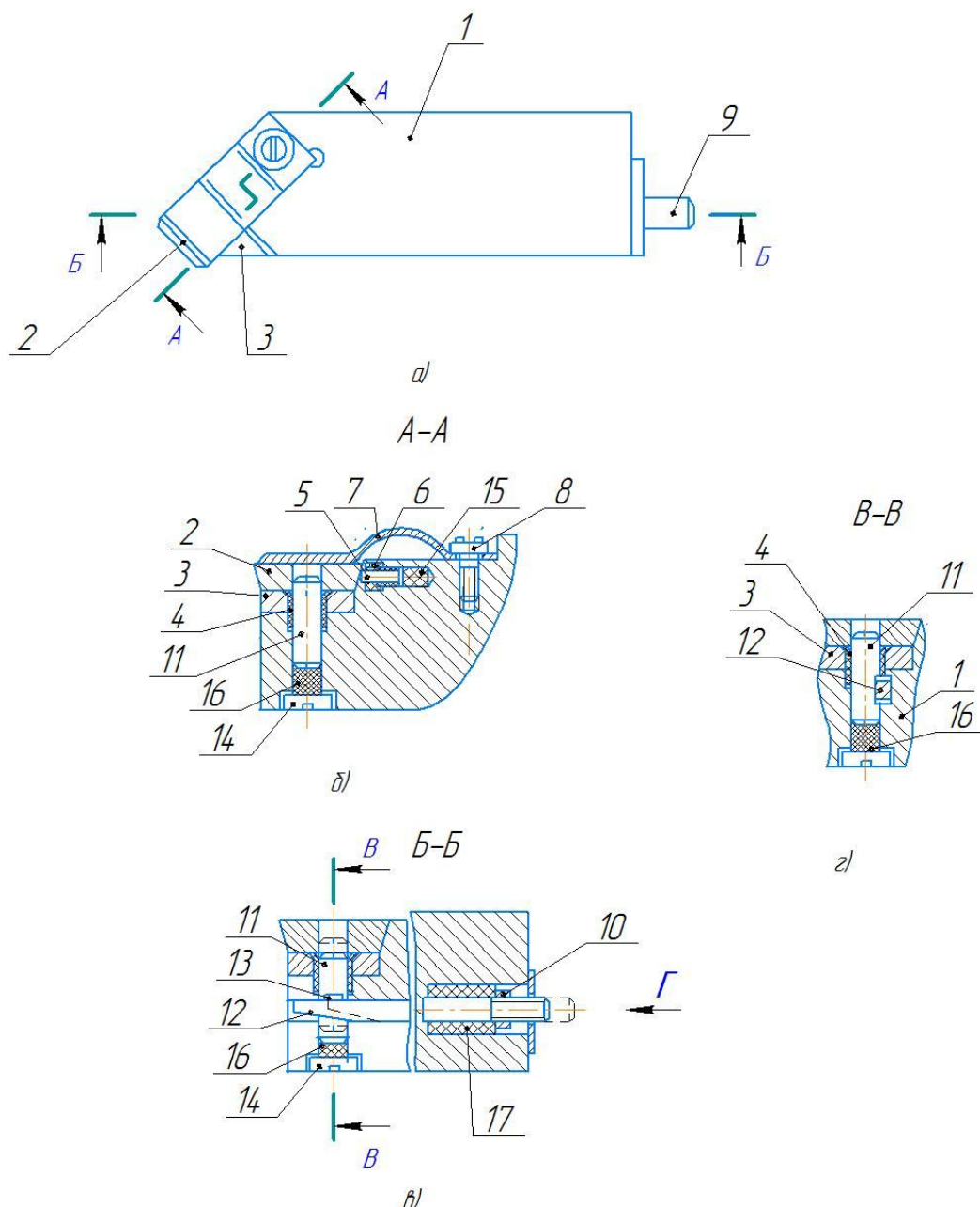


Рис. 1. Демпфирующий сборный резец с автоматической сменой режущей пластины

Fig. 1. Damping cutter assembled with automatic change of cutting insert

Подпятник 16 устанавливают регулировочным винтом 14 в державке 1 с предварительным напряжением сжатия, обеспечивающим усилие для расположения цилиндрического штифта 11 в центральном отверстии режущей пластины 2. Регулировочно-направляющей втулкой 6 обеспечивают сжатие вставки 15 и необходимое взаимодействие толкателя 5 с боковой поверхностью режущей пластины 2. Клиновой участок 12 штока 9 располагают в наклонной лыске 13 цилиндрического штифта 11 таким образом, чтобы штифт 11 находился в режущей пластине 2, а регулировочная гайка 10 взаимодействовала с цилиндрической втулкой 17.

Пластинчатую пружину 7, взаимодействующую с передней поверхностью режущей пластины 2, фиксируют посредством винта 8 на державке 1.

Работа демпфирующего резца, с учетом источников [19, 20, 21], выполняется в следующей последовательности.

При обработке изделия в сборных частях резца возникают колебания, которые необходимо минимизировать. Радиальные и осевые колебания толкателя 5 демпфируют регулировочно-направляющая втулка 6 и вставка 15; цилиндрического штифта 11 – соответственно фиксирующая втулка 4 и подпятник 16; радиальные вибрации штока 9 – цилиндрическая втулка 17. В результате происходит значительное снижение вибраций всего резца, а следовательно, повышение качества обработки, т.к. составные сборные части виброизолированы от державки 1.

Замена изношенной режущей пластины 2, как указано в источнике [18], выполняется в следующей последовательности: выключают станок, на шток 9 в направлении стрелки «Г» воздействуют штоком пневмоцилиндра. При этом шток 9 при помощи гайки 10 сжимает цилиндрическую втулку 17, смещается в направлении цилиндрического штифта 11, и клиновой участок 12, воздействуя на стенку наклонной лыски 13, перемещает штифт 11 вниз. Верхняя часть штифта 11 выходит из отверстия в режущей пластине 2, и толкатель 5 под действием силы упругости предварительно сжатой вставки 15 выталкивает режущую пластину 2 из под пластинчатой пружины 7. Длину и ход толкателя 5 выбирают такими, чтобы часть поверхности режущей пластины 2 оставалась под пластинчатой пружиной 7 при полном выдвижении толкателя 5 [18]. В этом случае зазор от нижней поверхности пластинчатой пружины 7 до верхней плоскости опорной пластины 3 сохраняется равным толщине режущей пластины 2. Исполнительный орган загрузочного устройства (не показан) устанавливает новую режущую пластину на открытый участок опорной пластины 3, проталкивает режущую пластину под пружину 7, сжимает торцом толкателя 5 вставку 15 и одновременно выталкивает изношенную режущую пластину 2. В тот момент, когда отверстие новой режущей пластины окажется под штифтом 11, снимается усилие на штоке 9. Под действием первоначально

сжатой цилиндрической втулки 17 [18] шток 9 смещается вправо, штифт 11 под действием силы сжатия [18] вставки 16 входит в отверстие режущей пластины 2. Включают станок и продолжают процесс резания с эффективным демпфированием вибраций, так как возможно осуществлять регулирование жесткостей сборных частей и самого резца в зависимости от обрабатываемого материала [19] и технологических режимов резания, что повышает качество обработки, увеличивает стойкость инструмента и время между сменами режущей пластины.

Результаты и их обсуждение

Оригинальностью предложенного демпфирующего сборного резца является то, что толкатель 5 установлен с возможностью взаимодействия с вставкой 15 между его торцом и державкой 1, цилиндрический штифт 11 расположен на подпятнике 16, установленным над регулировочным винтом 14, шток 9 размещен в цилиндрической втулке 17 с возможностью взаимодействия с упомянутой регулировочной гайкой 10, при

этом вставка 15, подпятник 16, цилиндрическая 17, фиксирующая 4 и направляющая 6 [19] втулки выполнены из материала с высоким демпфированием, кроме того, вставки 15 и 16 установлены в державке с предварительным напряжением сжатия. Результатом реализации оригинальной конструкции резца является:

1. Улучшение качества обработки и стойкости инструмента за счет повышения эффективности гашения колебаний резца виброизоляцией его сборных частей от державки материалом с высоким демпфированием.

2. Увеличение времени между сменами режущей пластины, так как возможно осуществление регулирования жесткостей сборных частей и самого резца изменением свойств обрабатываемого материала и технологических режимов резания.

Выводы

Таким образом, предлагаемый демпфирующий сборный резец позволяет достичь цели по повышению качества обработки и стойкости инструмента.

Список литературы

1. Пат. 2009768 Рос. Федерация: МПК⁵ B23B27/00. Резец. В.А. Рогов; заявитель патентообладатель Российский университет дружбы народов. №5014352/08; заявл. 02.12.91; опубл. 30.03.94. 3с.
2. Пат. 2 457 077 Рос. Федерация: МПК B23B27/0. Демпфирующий резец. С.Г. Новиков, В.В. Малыхин, Е.И. Яцун [и др.]; заявитель патентообладатель ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ). № 2011 106 621/02; заявл. 22.02.2011; опубл. 27.07.2012, Бюл. № 21.

3. Новиков С.Г., Малыхин В.В., Яцун Е.И. [и др.] Повышение устойчивости процесса точения демпфирующим резцом // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. №3(36). С.122-125.

4. Малыхин В.В., Яцун Е.И., Новиков С.Г. Повышение эксплуатационных характеристик демпфирующих резцов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2012. №2. С.43-46.

5. Разработка конструкции экспериментального образца демпфирующего резца // В.В. Малыхин, Е.И. Яцун, С.Г. Новиков, А.А. Фадеев // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сборник научных трудов XI-ой Международной научно-практической конференции: в 4т., Курск, 2014. Т. 4. С.234-238.

6. Малыхин В.В., Яцун Е.И., Новиков С.Г. Виброакустическая диагностика состояния режущего инструмента и микронеровностей обработанной поверхности // Справочник. Инженерный журнал, 2014. №14. С.31-35.

7. Разработка конструкций демпфирующих резцов / В.В. Малыхин, Е.И. Яцун, Ю.Н. Селезнев, С.Г. Новиков // Химическая и нефтегазовое машиностроение. 2016. № 11. С.25-27.

8. Пат. 2 535196 Рос. Федерация: МПК В23В27/00. Демпфирующий резец с управляемой жесткостью. С.Г. Новиков, В.В. Малыхин, Е.И. Яцун и [др.]; заявитель патентообладатель ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ). № 2013113649/02; заявл. 26.03.2013; опубл.10.12.2014, Бюл. № 34.

9. Демпфирующие резцы постоянной жесткости и упругой связью с системой «Станок-инструмент-деталь» / С.Г. Емельянов, В.В. Малыхин, Е.И. Яцун, С.Г. Новиков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. Вып. 8. Ч.2. С.22-31.

10. Яцун Е.И., Малыхин В.В., Новиков С.Г. Разработка и исследование конструкций демпфирующих резцов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 8. Ч.1. С.287-296.

11. Пат. 2 479385 Рос. Федерация, МПК В23В27/00. Демпфирующий резец с регулируемой жесткостью / С.Г. Новиков, В.В. Малыхин, Е.И. Яцун [и др.]; патентообладатель ФБОУ ВПО «Юго-западный государственный университет» (ЮЗГУ). №2011141683/02; заявл. 13.10.2011. Оpubл. 20.04.2013, Бюл. №11.

12. Пат. 2 511 193 Рос. Федерация, МПК В23В27/00. Универсальный демпфирующий резец с регулируемой жесткостью / С.Г. Новиков, В.В. Малыхин, Е.И. Яцун [и др.]; патентообладатель ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ). № 2012144043/02; заявл. 16.10.2012. Оpubл.10.04.2014, Бюл. №10.

13. Пат. 2 621 939, Рос. Федерация, МПК В23В27/00. Универсальный демпфирующий резец с управляемой жесткостью / С.Г. Новиков, В.В. Малыхин, Е.И. Яцун [и

др.]; патентообладатель ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ). № 2015116208/02. Заявл. 28.04.2015. Оpubл. 08.06.2017, Бюл. №16.

14. Инструментальное обеспечение процессов механической обработки твердыми сплавами и композитами / Е.И. Яцун, В.В. Малыхин, О.С. Зубкова, С.Г. Новиков. Курск, 2016. С.160-124.

15. А.С. 1252062 СССР кл. В23В27/16 Сборный резец / В. Л. Федоров, В.В. Копылова, Э.Н. Дьякова, патентообладатель Университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы № 4932261/08 заявл. 11.03.91; опубл. 23.05.93, Бюл. № 19.

16. Пат. 2 457 078 Рос. Федерация: МПК В23В27/00. Универсальный демпфирующий резец. С.Г. Новиков, В.В. Малыхин, Е.И. Яцун; заявитель патентообладатель ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ).- № 2010145193/02. Заявл. 03.11.2010. Оpubл. 27.07.2012. Бюл. № 21.

17. Пат. 2686500 21 Рос. Федерация: МПК В23В27/00. Демпфирующий резец. С.Г. Новиков, В.В. Малыхин, В.А. Волосухин, Р.В. Глаголев; заявитель патентообладатель ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ). № 2018133445; заявл. 21.09.2018. Оpubл. 29.04.2019. Бюл. № 13.

18. Пат. 1816540 СССР: МПК В23В27/16. Сборный резец. В.Л. Федоров, В.В. Копылов и Э.Н. Дымова; заявитель патентообладатель Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы- №4932261/08; заявл. 11.03.91; опубл. 23.05.93. Бюл. № 19.

19. Новиков С.Г., Малыхин В.В., Яцун Е.И. Резцы с державкой в упругой вставке// Фізичні та комп'ютерні технології. Матеріали XXII Міжнародної науково-практичної конференції, 7-9 грудня 2016, м. Харків, Д.: ЛІРА, 2016. С. 157-161

20. Вицко А. В. Автореферат магистерской работы. Разработка конструкции резца с расширенными технологическими возможностями для токарных станков с ЧПУ. <https://masters.donntu.org/2004/mech/vitsko/diss/index.htm>

21. Новиков С.Г., Малыхин В.В., Яцун Е.И. Конструкция демпфирующего резца с переменной жесткостью по длине державки // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. №1(23). С.31-42.

References

1. Rezets [Cutter]: US Pat. 2009768 Rus. Federation: MPK5 В23В27 / 00 / V.A. Rogov; заявитель' patentoobladatel' Rossiiskii universitet druzhby narodov [Applicant patentee Peoples' Friendship University of Russia]. No. 5014352/08; declared 12/02/91; publ. 03/30/94. 3 p.

2. Dempfiruyushchii rezets [Damping cutter]: US Pat. 2 457 077 Rus. Federation: IPC В23В27 / 00; S.G. Novikov, V.V. Malykhin, E.I. Yatsun [and others]; applicant patentee

FGBOU VPO "South-West State University" (SWSU). No. 2011 106 621/02; declared 02.22.2011; publ. 07/27/2012, Bul. No. 21.

3. Novikov S.G., Malykhin V.V., Yatsun E.I. [and others]. Povyshenie ustoichivosti protsessa tocheniya dempfiruyushchim reztsom [Increasing the stability of the turning process with a damping cutter]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2011, no. 3 (36), pp.122-125.

4. Malykhin V.V., Yatsun E.I., Novikov S.G. Povyshenie ekspluatatsionnykh kharakteristik dempfiruyushchikh reztsov [Improving the performance of damping cutters]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2012, no. 2, pp. 43-46.

5. Malykhin V.V., Yatsun E.I., Novikov S.G., Fadeev A.A. [Development of the design of an experimental sample of a damping cutter]. *Sovremennye instrumental'nye sistemy, informatsionnye tekhnologii i innovatsii. Sbornik nauchnykh trudov XI-oi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Modern instrumental systems, information technologies and innovations. Collection of scientific papers of the XI-th International scientific-practical conference]. Kursk, 2014, vol. 4, pp. 234-238 (In Russ.).

6. Malykhin V.V., Yatsun E.I., Novikov S.G. Vibroakkusticheskaya diagnostika sostoyaniya rezhushchego instrumenta i mikronerovnostei obrabotannoi poverkhnosti [Vibroacoustic diagnostics of the state of the cutting tool and microroughness of the processed surface]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal = Handbook. Engineering magazine*, 2014, no. 14, pp.31-35.

7. Malykhin V.V., Yatsun E.I., Seleznev Yu.N., Novikov S.G. Razrabotka konstruksii dempfiruyushchikh reztsov [Development of damping cutter designs]. *Khimicheskaya i neftegazovoe mashinostroenie = Chemical and Oil and Gas Engineering*, 2016, no. 11, pp.25-27.

8. Dempfiruyushchii rezets s upravlyaemoi zhestkost'yu [Damping cutter with controlled rigidity]: US Pat. 2 535196 Rus. Federation: IPC B23B27 / 00 / S.G. Novikov, V.V. Malykhin, E.I. Yatsun and etc.]; applicant patent holder FSBEI HPE "South-West State University" (SWSU). No. 2013113649/02; declared 03/26/2013; publ. 10.12.2014, Bul. No. 34.

9. Emelyanov S.G., Malykhin V.V., Yatsun E.I., Novikov S.G. Dempfiruyushchie reztsy postoyannoi zhestkosti i uprugoi svyaz'yu s sistemoi «Stanok-instrument-detal'» [Damping cutters of constant stiffness and elastic connection with the "Machine-tool-detail" system]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. = Bulletin of the Tula State University. Technical Science*, 2017, is. 8, part 2, pp.22-31.

10. Yatsun E.I., Malykhin V.V., Novikov S.G. Razrabotka i issledovanie konstruksii dempfiruyushchikh reztsov [Development and research of structures of damping cutters].

Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Bulletin of the Tula State University. Technical Science, 2016, is. 8, part 1, pp.287-296.

11. Pat. 2 479385 Rus. Federation, MPK B23B27 / 00. Dempfiruyushchii rezets s reguliruemoi zhestkost'yu [Damping cutter with adjustable stiffness] / S.G. Novikov, V.V. Malykhin, E.I. Yatsun [and others]; patentee of FBOU VPO "Southwestern State University" (SWSU). No. 2011141683/02; declared 13.10.2011. Publ. 04/20/2013, Bul. No. 11.

12. Pat. 2 511 193 Rus. Federation, IPC B23B27 / 00. Universal'nyi dempфирuyushchii rezets s reguliruemoi zhestkost'yu [Universal damping cutter with adjustable rigidity] / S.G. Novikov, V.V. Malykhin, E.I. Yatsun [and others]; patentee of FGBOU VPO "South-West State University" (SWSU). No. 2012144043/02; declared 16.10.2012. Publ. 10.04.2014, Bul. No. 10.

13. Pat. 2 621 939, Rus. Federation, MPK B23B27 / 00. Universal'nyi dempфирuyushchii rezets s upravlyaemoi zhestkost'yu [Universal damping cutter with controlled rigidity] / S.G. Novikov, V.V. Malykhin, E.I. Yatsun [and others]; patentee of FGBOU VPO "South-West State University" (SWSU). No. 2015116208/02. Appl. 28.04.2015. Publ. 08.06.2017, Bul. No. 16.

14. Yatsun E.I., Malykhin V.V., Zubkova O.S., Novikov S.G. *Instrumental'noe obespechenie protsessov mekhanicheskoi obrabotki tverdymi splavami i kompozitami* [Instrumental support of machining processes with hard alloys and composites]. Kursk, 2016, pp. 160-124.

15. A.S. 1252062 USSR class. B23B27 / 16 Sbornyi rezets [Collected cutter] / V.L. Fedorov, V.V. Kopylova, E.N. Dyakova, patent holder Peoples' Friendship University named after Patrice Lumumba No. 4932261/08 app. 03/11/91; publ. 05/23/93, Bul. No. 19.

16. Universal'nyi dempфирuyushchii rezets [Universal damping cutter]: US Pat. 2 457 078 Rus. Federation: IPC B23B27 / 00; S.G. Novikov, V.V. Malykhin, E.I. Yatsun; applicant patent holder FSBEI HPE "South-West State University" (SWSU). No. 2010145193/02. Appl. 03.11.2010. Published on July 27, 2012. Bul. No. 21.

17. Dempфирuyushchii rezets [Damping cutter]: US Pat. 2686500 21 Rus. Federation: IPC B23B27 / 00; S.G. Novikov, V.V. Malykhin, V.A. Volosukhin, R.V. Glagolev; applicant patent holder FGBOU VPO "South-West State University" (SWSU) .- No. 2018133445; declared 21.09.2018. Published on April 29, 2019. Bul. No. 13.

18. Sbornyi rezets [Collected cutter]: US Pat. 1816540 USSR: IPC B23B27 / 16 V.L. Fedorov, V.V. Kopylov and E.N. Dymova; applicant patentee Peoples' Friendship University of Russia Patrice Lumumba - No. 4932261/08; declared 03/11/91; publ. 05/23/93. Bul. No. 19.

19. Novikov S.G., Malykhin V.V., Yatsun E.I. Reztsy s derzhavkoi v uprugoi vstavke [Cutters with a holder in an elastic insert]. *Fizichni ta komp'yuterni tekhnologii. Materiali KhKh11 Mizhnarodnoi naukovo-praktichnoi konferentsii = Physical and computer technol-*

ogies. Materials XX11 of the International Scientific and Practical Conference, 7-9 March 2016, M. Kharkiv, D.: LIRA, 2016, pp. 157-161.

20. Vitsko A. V. Avtoreferat magisterskoi raboty. Razrabotka konstruktсии reztsa s ras-shirennymi tekhnologicheskimi vozmozhnostyami dlya tokarnykh stankov s ChPU [Abstract of master's work. Development of a cutter design with advanced technological capabilities for CNC lathes]. [https:// masters.](https://masters.)

21. Novikov S.G., Malykhin V.V., Yatsun E.I. Konstruktsiya dempfiruyushchego reztsa s peremennoi zhestkost'yu po dline derzhavki [Damping cutter design with variable stiffness along the length of the holder]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*, 2019, no. 1 (23), pp.31-42.

Информация об авторах / Information about the Authors

Новиков Сергей Григорьевич, кандидат технических наук, доцент, Региональный открытый социальный институт, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: novikov.s.46@mail.ru

Sergei G. Novikov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Regional Open Social Institute, Kursk, Russian Federation, e-mail: novikov.s.46@mail.ru

Мальных Виталий Викторович, кандидат технических наук, доцент, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: malykhin1946@mail.ru

Vitaliy V. Malykhin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: malykhin1946@mail.ru

Гайдаш Николай Михайлович, кандидат технических наук, доцент, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mtio@kurskstu.ru

Nikolay M. Gaidash, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: mtio@kurskstu.ru

Сравнительный анализ типовых и энергоэффективных решений малоэтажного жилого здания на основе BIM-модели

В.В. Бредихин¹, К.Ю. Кулаков², Т.В. Учинина³ ✉, А.С. Пышная³

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

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ),
Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва 129337, Российская Федерация

³ Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
ул. Титова, д. 28, г. Пенза 440028, Российская Федерация

✉ e-mail: tatiana-Vladim@yandex.ru

Резюме

Энергоэффективные решения позволяют сократить объемы потребляемых ресурсов, что ведет к снижению совокупной стоимости владения недвижимостью. Применение BIM-модели позволяет оценить ключевые показатели энергоэффективных решений: коэффициент теплообмена, удельные годовые значения потребления энергии, расхода топлива, выделения углекислого газа в атмосферу.

Цель исследования. Разработка и определение целесообразности внедрения энергетически эффективных решений на основе использования BIM-модели малоэтажного здания.

Методы. Методология базируется на изучении внедрения современных строительных технологий и норм в Пензенском регионе, а также анализе положительных решений аналогичных ситуаций в РФ. Для достижения цели решены следующие задачи: разработана BIM-модель и оценена энергоэффективность типового жилого здания; определены варианты повышения энергоэффективности типового малоэтажного жилого здания; составлен энергетический отчет по типовому и энергоэффективному зданиям и обоснована целесообразность внедрения энергетически эффективных решений в типовую проект.

Результаты. При разработке энергоэффективных решений целесообразно применение современных цифровых технологий. BIM-модель типового малоэтажного жилого здания позволяет выделить термоблоки, зоны внутри каждого из них, а также конструктивные элементы здания, через которые происходят основные теплопотери, и разработать варианты повышения энергоэффективности здания. По выделенным в здании термоблокам и зонам разработаны энергоэффективные решения, благодаря которым теплопотери через оконные проемы и входную дверь снижены с 3,04 до 0,63 Вт/м²К и с 2,11-0,79 Вт/м²К соответственно. Теплопотери при изменении конструкции ограждающих конструкций: стены и перекрытия над первым этажом снизились с 0,28 до 0,25 Вт/м²К и с 0,18 до 0,15 Вт/м²К соответственно.

Заключение. BIM-модель здания позволяет эффективно провести сравнительный анализ типовых и энергоэффективных решений малоэтажных зданий с учетом особенностей планировочного решения и региональных климатических особенностей.

Ключевые слова: малоэтажное строительство; энергоэффективность; энергосбережение; показатель энергоэффективности; удельное потребление энергоресурсов, BIM-моделирование,

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

Для цитирования: Сравнительный анализ типовых и энергоэффективных решений малоэтажного жилого здания на основе BIM-модели / В.В. Бредихин, К.Ю. Кулаков, Т.В. Учинина, А.С.Пышная // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(1): 20-42. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-20-42>.

Поступила в редакцию 14.01.2022

Подписана в печать 21.02.2022

Опубликована 31.03.2022

Comparative Analysis of Typical and Energy-Efficient Solutions of a Low-Rise Residential Building Based on a Bim Model

Vladimir V. Bredikhin ¹, Kirill Y. Kulakov ², Tatyana V. Uchinina ³ ✉,
Alena S. Pyshnaya ³

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

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)
26 Yaroslavskoe highway, Moscow 129337, Russian Federation

³ Penza State University of Architecture and Construction (PGUAS)
28 Titova str., Penza 28440028, Russian Federation

✉ e-mail: tatiana-Vladim@yandex.ru

Abstract

Energy efficient solutions reduce the amount of resources consumed, which leads to a lower total cost of ownership of real estate. The use of the BIM model makes it possible to evaluate the key indicators of energy-efficient solutions: heat transfer coefficient, specific annual values of energy consumption, fuel consumption, and carbon dioxide emissions into the atmosphere.

Purpose of research. *Develop and determine the feasibility of introducing energy efficient solutions based on the use of a BIM model of a low-rise building.*

Methods. *The methodology is based on the study of the introduction of modern building technologies and standards in the Penza region, as well as the analysis of positive solutions to similar situations in the Russian Federation. To achieve the goal, the following tasks were solved: a BIM model was developed and the energy efficiency of a typical residential building was assessed; options for improving the energy efficiency of a typical low-rise residential building were identified; an energy report was drawn up for standard and energy-efficient buildings and the expediency of introducing energy-efficient solutions into a standard project was substantiated.*

Results. *When developing energy-efficient solutions, it is advisable to use modern digital technologies. The BIM model of a typical low-rise residential building makes it possible to identify thermal blocks, zones within each of them, as well as structural elements of the building through which the main heat losses occur and develop options for improving the energy efficiency of the building. Based on the thermal blocks and zones allocated in the building, energy-efficient solutions have been developed, thanks to which heat losses through window openings and the front door are reduced from 3.04 to 0.63 W/m²K and from 2.11-0.79 W/m²K, respectively. Heat losses due to changes in the design of enclosing structures: walls and floors above the first floor decreased from 0.28 to 0.25 W/m²K and from 0.18 to 0.15 W/m²K, respectively.*

Conclusions. *The BIM model of a building makes it possible to effectively conduct a comparative analysis of standard and energy-efficient solutions for low-rise buildings, taking into account the features of the planning solution and regional climatic features.*

Keywords: *low-rise construction; energy efficiency; energy saving; energy efficiency indicator; specific consumption of energy resources, BIM modeling*

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

For citation: Bredikhin V. V., Kulakov K. Y., Uchinina T. V., Pyshnaya A. S. Comparative Analysis of Typical and Energy-Efficient Solutions of a Low-Rise Residential Building Based on a Bim Model. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(1): 20-42 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-20-42>.

Received 14.01.2022

Accepted 21.02.2022

Published 31.03.2022

Введение

Увеличение численности населения планеты, прогрессирующий рост потребления энергоресурсов и их стоимости побуждают к разработке и внедрению энергетически эффективных решений, позволяющих снизить эксплуатационные энергозатраты, что ведет к снижению совокупной стоимости владения объекта недвижимости [1,2,3,4,5, 6]. Отечественные и зарубежные исследователи ведут работу в области рационального энергопотребления [7,8], использования возобновляемых энергисточников [9,10,11], поскольку именно строительная отрасль имеет все шансы стать той отраслью экономики, где внедрение программ энергосбережения наиболее эффективно [12,13]. Помимо экономических аспектов необходимо учитывать и экологические, такие как: загрязнение атмосферы при использовании энергоресурсов [14,15,16], ухудшение существования человека в усло-

виях крупных агломераций при выбросе парниковых газов [17,18]. Переход к энергоэффективным зданиям в малоэтажном жилищном строительстве позволит решить указанные проблемы [19, 20,21,22,23]. Применение BIM-модели здания позволяет оценить ключевые показатели энергоэффективных решений: коэффициент теплообмена, удельные годовые значения потребления энергии, расхода топлива, выделения углекислого газа в атмосферу.

Цель исследования - разработка и определение целесообразности внедрения энергетически эффективных решений на основе использования BIM-модели малоэтажного здания.

В качестве объекта исследования выступает проект типового малоэтажного здания с заданными параметрами.

Методы внедрения энергетически эффективных решений в типовой проект и способы определения их целесообразности выступают **предметом исследования**.

Материалы и методы

Модель исследования включает в себя три этапа:

- разработка BIM-модели и оценка энергоэффективности типового жилого здания;
- определение вариантов повышения энергоэффективности типового малоэтажного жилого здания;
- составление энергетического отчета по типовому и энергоэффективному зданиям и выявление целесообразности внедрения энергетически эффективных решений в типовой проект.

В рамках первого этапа исследования применяем метод знакового и математического моделирования: BIM-модель типового жилого здания, создана в программе ArchiCad, оценка энергоэффективности типового жилого здания выполнена с использованием СП 131.13330.2020 «Строительная климатология» с учетом требований [24], при этом для выполнения проекта использованы общие проектные данные, такие как местоположение модели, широта, долгота, высота над уровнем моря, геометрия здания, общая площадь пола, измеренная площадь пола, площадь оболочки, вентилируемый объем, коэффициент остекления, параметры оболочки здания, инфильтрация при 50 Па, коэффициенты теплообмена и некоторые другие.

На втором этапе использования применен метод анализа, когда в еди-

ной разработанной ранее BIM-модели выделены отдельные термоблоки, имеющие типовые конструктивные решения, что позволило перейти к разработке вариантов энергоэффективных решений.

Положения, позволяющие выявить целесообразность внедрения энергетически эффективных решений в типовой проект, сформированы на третьем этапе. Для этого авторы применили метод математического моделирования, синтеза и индукции, применяемый для обобщения полученных результатов [18].

Результаты и их обсуждение

Разработка BIM-модели и оценка энергоэффективности типового жилого здания

В рамках работы был разработан типовой проект одноэтажного кирпичного жилого здания. Эскизный проект объекта представлен в приложении к отчету.

В рамках первой задачи этапа в программе ArchiCad создана BIM модель типового жилого здания.

В табл. 1 приведены основные проектные данные типового малоэтажного здания для оценки энергоэффективности.

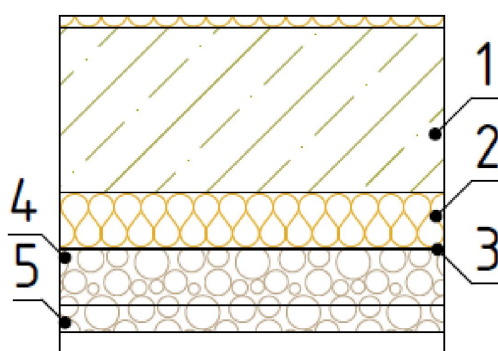
Расчет теплотерь проводился согласно климатическим данным по г. Пензе (СП 131.13330.2020 «Строительная климатология»). При проектировании типового жилого здания были соблюдены все строительные нормы, правила и стандарты.

Таблица 1. Общие проектные данные**Table 1.** General design data

Местоположение модели / Model location	Пензенская обл., г. Пенза / Penza region, city of Penza
Широта:	55°45' 00'' С
Долгота:	37°35' 00'' В
Высота над уровнем моря:	169,00 м
<i>Геометрические характеристики здания</i>	
Общая площадь пола:	122,64 м ²
Измеренная площадь пола:	93,69 м ²
Площадь оболочки:	198,56 м ²
Вентилируемый объем:	287,56 м ³
Коэффициент остекления:	6,5 %
<i>Параметрические данные оболочки здания</i>	
Инфильтрация при 50 Па:	3,73 1/час
Коэффициенты теплообмена:	U-значение: [Вт/м ² К]
Среднее:	0,54
Этажи:	0,33-0,36
Часть наружная:	0,16-0,29
Часть подземная:	-
Проемы:	2,07-3,19

Фундамент объекта представляет собой многослойную утепленную кон-

струкцию. На рис. 1 показана схема многослойной конструкции фундамента.

**Рис.1.** Конструкция фундамента**Fig. 1.** Foundation design

Слои:

1. Ж/б плита фундамента – 300 мм;
2. Утеплитель «Пеноплекс» - 100 мм;

3. ГИ Бикрост ХПП – 1 слой;

4. ПГС – 100 мм;

5. Щебень фракции 20-40 мм – 50 мм.

На рис.2 и в табл. 2 представлены конструкция пола первого этажа и его теплотехнические характеристики.

Слои:

1. Линолеум – 10 мм;

2. Армированная стяжка с теплоносителем – 50 мм;

3. Утеплитель «Пеноплекс» - 100 мм.

Конструкция наружной стены и ее теплотехнические характеристик представлены на рис. 3 и в табл.3.

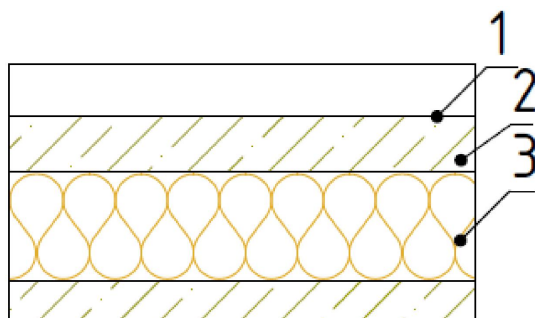


Рис. 2. Конструкция пола первого этажа

Fig. 2. First floor floor construction

Таблица 2. Теплотехнические характеристики пола первого этажа

Table 2. Thermal characteristics of the floor of the first floor

Свойства конструкции / Construction properties	
Тип / Type	Перекрытие / Overlap
Ориентация	Горизонтально
Категория	На земле
Термоблок	001 Жилые
Имя	Пол
Площадь	24,20 м ²
Толщина	150 мм
U-значение	0,35 Вт/м ² К

Слои:

Кирпичная облицовка – 120 мм;

Воздушная прослойка – 20 мм;

Блоки из газобетона – 400 мм;

Штукатурка – 20 мм.

На рис.4 и в табл. 4 представлены конструкция перекрытия над первым

этажом и его теплотехнические характеристики.

Слои:

Минераловатный утеплитель 50 кг/м³ – 200 мм;

Пароизоляция;

Ж/б плита перекрытия ПБ - 220 мм.

Штукатурка – 20 мм.

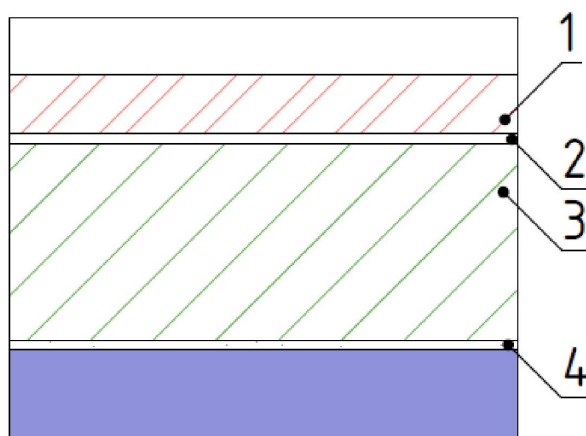


Рис. 3. Конструкция наружной стены

Fig. 3. Outer wall construction

Таблица 3. Теплотехнические характеристики наружной стены

Table 3. Thermal characteristics of the outer wall

Свойства конструкции / Construction properties	
Тип / Type	Стена / Wall
Ориентация	Север
Категория	Снаружи
Термоблок	001 Жилые
Имя	Наружные стены
Площадь	10, 48 м ²
Толщина	560 мм
U-значение	0,28Вт/м ² к
Инфильтрация	1,10л/см ²
Коэффициент поглощения	85,00%

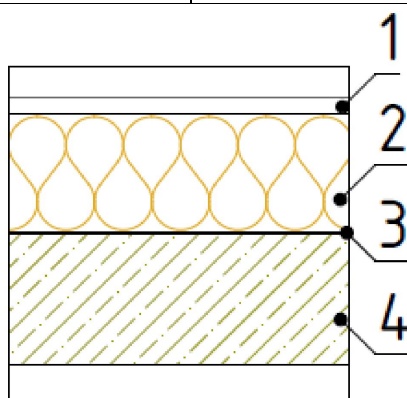


Рис. 4. Конструкция перекрытия над первым этажом

Fig. 4. Ceiling structure above the first floor

Таблица 4. Теплотехнические характеристики перекрытия над первым этажом**Table 4.** Thermal characteristics of the ceiling above the first floor

Свойства конструкции / Construction properties	
Тип / Type	Перекрытие / Overlap
Ориентация	Верх
Категория	Снаружи
Термоблок	001 Жилые
Имя	Плита перекрытия
Площадь	60,23 м ²
Толщина	423 мм
U-значение	0,18 Вт/м ² К
Инфильтрация	1,10 л/см ²
Коэффициент поглощения	85,00%

Теплотехнические характеристики оконных проемов и входной двери представлены на табл. 5 и 6.

В рамках второй задачи этапа выполнена оценка энергоэффективности типового жилого здания.

Таблица 5. Теплотехнические характеристики окна**Table 5.** Thermal characteristics of the window

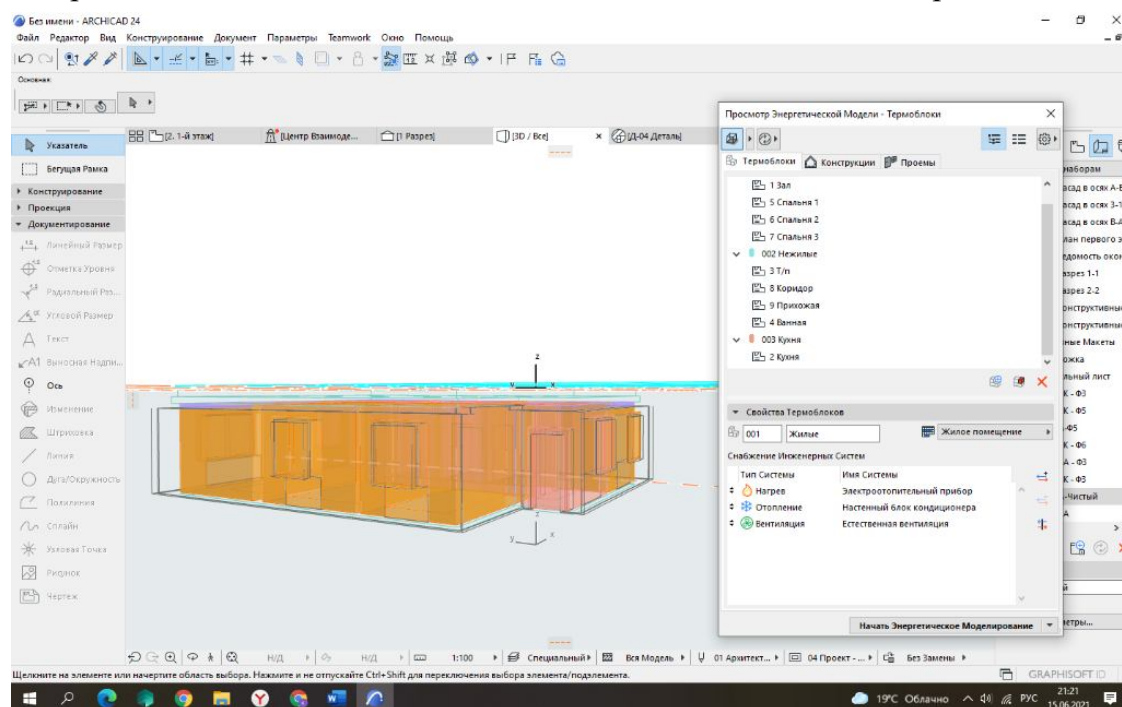
Свойства проёмов / Opening properties	
Тип / Type	Окно / Window
Ориентация	Север
Термоблок	001 Жилые
Площадь непрозрачной поверхности	1,16 м ²
Площадь остекления	2,61 м ²
Общая площадь	3,76 м ²
Суммарное солнечное пропускание	82,00%
Прямое солнечное пропускание	69,00%
<i>Анализ солнечного воздействия</i>	
Периметр	9404 мм
Непрозрачная поверхность	2,11 Вт/ м ² К
Остекление U-значение	2,80 Вт/ м ² К
Общее U-значение	3,04 Вт/ м ² К
Ψi – Значение периметра	0,18 Вт/ мК
Инфильтрация	1,43 л/см
Солнцезащитное устройство	Нет

Таблица 6. Теплотехнические характеристики двери**Table 6.** Thermal characteristics of the door

Свойства проёмов / Opening properties	
Тип / Type	Дверь / Door
Ориентация	Запад
Термоблок	002 нежилые
Площадь непрозрачной поверхности	2,75 м ²
Площадь остекления	0,00 м ²
Общая площадь	2,75 м ²
Суммарное солнечное пропускание	82,00%
Прямое солнечное пропускание	69,00%
<i>Анализ солнечного воздействия</i>	
Периметр	0 мм
Непрозрачная поверхность	2,11 Вт/ м ² К
Остекление U-значение	2,80 Вт/ м ² К
Общее U-значение	2,11 Вт/ м ² К
P _{si} – Значение периметра	0,18 Вт/ мК
Инфильтрация	1,43 л/см
Солнцезащитное устройство	Нет

В программе ArchiCad созданы термоблоки, параметры которых приведены на рис. 5.

В здании нагрев воды для отопления и хозяйственных нужд осуществляется с помощью электричества.

**Рис. 5.** Иллюстрация интерфейса программы ArchiCad с выделенными термоблоками**Fig. 5.** Illustration of the ArchiCad interface with thermal blocks highlighted

Охлаждение помещений осуществляется настенными блоками кондиционера. Помещения вентилируются естественным образом.

В табл. 7 приведены U-значения ограждающих конструкций здания. Приведенные значения взяты из BIM модели.

Далее был произведен расчет, результаты которого представлены в табл. 8-10.

В табл. 11 представлены удельные годовые значения потребляемой энергии до внедрения энергоэффективных технологий (чистая энергия теплоснабжения $ЧЭТ$, чистая энергия охлаждения $ЧЭО$, суммарная чистая энергия $СЧЭ$, потребление энергии $П^{энерг}$, потребление топлива $П^{топл}$, энергоемкость $Э^{емк}$, стоимость топлива $С^{топл}$, выброс CO_2

Таблица 7. U-значения ограждающих конструкций здания

Table 7. U-values of the building envelope

Название конструкции / Design name	U-значение, (Вт/м ² К) / U-value, (W/m ² К)
Наружные стены	0,28
Пол	0,35
Перекрытие	0,18
Наружная дверь	2,11
Окна	3,09

Таблица 8. Ключевые значения проекта

Table 8. Project key values

Общая площадь пола:	123,00	м ²
Обработанная площадь пола:	94,00	м ²
Площадь наружных поверхностей:	199,00	м ²
Вентилируемый объем:	287,00	м ³
Коэффициент остекления:	6,50	%
Утечка воздуха:	3,73	1/час

Таблица 9. U-значения

Table 9. U-values

В среднем по оболочке здания:	0,54	Вт/м ² К
Этажи:	0,35 – 0,35	Вт/м ² К
Внешний:	0,18 – 0,28	Вт/м ² К
Подземный:	-	Вт/м ² К
Проемы:	2,11 – 3,17	Вт/м ² К

Таблица 10. Проектные нагрузки**Table 10.** Design loads

Нагрев:	152,49	кВт.ч/м ² год
Охлаждение:	4,24	кВт.ч/м ² год
Часы пониженного теплоснабжения:	8760,00	ч
Часы пониженного охлаждения:	0,00	ч
Градусо-сутки отопительного периода	7029	
Градусо-сутки периода охлаждения	799	

Таблица 11. Особая годовая потребность**Table 11.** Special annual requirement

Наименование показателей / The name of indicators	Значения / Values
ЧЭТ, кВт.ч/м ² год	161,35
ЧЭО, кВт.ч/м ² год	5,11
СЧЭ, кВт.ч/м ² год	166,46
$П^{энерг}$, кВт.ч/м ² год	241,01
$П^{топл}$, кВт.ч/м ² год	233,09
$Э^{эмк}$, кВт.ч/м ² год	699,03
$С^{топл}$, руб/м ² год	828,13
Выброс CO ₂ , кг/м ² год	51,92

При проектировании индивидуального жилого дома не были поставлены задачи по снижению потребления энергии. Видно, что 66% потребляемой энергии приходится на отопление помещений. По проекту в доме отопительным прибором служит подоконные отопительные батареи. Теплоноситель нагревается в электрическом бойлере. Основная задача энергоэффективных домах не нагрев помещений, а сохранение тепла внутри помещений. В разработанном типовом проекте применяется естественная вентиляция, приточный воздух в холодные сутки года предва-

рительно не нагревается. Также удаляемый отработанный теплый воздух вытягивается естественной вентиляцией без рекуперации тепла, таким образом теряется значительная часть тепла. Суммарная потребляемая чистая энергия для нагрева и охлаждения дома составляет 156,73 кВт.ч/м²год. В энергоэффективных домах этот показатель, в зависимости от местоположения объекта, составляет 70-90 кВт.ч/м²год. Далее был проведен ряд изменений конструктивных решений по основным термоблокам, позволившим повысить уровень энергоэффективности дома.

Определение вариантов повышения энергоэффективности типового малоэтажного жилого здания

Для повышения энергоэффективности объекта изменены конструктивные элементы: наружных стен, перекрытия; материал проемов: окон и наружной двери (подробно конструктивные решения представлены на рис. 6, 7).

Слои:

Плита керамогранитная – 5 мм;

Воздушный зазор – 60 мм;

Теплоизоляция ТехноВент Стандарт (ТУ 5762-010-74-182181-2012) – 100 мм;

Кирпич керамический (ГОСТ 530-2012) – 380 мм.

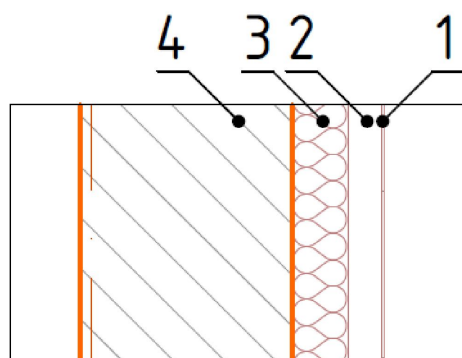


Рис. 6. Разрез наружной стены

Fig. 6. Section of the outer wall

Таблица 12. Свойства конструкции: наружная стена

Table 12. Construction Properties: Exterior Wall

Свойства конструкции / Construction properties	
Тип / Type	Перекрытие / Overlap
Ориентация	Запад
Категория	Снаружи
Термоблок	001 Жилые
Имя	ФАС-01-ТН-ФАСАД Вент
Площадь	10,48 м ²
Толщина	545 мм
U-значение	0,25 Вт/м ² К
Инфильтрация	1,10 л/см ²
Коэффициент поглощения	85,00%

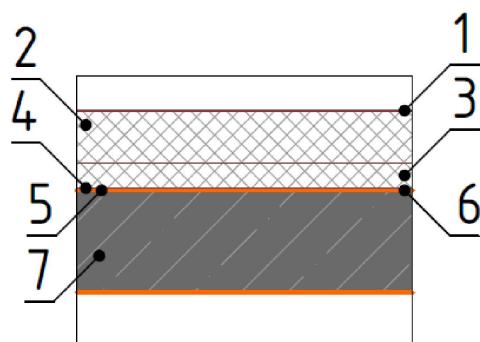


Рис.7. Разрез перекрытия

Fig. 7. Floor section

Слой:

Кровельная ПВХ мембрана LOGI-CROOF V-RP (СТО 72746455-3.4.1-2013) – 2 мм;

Плиты теплоизоляционные LOGI-CPIR PROF Ф/Ф (СТО 72746455-3.8.1-2014) – 100 мм;

Плиты теплоизоляционные LOGI-CPIR SLOPE (СТО 72746455-3.8.1-2014) – 50 мм;

Клей-пена ТЕХНОНИКОЛЬ LOGI-CPIR (СТО 72746455-3.6.10-2016);

Унифлекс С ЭМС (СТО 72746555-3.1.8-2014) – 4 мм;

Праймер битумный ТЕХНОНИКОЛЬ №01 (ТУ 5775-011-17925162-2003);

Железобетонная плита – 200 мм.

Таблица 13. Свойства конструкции: перекрытие

Table 13. Structural Properties: Overlap

Свойства конструкции / Construction properties	
Тип / Type	Перекрытие / Overlap
Ориентация	Верх
Категория	Снаружи
Термоблок	001 Жилые
Имя	ПК-32_ТН-КРОВЛЯ Эксперт PIR
Площадь	60,23 м ²
Толщина	356 мм
U-значение	0,15 Вт/м ² К
Инфильтрация	1,10 л/см ²
Коэффициент поглощения	85,00%

Конструкции пола и фундамента не были изменены. Оконные проемы и входная дверь были изменены на более энергоэффективные. В табл. 14 и 15 представлены теплотехнические характеристики оконных проемов и входной двери.

Окна в энергоэффективном здании изготовлены: коробка из композитного материала; стеклопакет из тонированного композитного стекла.

Входная дверь (коробка) в энергоэффективном здании выполнена из композитного материала с низкой теплопроводностью.

Таблица 14. Теплотехнические характеристики окна**Table 14.** Thermal characteristics of the window

Свойства проёмов / Opening properties	
Тип / Type	Окно / Window
Ориентация	Запад
Термоблок	001 Жилые
Площадь непрозрачной поверхности	1,16 м ²
Площадь остекления	2,61 м ²
Общая площадь	3,76 м ²
Суммарное солнечное пропускание	18,00%
Прямое солнечное пропускание	14,00%
Анализ солнечного воздействия	
Периметр	9404 мм
Непрозрачная поверхность	0,71 Вт/ м ² К
Остекление U-значение	0,30 Вт/ м ² К
Общее U-значение	0,63 Вт/ м ² К
Ψi – Значение периметра	0,08 Вт/ мК
Инфильтрация	0,09 л/см
Солнцезащитное устройство	Нет

Таблица 15. Теплотехнические характеристики входной двери**Table 15.** Thermal characteristics of the entrance door

Свойства проёмов / Opening properties	
Тип / Type	Дверь / Door
Ориентация	Юг
Термоблок	002 Нежилые
Площадь непрозрачной поверхности	2,71 м ²
Площадь остекления	0,00 м ²
Общая площадь	2,71 м ²
Суммарное солнечное пропускание	82,00%
Прямое солнечное пропускание	69,00%
Анализ солнечного воздействия	
Периметр	0 мм
Непрозрачная поверхность	0,79 Вт/ м ² К
Остекление U-значение	2,80 Вт/ м ² К
Общее U-значение	0,79 Вт/ м ² К
Ψi – Значение периметра	0,09 Вт/ мК
Инфильтрация	0,09 л/см
Солнцезащитное устройство	Нет

В табл. 16 представлены значения коэффициентов теплообмена, в табл. 17 – удельные годовые значения потребляемой энергии после внедрения энергоэффективных технологий (чистая энергия теплоснабжения $ЧЭТ$, чистая

энергия охлаждения $ЧЭО$, суммарная чистая энергия $СЧЭ$, потребление энергии $П^{энерг}$, потребление топлива $П^{топл}$, энергоёмкость $Э^{емк}$, стоимость топлива $С^{топл}$, выброс CO_2).

Таблица 16. U-значения (коэффициенты теплообмена)

Table 16. U-values (heat transfer coefficients)

В среднем по оболочке здания:	0.34	Вт/м²К
Этажи:	0.35 - 0.35	Вт/м²К
Внешний:	0.12 - 0.25	Вт/м²К
Подземный:	-	Вт/м²К
Проемы:	0,63 - 3.17	Вт/м²К
Градусо-сутки периода охлаждения	799	

Таблица 17. Удельные годовые значения

Table 17. Specific annual values

Наименование показателей / The name of indicators	Значения / Values
ЧЭТ, кВт.ч/м²год	91,02
ЧЭО, кВт.ч/м²год	0,00
СЧЭ, кВт.ч/м²год	91,02
$П^{энерг}$, кВт.ч/м²год	183,63
$П^{топл}$, кВт.ч/м²год	92,33
$Э^{емк}$, кВт.ч/м²год	303,35
$С^{топл}$, руб/м²год	293,45
Выброс CO_2 , кг/м²год	12,31

Составление энергетического отчета по типовому и энергоэффективному зданиям и выявление целесообразности внедрения энергетически эффективных решений в типовой проект

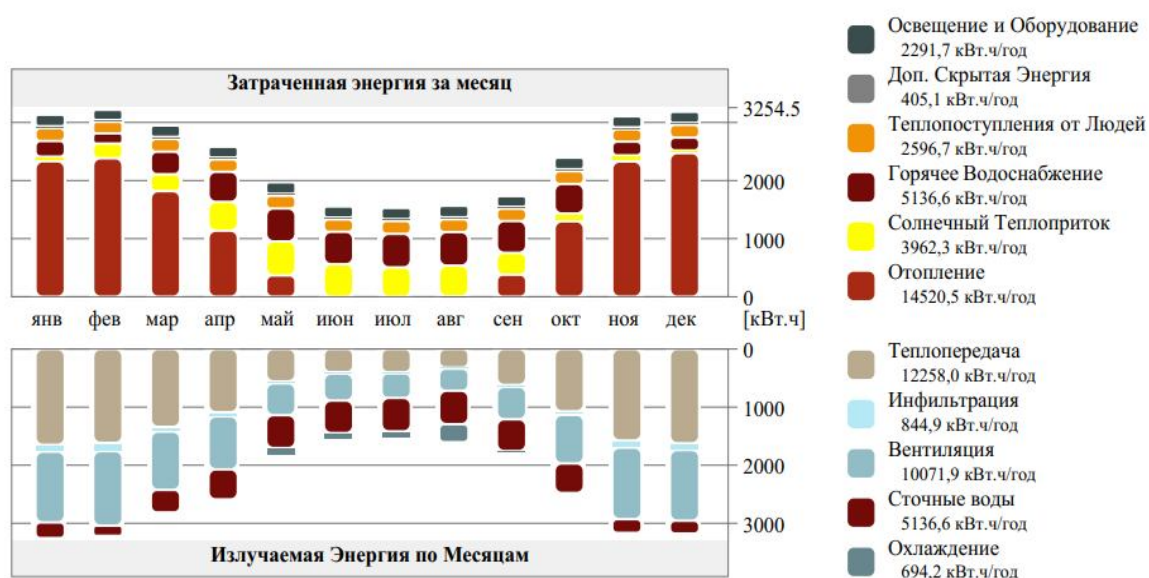
Энергетические отчеты по типовому и энергоэффективному зданиям представлены в таблицах.

Показатели отапливаемой площади с разделением по термоблокам представлены в табл. 18.

Энергетический баланс проекта типового здания представлен на рис. 8, в табл. 19 представлены результаты расчета воздействия проекта на окружающую среду.

Таблица 18. Показатели отапливаемой площади с разделением по термоблокам**Table 18.** Indicators of the heated area with division by thermoblocks

Термоблок / Thermoblock	Количество зон / Number of zones	Эксплуатация / Exploitation	Общая площадь, м ² / Total area, m ²	Объём, м ³ / Volume, m ³
001 Жилые	4	Жилое помещение	78,50	174,66
002 Нежилые	4	Коридоры	32,04	73,69
003 Кухня	1	Кухня	14,28	28,89
Итого	9		124,82	277,23

Энергетический баланс проекта**Рис. 8.** Энергетический баланс проекта (для типового здания)**Fig. 8.** Energy balance of the project (for a typical building)**Таблица 19.** Воздействие на окружающую среду**Table 19.** Environmental impact

Источник / Source	Наименование / Name	Энергия первичная, кВт. ч/год / Primary energy, kW. h/year	Выброс CO ₂ кг/год / CO ₂ emission, kg/year
Возобновляемая	Наружный воздух	911	0
Дополнительная	Электричество	66499	4787
Итого:		67410	4787

Энергетический баланс проекта

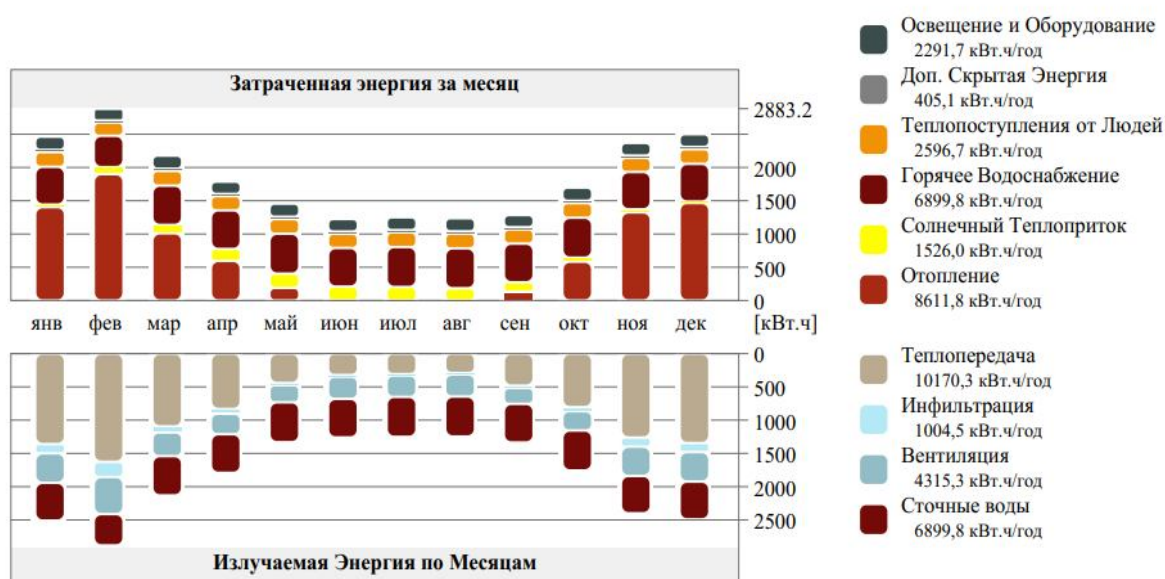


Рис. 9. Энергетический баланс проекта (для энергоэффективного здания)

Fig. 9. Energy balance of the project (for an energy efficient building)

Таблица 20. Воздействие на окружающую среду

Table 20. Environmental impact

Источник / Source	Наименование / Name	Энергия первичная, кВт. ч/год / Primary en- ergy, kW. h/year	Выброс CO ₂ кг/год / CO ₂ emission, kg/year
Возобновляемая	Солнце (Тепло; ФЭ)	4777	0
	Грунт	4581	0
	Топливные гранулы	4310	89
Дополнительная	Электричество	15457	1112
Итог:		29125	1201

Энергетический баланс проекта энергоэффективного здания представлен на рис.9, в таблице 20 представлены результаты расчета воздействия проекта на окружающую среду.

Выводы

Применение энергоэффективных решений к типовому зданию позволяет получить следующие результаты:

1. При изменении конструкции наружной стены значение коэффициента теплообмена U снизилось от 0,28 до 0,25 Вт/м²К.

2. При изменении конструкции перекрытия над первым этажом значение коэффициента теплообмена U снизилось от 0,18 до 0,15 Вт/м²К.

3. При изменении конструкций оконных проемов значение коэффициента теплообмена U снизилось с 3,04 до 0,63 Вт/м²К, инфильтрация через окно снизилась от 1,43 до 0,09 л/см.

4. При изменении конструкции входной двери значение коэффициента теплообмена U снизилось с 2,11 до 0,79

Вт/м²К, инфильтрация через окно снизилась от 1,43 до 0,09 л/см.

Если говорить о проекте в целом, то согласно энергетическому балансу типового и энергоэффективного здания, а также рассчитанным ключевым значениям средний коэффициент теплообмена снизился с 0,54 до 0,34 Вт/м²К, удельное годовое значение чистой энергии отопления снизилось с 161,35 до 92,33 кВт.ч/м²год, удельное годовое значение потребления энергии снизилось с 241,01 до 183,63 кВт.ч/м²год. Таким образом, применение данных конструктивных решений обоснованно.

Список литературы

1. Baronin S., Kulakov K. Development of life cycle valuation with priority of national projects and energy efficiency // В сборнике: E3S Web of Conferences. Сер. "International Scientific and Practical Conference "Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering", ERSME 2020" 2020. С. 07006.

2. Баронин С.А., Кулаков К.Ю. Оценка и моделирование управления стоимостью владения жилой недвижимости на основе энергоэффективных мероприятий // Недвижимость: экономика, управление. 2020. № 3. С. 20-27.

3. Казанцев П.А., Княжев В.В., Лощенков В.В., Кирик Н.С. Исследование традиционной архитектурой модели пассивного солнечного отопления на примере экспериментального индивидуального жилого дома Solar-SB // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2016. № 2 (27). С. 116-127.

4. Цховребов Э.С. Ресурсосбережение: основные этапы становления, теории и методы, тенденции и перспективы развития в промышленности и строительной индустрии России // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 1. С. 112–158. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.1.112-158>

5. Советников Д.О. Строительство здания, отвечающего стандартам пассивного дома // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 9 (24). С. 11-25.

6. Чан Нгок Тьян, Нгуен Тхи Хань Фыонг, Горбаренко Е.В. Оценка энергоэффективности оконной системы с солнцезащитным устройством П-образного типа // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 6. С. 655–665. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.6.655-665>.

7. Baronin S., Kulakov K. Residential property ownership valuation and cost management based on energy efficiency measures // В сборнике: E3S Web of Conferences. Сер. "International Scientific and Practical Conference "Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering", ERSME 2020" 2020. С. 07005.

8. Kulakov K.Y., Baronin S.A. Development of the municipal market of land plot auctions for housing construction in Russia // Journal of Applied Economic Sciences. 2016. Т. 11. № 4. Р. 698-708.

9. Баронин С.А. Методические аспекты формирования и управления совокупной стоимостью жизненных циклов недвижимости с разным уровнем энергоэффективности. Пенза, 2017.

10. Безгоднов М.А., Степанов Н.Д. Биопозитивная, ресурсосберегающая технология строительства малоэтажных зданий // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2018. Т. 2. С. 38-46.

11. Гареев И.Ф., Матвеева Е.С. Жилищные исследования: новые сегменты рынка и актуальные вопросы. М., 2016.

12. Бредихин В.В. Стратегия развития жилищной недвижимости в регионе // Регион: системы, экономика, управление. 2016. № 3 (34). С. 51-57.

13. Смирнова Ю.О., Логинова В.В. Влияние энергоэффективных мероприятий на теплотехнические и экономические характеристики многоквартирных жилых домов // Региональная архитектура и строительство. 2017. № 4 (33). С. 96-101.

14. Зубарева Г.И. Солнечный дом с Вегетарием // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2019. Т. 10. № 2. С. 126-135.

15. Баронин С.А., Грабовый П.Г. Главные тенденции и современные особенности развития малоэтажного жилищного строительства в России // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. № 5-2 (38). С. 48-58.

16. Проблема и тенденции развития малоэтажного жилищного строительства в России / С.А. Баронин, В.С. Казейкин, Е.Л. Николаева, А.Г. Черных, А.Н. Андросов. М., 2016.

17. Корнилов П.П. Современные тенденции развития малоэтажного жилищного строительства // Недвижимость: экономика, управление. 2016. № 4. С. 39-44.

18. Учинина Т.В., Баронин С.А. Девелопмент недвижимости при реализации проектов строительства экологичного и энергоэффективного малоэтажного жилья в Пензенской области // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. № 5-2 (38). С. 325-331.

19. Гулак Л.И., Бубнович С.Н. Обоснование целесообразности использования пассивных домов // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Высокие технологии. Экология. 2015. № 1. С. 33-36.

20. Пассивные дома в Финляндии / Т. Джигит, Д. Дюрр, Я. Туунанен, М. Луома // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. № 8 (13). С. 12-19.

21. Жигулина А.Ю., Пономаренко А.Л. Строительство энергоэффективных домов в России // Архитектура и развитие. 2012.

22. Энергоэффективные дома - дома будущего / Е.А. Ковалева, А.В. Казарбин, Л.В. Ковалева, И.В. Сысуев // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2015. № 1. С. 153-156.

23. Учинина Т.В., Толстых Ю.О., Биксалиева Д.Р. Особенности строительства и развития коттеджных поселков эконом-класса, удовлетворяющих требованиям энергоэффективности и экологичности (на примере г. Пензы) // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 4. С. 189.

24. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: федер. закон Рос. Федерации от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ: принят Гос. Думой Федер. Собр. Рос. Федерации 11 ноября 2009 г. // Рос. газ. 2009. 27 нояб. (№ 5050).

References

1. Baronin S., Kulakov K. Development of life cycle valuation with priority of national projects and energy efficiency. *E3S Web of Conferences*. Ser. "International Scientific and Practical Conference "Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering", ERSME 2020", 2020, pp. 07006.

2. Baronin S.A., Kulakov K.Yu. Otsenka i modelirovanie upravleniya stoimost'yu vladeniya zhiloi nedvizhimosti na osnove energoeffektivnykh meropriyatii [Evaluation and modeling of management of the cost of ownership of residential real estate based on energy-efficient measures]. *Nedvizhimost': ekonomika, upravlenie = Real Estate: Economics, Management*, 2020, no. 3, pp. 20-27.

3. Kazantsev P.A., Knyazhev V.V., Loshchenkov V.V., Kirik N.S. Issledovanie traditsionnoi arkhitekturoi modeli passivnogo solnechnogo otopeniya na primere eksperimental'nogo individual'nogo zhilogo doma Solar-SB [The study of the traditional architecture of the model of passive solar heating on the example of an experimental individual residential building Solar-SB]. *Vestnik Inzhenernoi shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta = Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University*, 2016, no. 2 (27), pp. 116-127.

4. Tshovrebov E.S. Resursosberezhenie: osnovnye etapy stanovleniya, teorii i metody, tendentsii i perspektivy razvitiya v promyshlennosti i stroitel'noi industrii Rossii [Resource-saving: main formation stages, theories and methods, tendencies and prospects of development in industry and construction of Russia]. *Vestnik MGSU = Vestnik MGSU* [Monthly

Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(1):112-158. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.1.112-158>.

5. Sovetnikov D.O. Stroitel'stvo zdaniya, otvechayushchego standartam passivnogo doma [Construction of a building that meets the standards of a passive house]. Stroitel'stvo unikal'nykh zdanii i sooruzhenii = Construction of Unique Buildings and Structures, 2014, no. 9 (24), pp. 11-25.

6. Tran Ngoc Chan, Nguyen Thi Khanh Phuong, Gorbarenko E.V. Otsenka energoeffektivnosti okonnoi sistemy s solntsezashchitnym ustroystvom P-obraznogo tipa [Assessment of the energy efficiency of a window system with a shading device of the egg-crate type]. *Vestnik MGSU = Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(6):655-665. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.6.655-665> (rus.)

7. Baronin S., Kulakov K. Residential property ownership valuation and cost management based on energy efficiency measures [Residential property ownership valuation and cost management based on energy efficiency measures]. *E3S Web of Conferences. Ser. "International Scientific and Practical Conference "Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering, ERSME 2020"*, 2020. P. 07005.

8. Kulakov K.Y., Baronin S.A. Development of the municipal market of land plot auctions for housing construction in Russia. *Journal of Applied Economic Sciences*, 2016, vol. 11, no. 4, pp. 698-708.

9. Baronin S.A. *Metodicheskie aspekty formirovaniya i upravleniya sovokupnoi stoimost'yu zhiznennykh tsiklov nedvizhimosti s raznym urovnem energoeffektivnosti* [Methodological aspects of the formation and management of the total cost of real estate life cycles with different levels of energy efficiency]. Penza, 2017.

10. Bezgodov M.A., Stepanov N.D. Biopozitivnaya, resursosberegayushchaya tekhnologiya stroitel'stva maloetazhnykh zdanii [Biopositive, resource-saving technology for the construction of low-rise buildings]. *Sovremennye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika = Modern Technologies in Construction. Theory and Practice*, 2018, vol. 2, pp. 38-46.

11. Gareev I.F., Matveeva E.S. *Zhilishchnye issledovaniya: novye segmenty rynka i aktual'nye voprosy* [Housing research: new segments of the market and topical issues]. Moscow, 2016.

12. Bredikhin V.V. Strategiya razvitiya zhilishchnoi nedvizhimosti v regione [Strategy for the development of housing real estate in the region]. *Region: sistemy, ekonomika, upravlenie = Region: Systems, Economics, Management*, 2016, no. 3 (34), pp. 51-57.

13. Smirnova Yu.O., Loginova V.V. Vliyanie energoeffektivnykh meropriyatii na teplotekhnicheskie i ekonomicheskie kharakteristiki mnogokvartirnykh zhilykh domov [Influence of energy-efficient measures on heat engineering and economic characteristics of multi-apartment residential buildings]. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo = Regional Architecture And Construction*. 2017, no. 4 (33), pp. 96-101.

14. Zubareva G.I. Solnechnyi dom s Vegetariem [Solar House with Vegetarian]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura* = *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture*, 2019, vol. 10, no. 2, pp. 126-135.

15. Baronin S.A., Grabovyi P.G. Glavnye tendentsii i sovremennye osobennosti razvitiya maloetazhnogo zhilishchnogo stroitel'stva v Rossii [Main trends and modern features of the development of low-rise housing construction in Russia]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*, 2011, no. 5-2 (38), pp. 48-58.

16. Baronin S.A., Kazeikin V.S., Nikolaeva E.L., Chernykh A.G., Androsov A.N. *Problema i tendentsii razvitiya maloetazhnogo zhilishchnogo stroitel'stva v Rossii* [The problem and trends in the development of low-rise housing construction in Russia]. Moscow, 2016.

17. Kornilov P.P. Sovremennye tendentsii razvitiya maloetazhnogo zhilishchnogo stroitel'stva [Modern trends in the development of low-rise housing construction]. *Nedvizhimost': ekonomika, upravlenie* = *Real Estate: Economics, Management*, 2016, no. 4, pp. 39-44.

18. Uchinina T.V., Baronin S.A. Development nedvizhimosti pri realizatsii proektov stroitel'stva ekologichnogo i energoeffektivnogo maloetazhnogo zhil'ya v Penzenskoi oblasti [Real estate development in the implementation of projects for the construction of environmentally friendly and energy-efficient low-rise housing in the Penza region]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*, 2011, no. 5-2 (38), pp. 325-331.

19. Gulak L.I., Bubnovich S.N. Obosnovanie tselesoobraznosti ispol'zovaniya passivnykh domov [Substantiation of the expediency of using passive houses]. *Nauchnyi vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Vysokie tekhnologii. Ekologiya* = *Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: High technologies. Ecology*, 2015, no. 1, pp. 33-36.

20. Dzhigit T., Duerr D., Tuunanen J., Luoma M. Passivnye doma v Finlyandii [Passive houses in Finland]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdanii i sooruzhenii* = *Construction of unique Buildings and Structures*, 2013, no. 8 (13), pp. 12-19.

21. Zhigulina A.Yu., Ponomarenko A.L. Stroitel'stvo energoeffektivnykh domov v Rossii [Construction of energy-efficient houses in Russia]. *Arkhitectura i razvitie* = *Architecture and development*, 2012.

22. Kovaleva E.A., Kazarbin A.V., Kovaleva L.V., Sysuev I.V. Energoeffektivnye doma - doma budushchego [Energy-efficient houses - houses of the future]. *Dal'nii Vostok: problemy razvitiya arkhitekturno-stroitel'nogo kompleksa* = *Far East: Problems of Development of the Architectural and Construction Complex*, 2015, no. 1, pp. 153-156.

23. Uchinina T.V., Tolstykh Yu.O., Biksalieva D.R. Osobennosti stroitel'stva i razvitiya kottedzhnykh poselkov ekonom-klassa, udovletvoryayushchikh trebovaniyam energoeffektivnosti i ekologichnosti (na primere g. Penzy) [Features of the construction and development of economy-class cottage settlements that meet the requirements of energy efficiency and environmental friendliness (on the example of Penza)]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* = *Modern Problems of Science and Education*, 2012, no. 4, p. 189.

24. *Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoi effektivnosti i o vnesenii izmenenii v otдел'nye zakonodatel'nye akty Rossiiskoi Federatsii*: feder. zakon Ros. Federatsii [On Energy Saving and Increasing Energy Efficiency and on Amending Certain Legislative Acts of the Russian Federation: Feder. law Ros. Federation] dated November 23, 2009 No. 261-FZ: adopted by the State. Duma Feder. Sobr. Ros. Federation November 11, 2009. Ros. gas. 2009. 27 November. (No. 5050).

Информация об авторах / Information about the Authors

Бредихин Владимир Викторович, доктор экономических наук, доцент, Юго-Западный государственный университет, г.Курск, Российская Федерация, e-mail: bvv001@mail.ru

Vladimir V. Bredikhin, Dr. of Sci. (Economic), Associate Professor, Southwest State University Kursk, Russian Federation, e-mail: bvv001@mail.ru

Кулаков Кирилл Юрьевич, доктор экономических наук, профессор, проректор по финансовой политике, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: kulakovkyu@mgsu.ru

Kirill Y. Kulakov, Dr. of Sci. (Economic), Professor, Vice-Rector, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, e-mail: kulakovkyu@mgsu.ru

Учинина Татьяна Владимировна, кандидат экономических наук, доцент кафедры экспертизы и управления недвижимостью, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: tatiana-Vladim@yandex.ru

Tatyana V. Uchinina, Cand. of Sci. (Economic), Associate Professor of the Department of Expertise and Real Estate Management, Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russian Federation, e-mail: tatiana-Vladim@yandex.ru

Пышная Алена Сергеевна, магистрант, кафедра «Экспертиза и управление недвижимостью» Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза, Российская Федерация e-mail: alena122q@icioud.com

Alena S. Pyshnaya, Undergraduate, Department of Expertise and Real Estate Management, Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russian Federation e-mail: alena122q@icioud.com

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-43-56>

Эксплуатация светлого излучателя на биогазе

Н.О. Ермаков¹, С.В. Чуйкин¹

¹ Воронежский государственный технический университет
ул. 20-летия Октября, д. 84, г. Воронеж 394006, Российская Федерация

✉ e-mail: nikita1594@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Одним из способов снижения потребления тепловой энергии на отопление помещений большого объема является способ, основывающийся на применении местных систем, к которым можно отнести системы газолучистого отопления с использованием светлых излучателей. Предлагается эксплуатировать светлый излучатель, на биогазе. Для определения возможности работы светлого излучателя на биогазе необходимо рассчитать оптимальные параметры эксплуатации светлого излучателя.

Методы. Исследования базировались на научных трудах ученых по теории горения газовых смесей и внедрению новых конструктивных решений газовых излучателей. В процессе изучения были использованы методы оптимизации и расчета газогорелочного оборудования.

С целью расчета оптимальных параметров эксплуатации требуется провести исследование особенности горения биогаза и получить зависимость температуры горения. Необходимо внести изменения, подтвержденные расчетами, в существующую конструкцию и режим работы светлого излучателя, функционирующего на природном газе, для эксплуатации на биогазе.

Результаты. Изучены особенности горения биогаза и определена максимальная температура горения. Доказана возможная эксплуатация светлого излучателя на биогазе при наборе оптимальных параметров.

Заключение. Обосновано изменение конструктивных характеристик светлого излучателя при эксплуатации на биогазе. Полученные результаты могут применяться в предпроектных разработках новой конструкции светлого излучателя под биогаз различного состава.

Ключевые слова: биогаз; светлый излучатель; теплота сгорания; параметры эксплуатации; оптимальные параметры; конструктивные изменения.

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

Для цитирования: Ермаков Н. О., Чуйкин С. В. Эксплуатация светлого излучателя на биогазе // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(1): 43-56. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-43-56>.

Поступила в редакцию 23.12.2021

Подписана в печать 18.02.2022

Опубликована 31.03.2022

Operation of a Light Emitter on Biogas

Nikita O. Ermakov¹, Sergei V. Chuikin¹

¹ Voronezh State Technical University

84, 20th anniversary of October str., Voronezh 394006, Russian Federation

✉ e-mail: el.yatsun@gmail.com

Abstract

Purpose of research. One of the ways to reduce the consumption of thermal energy for heating large-volume premises is a method based on the use of local systems, which include gas-radiant heating systems using light emitters. It is proposed to operate a light emitter on biogas. To determine the possibility of operation of a light emitter on biogas, it is necessary to calculate the optimal parameters of operation of a light emitter.

Methods. The research was based on the scientific works of scientists on the theory of gorenje gas mixtures and the introduction of new design solutions of gas emitters. In the course of the study, methods of optimization and calculation of gas-burning equipment were used. In order to calculate the optimal operating parameters, it is required to conduct a study of the gorenje gorenje of biogas, and to obtain the dependence of the combustion temperature. It is necessary to make changes, confirmed by calculations, to the existing design and operating mode of the light emitter operating on natural gas for operation on biogas.

Results. The features of biogas combustion are studied and the maximum gorenje gorenje temperature is determined. The possible operation of a light radiator on biogas, with a set of optimal parameters, is proved.

Conclusion. The change in the design characteristics of the light emitter during operation on biogas is justified. The results obtained can be used in the pre-design development of a new design of a light emitter for biogas of various compositions.

Keywords: biogas; light emitter; heat of combustion; operating parameters; optimal parameters; design changes.

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

For citation: Ermakov N. O., Chuikin S. V. Operation of a Light Emitter on Biogas. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(1): 43-56 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-43-56>.

Received 23.12.2021

Accepted 18.02.2022

Published 31.03.2022

Введение

Светлый излучатель – это оборудование, представляющее собой горелку и излучающую панель, изготовленную из перфорированной керамической плитки, на поверхности которой сгорает газовоздушная смесь и отдает тепло в помещение. Данный прибор устанавливается в помещениях большого объема над желаемым местом обогрева и как правило не имеет газовой выводной систе-

мы, а продукты горения удаляются естественной вентиляцией [4]. Отопление светлыми излучателями основывается на тепловом излучении, а не через конвекцию, что намного эффективнее. Так энергия не поглощается воздухом и не создает «воздушной подушки» под потолком помещения, а достигает непосредственно отапливаемых площадей. Горение происходит на природном газе, для которого характерна высокая тем-

пература. Скорость потока газа тоже должна быть значительной.

Природный газ имеет уникальный состав в разных регионах и для определения возможности эксплуатации светлого излучателя на отличных от исходного газа, предлагается в качестве топлива использовать биогаз. Биогаз – газ, получаемый путем брожения из компонентов, которые содержатся в отходах аграрного производства и органических остатках, включая экскременты животных и материалы из растительной группы.

Для эксплуатации светлого излучателя на биогазе, необходимо изучить свойства топлива, оптимизировать под него оборудование и установить возможность обогрева, исходя из отдаваемого количества теплоты.

Материалы и методы

Состав биогаза и его количество, при полном разложении биомассы зависит от температуры брожения и соотношения $C : H : O : N$ в исходном материале. Входящие в состав органического вещества важнейшие соединения, жиры обеспечивают максимальный выход газа с высоким содержанием CH_4 , белковые вещества – меньший, но тоже с высоким содержанием CH_4 , а углеводы – мало с минимальным содержанием CH_4 . Средний состав газа (табл. 1), который можно выделить из экскрементов животных при нужной температуре брожения в $35^\circ C$, соответствует соотношению $CH_4/CO_2 = 2$. Биогаз так же содержит N_2 , H_2 и H_2S [5].

Таблица 1. Состав биогаза

Table 1. Composition of biogas

Характеристика/ Characteristic	Компоненты биогаза/ Biogas components				Базовая смесь (60% CH_4 + 40% CO_2)/ Base blend (60% CH_4 + 40% CO_2)
	CH_4	CO_2	H_2	H_2S	
Объемная доля, %/ Volume fraction, %	60	30	<1	<3	100
Объемная теплота сгорания, МДж/м ³ / Volumetric heat of combustion, МДж/м ³	35,8	-	10,8	22,8	22
Предел воспламеня- емости, % / Flammability limit, %	5-15	-	4-80	4-45	6-12
t воспламенения, $^\circ C$ / t ignitions, $^\circ C$	65-750	-	585	-	650-750

Характеристика/ Characteristic	Компоненты биогаза/ Biogas components				Базовая смесь (60% CH ₄ + 40% CO ₂)/ Base blend (60% CH ₄ + 40% CO ₂)
	CH ₄	CO ₂	H ₂	H ₂ S	
Критическое давление, Мпа / Critical pressure, Мпа	4,7	7,5	1,3	8,9	7,5-8,9
Критическая t, °C/ Critical t, °C	-82,5	31,0	-	100,0	-2,5
Нормальная плотность, г/л/ Normal density, g/l	0,72	1,93	0,09	1,54	1,2
Критическая плотность, г/л/ Critical density, g/l	102	468	31	349	320
Плотность относительно воздуха/ Density relative to air	0,3	2,5	0,7	1,2	0,83

При эксплуатации светлого излучателя температура горения газа совпадает с температурой пламени, так как горение проходит в области, граничащей с керамической плиткой. Тогда, проведем расчет температуры горения биогаза состава из табл. 1. Сначала определим количество кислорода.

Теоретически требуемое число кислорода для полного сгорания углеводородных газов определяется по стехиометрическому уравнению:

$$C_n H_m + \left(n + \frac{m}{4}\right) O_2 = n CO_2 + \frac{m}{2} H_2 O. \quad (1)$$

Для того чтобы получить количество теоретического объема воздуха для сгорания рассматриваемой газовой смеси, необходимо принять во внимание объемное содержание кислорода в воздухе. Объемное содержание кислорода

в воздухе составляет 21%, следовательно, объем воздуха для сгорания 1 м³ в 4,76 раз больше объема кислорода (100/21 = 4,76). Объем воздуха, необходимый для сгорания 1 м³ биогаза, определяется по формуле:

$$V_m = 0,0476 \left[0,5(CO + H_2) + 1,5H_2S + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2 \right]. \quad (2)$$

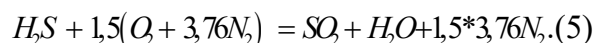
Рассчитав требуемое количество воздуха для полного сгорания 1 м³ биогаза, найдем объем каждого компонента продуктов горения, м³:

$$CH_4 + 2(O_2 + 3,76N_2) = CO_2 + 2H_2O + 2 \cdot 3,76N_2, \quad (3)$$

$$\beta(CH_4) = 2,$$

$$H_2 + 0,5(O_2 + 3,76N_2) = H_2O + 0,5 \cdot 3,76N_2, \quad (4)$$

$$\beta(H_2) = 0,5,$$



Вычислив объем каждого компонента, исходя из формул (3), (5), общий объем продуктов горения, м³ будет равен:

$$V_{nz}^* = V(CO_2) + V(H_2O) + V(H_2S) + V(N_2). (6)$$

Избыточный воздух будет находиться в продуктах горения, так как горение протекает с коэффициентом избытка воздуха.

Объем избытка воздуха, м³, определяется по формуле

$$\Delta V_m = V_m^* (\alpha - 1). (7)$$

Учитывая объем избытка воздуха, практический объем продуктов горения, м³ составит:

$$V_{nz} = V_{nz}^* + \Delta V_m. (8)$$

Принимая в расчет теплотери, определяем теплосодержание продуктов горения, кДж/кг:

$$Q_{nz} = Q_n^* (1 - 0,1). (9)$$

Определяем среднее теплосодержание продуктов горения, кДж/кг:

$$Q_{cp} = \frac{Q_{nz}}{V_{nz}}. (10)$$

По методическим рекомендациям, определяем теплосодержание продуктов горения Q_1 и Q_2 при температуре T_1 и T_2 К. Теплосодержание продуктов горения, рассчитанное ранее в формуле (9), должно находиться в интервале Q_1 и Q_2 , в уравнении:

$$Q_{nz}^1 \leq Q_{nz} \leq Q_{nz}^2. (11)$$

Если, теплосодержание продуктов горения подходит в уравнение (11), то определим температуру горения, К и составим график для выявления оптимального коэффициента избытка воздуха с использованием уже рассчитанных параметров:

$$T_c = T_1 + \frac{Q_{nz} - Q_{nz}^1}{Q_{nz}^2 - Q_{nz}^1} (T_2 - T_1), (12)$$

где Q_{nz} – теплосодержание продуктов горения, кДж/кг, с индексами 1,2 соответственно для T_1 , T_2 – температура горения определяемая по методическим рекомендациям.

Связь температуры горения от коэффициента избытка воздуха представлена на рис. 1.

На рис. 1 видно, что при увеличении коэффициента избытка воздуха происходит увеличение температуры горения топлива вследствие увеличения количества излучаемой теплоты. Однако наибольшее значение 2090 К соответствует рассчитанному коэффициенту избытка воздуха 1,19, далее кривая начинает приобретать наклонный характер и пропорционально снижается при увеличении значения коэффициента избытка воздуха^{1,2}.

¹ Ермолаев А.Н. Повышение эффективности работы систем инфракрасного обогрева производственных зданий: дис. канд. техн. наук. Тюмень, 2017. 191 с.

² Зиганшин Б.М. Снижение энергетических затрат в системах отопления производственных объектов радиационными трубами: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2006. 163 с.

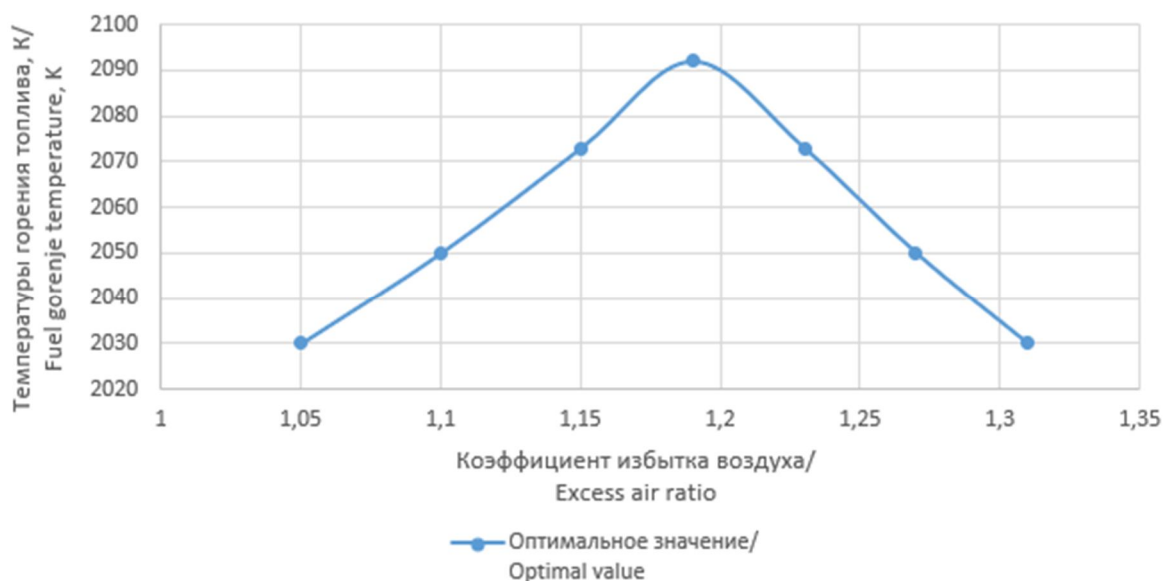


Рис. 1. Связь температуры горения от коэффициента избытка воздуха

Fig. 1. Gorenje temperature relation from the excess air coefficient

Результаты и их обсуждение

Расчет параметров для эксплуатации светлого излучателя на биогазе

Для определения возможности эксплуатации оборудования на различных газах используют число Воббе, которое показывает возможность взаимозаменяемости газов. Природный газ с теплотой сгорания 35 МДж/м³ имеет число Воббе 42 МДж/м³, в то время как у биогаза с содержанием метана 60 % и теплотой сгорания 22 МДж/м³, число Воббе 24,5 МДж/м³ [3].

Эксплуатация на биогазе светлого излучателя будет проходить с конструктивными изменениями в площади поперечного сечения форсунки, основных размеров инжекционного смесителя, площади керамической плитки. Конструктивные характеристики будут

заданы в соответствии с рассчитанными параметрами расхода газа, коэффициента избытка воздуха, связанного с теоретическим расходом воздуха, коэффициента инжекции, удельной тепловой нагрузки на керамическую плитку, скорости вылета газовой смеси, потери давления.

Для начала расчета определяется состав рассматриваемого газа и теплота сгорания. Исходя из теплоты сгорания газовой смеси и необходимой мощности излучателя, рассчитывается расход топлива светлого излучателя, м³/ч:

$$Q_{ном.г} = \frac{Q}{Q_n^p}, \quad (13)$$

где Q – тепловая нагрузка горелки, ккал/м³;

Q_n^p – низшая теплота сгорания топлива, ккал/м³.

Формула показывает изменение расхода топлива в зависимости от теплоты сгорания. Необходимая мощность излучателя и низшая теплота сгорания влияют на расход топлива. Чем ниже теплота сгорания, тем больше топлива необходимо подавать.

Основной параметр, обеспечивающий требуемый расход топлива, это размер форсунки. Площадь поперечного сечения форсунки (мм²) определяется по формуле

$$F_{\phi} = 78,4 * Q_{ном.г} * \sqrt{\frac{\gamma_0}{P}}, \quad (14)$$

где γ_0 - удельный вес газа, кг/м³;

P - давление газа перед горелкой, мм. вод. ст.

Диаметр форсунки (мм) будет равен:

$$d_{\phi} = \sqrt{\frac{4F_{\phi}}{\pi}}. \quad (15)$$

Затем необходимо определить длину пути смешивания газа с поступающим воздухом, исходя из него получить длину и диаметр горловины, диффузора, конфузора, которые связаны друг с другом в процентном соотношении.

Длина пути смешивания газа с поступающим воздухом, мм определяется по формуле

$$l_{см} = \frac{A_{см} d_{\phi}}{\alpha}, \quad (16)$$

где α - коэффициент структуры в струе;

$A_{см}$ - параметр смешения в струе;

$$A_{см} = \frac{(A' + 1) \sqrt{a_c C}}{3,217}, \quad (17)$$

где A' - кратность инжекции, исходя из умножения теоретического расхода

воздуха и коэффициента избытка воздуха (рис.);

α_c - коэффициент сжатия струи, 0,7;

C - коэффициент различия плотности воздуха и биогаза, 0,7.

Для сгорания газовой смеси в формуле (12), был рассчитан оптимальный теоретический расход воздуха, с учетом расхода газовой смеси и коэффициента смешивания, вычисляется площадь сечения отверстия для поступления воздуха, мм²:

$$f_{\phi} = \frac{A' Q_{ном.г}}{3600 * v}. \quad (18)$$

Площадь керамической плитки, с которой будет происходить излучение, определяется, исходя из принятого размера одной плитки, удельной тепловой нагрузки и диаметра отверстий вылета газовой смеси, см² :

$$f_{\kappa} = \frac{Q}{q_y}, \quad (19)$$

где q_y - удельная тепловая нагрузка керамической плитки, ккал/см²*ч.

Скорость вылета газовой смеси, м/сек. от отверстий плитки, определяется по формуле

$$v_{см} = \frac{q_{ном.г} (1 + A') 10^6}{3600 * 0,785 * d_n^2 * n}. \quad (20)$$

Когда скорость распространения пламени выше скорости течения газовой смеси, то происходит пропуск пламени. Рассчитанная скорость в формуле (20) должна укладываться в соотношение, что обеспечит отсутствие проскока пламени:

$$v_{\min см} \leq v_{см} \leq v_{р.л.}, \quad (21)$$

где $v_{\min см}$ – минимальная требуемая скорость вылета газовойдушной смеси, м/сек.;

$v_{р.л.}$ – скорость распространения пламени биогаза, м/сек.

Общие потери давления не должны превышать входное и складываются по формуле

$$\sum \Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{в.к.} + \Delta P_{инж.} + \Delta P_{изл.п.}, \quad (22)$$

где $\Delta P_{в.к.}$ – потери в всасывающей камере, Па;

$\Delta P_{инж.}$ – потери в инжекторе, Па;

$\Delta P_{изл.п.}$ – потери в излучающей панели.

Зависимость суммарных потерь давления с входным давлением, Па:

$$\Delta P_{\Sigma} \geq \sum \Delta P_{\Sigma}, \quad (23)$$

где ΔP_{Σ} – входное давление, Па;

ΔP_{Σ} – суммарные потери давления, на преодоление сопротивления по всей горелке, Па.

Параметры эксплуатации

Рассчитанные параметры эксплуатации светлого излучателя, можно собрать в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики светлого излучателя, работающего на биогазе

Table 2. Characteristics of a biogas-powered light emitter

Наименования параметра / Parameter names	Значение / Meaning
Настраиваемые параметры / Configurable parameters	
Расход газа, м ³ /ч / gas consumption, m ³ /h	0,4
Теоретический расход воздуха, м ³ / Theoretical air consumption, m ³	5,474
Коэффициент избытка воздуха / Excess air ratio	1,19
Коэффициент инжекции / Injection coefficient	6,51
Удельная тепловая нагрузка на керамическую плитку, ккал/см ² *ч / Specific heat load on ceramic tiles, kcal/cm ² *h	14,0
Скорость вылета газовойдушной смеси, м/сек. / The rate of departure of the gas-air mixture, m/ sec.	0,1
Суммарные потери давления, Па / Total pressure loss, Pa	3
Конструктивные параметры / Design parameters	
Площадь сечения форсунки, мм ² / Nozzle cross-sectional area, mm ²	3,4
Диаметр форсунки, мм / Nozzle diameter, mm	2,0
Длина пути инжекции, мм / Injection path length, mm	48,3
Площадь сечения воздуха для поступления воздуха, мм ² / Air cross-sectional area for air intake, mm ²	1446

Окончание табл. 2 / Ending tabl. 2

Наименования параметра / Parameter names	Значение / Meaning
Диаметр горловины, мм / The diameter of the neck, mm	30,0
Длина горловины, мм / Neck length, mm	90,0
Диаметр диффузора, мм / Diameter of the diffuser, mm	44,0
Длина диффузора, мм / Length of the diffuser, mm	117,0
Диаметр конфузора, мм / Diameter of the confuser, mm	60,0
Длина конфузора, мм / Confuser length, mm	68,0
Площадь, см ² /кол-во керамических плиток, шт. / Area, cm ² /number of ceramic tiles, pcs.	154/7

Объединив все рассчитанные параметры в табл. 2, можно сказать, что для обеспечения расхода газа, 0,4 м³/ч, диаметр форсунки должен быть 2,0 мм. Получив теоретический расход воздуха 5,474 м³ с коэффициентом избытка воздуха 1,19, необходимый для полного сгорания газозооушной смеси, длина пути инъекции составит 48,3 мм. На основании вычисленных значений параметров эксплуатации скорость вылета газозооушной смеси составит 0,1 м/сек от 7 плиток, с общей площадью 154 см² и уложится в соотношение (21) для исключения проскока пламени.

Рассчитав все необходимые параметры эксплуатации светлого излучателя на биогазе, требуется подтвердить заявленное тепловое излучение для рассматриваемого светлого излучателя. Так как пламя покрывает все внешнюю поверхность излучающей плитки, то площадь теплообмена излучающей плитки с пламенем максимальна. Исходя из этого, абсолютное количество теплоты $Q_{изл.}$, излучаемое керамической плиткой, в соответствии с законом Стефана

– Больцмана, зависит от площади поверхности излучения и находится по формуле

$$Q_{изл.} = f_k 4,9\varepsilon \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (24)$$

где ε – степень черноты;

T – оптимальная рассчитанная ранее в (12) температура, К.

Формула (24) показала, что при условиях, сведенных в табл. 2, подтвердится заявленная тепловая нагрузка излучателя 2,5 кВт=2149,61 ккал/ч.

Выводы

1. Набор рассчитанных параметров светлого излучателя с тепловой нагрузкой 2149,61 ккал/ч, будет обеспечивать оптимальную скорость вылета, полное сгорание газозооушной смеси и выдавать заявленное тепловое излучение при эксплуатации на биогазе с теплотой сгорания 5255,8 ккал/м³.

2. Исследованы особенности горения биогаза. Получен график, связывающий температуру горения от коэффициента избытка воздуха с оптимальными значениями, при которых будет

обеспечена удовлетворительная работа светлого излучателя.

3. Определены оптимальные значения расхода газа и размера форсунки, ко-

эффициента инжекции и основные габариты инжекционного смесителя, удельной тепловой нагрузки на керамическую плитку и ее площадь.

Список литературы

1. Баадер В., Доне Е., Бренндерфер М. Биогаз: теория и практика. М.: Колос, 1982. 148 с.
2. Барашкова Н. П. Сравнение инфракрасных газовых излучателей по конструктивным особенностям (светлые и темные) и рекомендации по применению // Вестник магистратуры. 2019. № 1-2(88). С. 53-55.
3. Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнова О.С. Топливо и теория горения. Топливо. СПб., 2011. 84 с.
4. Богомолов А.И., Вигдорчик Д. Я., Маевский М. А. Газовые горелки инфракрасного излучения и их применение. М., 1967. 254 с.
5. Ермаков Н.О., Чуйкин С.В. Оптимизация работы светлого излучателя на бедной газовой смеси // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. 2021. № 09 (237). С. 48-51.
6. Ермаков Н.О. Конструктивные изменения в светлом излучателе для работы на биогазе // Молодой ученый. 2021. № 49 (391). С. 27-29.
7. Ермаков Н.О., Чуйкин С.В. Проблемы использования биогаза в светлых излучателях // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. 2020. № 3 (20). С. 24-29.
8. Зингер А. С., Алимбаев В. Г., Козлов А. В. Газовые инфракрасные излучатели // Инновационное развитие агропромышленного комплекса для обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации: сборник материалов Международной научно-практической конференции. Тюмень: Государственный аграрный университет Северного Зауралья, 2020. С. 53-60.
9. Золотаревский С. А. Газовое лучистое отопление – радикальное решение для повышения энергоэффективности и конкурентоспособности промышленных предприятий // Автоматизация и IT в энергетике. 2018. № 5(106). С. 46-51.
10. Повышение коэффициента полезного действия лучистой системы отопления с применением в качестве отопительных приборов "светлых" газовых инфракрасных излучателей / Н. И. Куриленко, М. Н. Чекардовский, Л. Ю. Михайлова, А. Н. Ермолаев // Инженерный вестник Дона. 2015. № 4(38). С. 73.

11. Кюблер Т. Инфракрасная отопительная техника больших помещений. СПб.: Печатный двор, 2004. 224 с.
12. Маслов В.А. Энергетический менеджмент. Мариуполь: ПГТУ, 2016. 95 с.
13. Наумова О. В., Жиганов В. А. Особенности применения инфракрасных излучателей в системах отопления // Научно-технические проблемы совершенствования и развития систем газоснабжения. 2020. № 1. С. 101-105.
14. Пелипенко В.Н., Слесарев Д.Ю. Газовые горелки инфракрасного излучения. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2012. 118 с.
15. Тепловизионные исследования температурных полей светлых инфракрасных излучателей / Е. В. Птицына, Д. В. Птицын, А. Б. Кувалдин, А. П. Кислов // Энерго- и ресурсосбережение - XXI век : материалы XII международной научно-практической интернет-конференции. Орёл: Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, 2016. С. 128-133.
16. Стрельников В. А., Севостьянов В. О. Типы инфракрасных излучателей применяемых для отопления производственных цехов предприятий // Современное состояние и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения: материалы VI Международной научно-практической конференции. Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова. Саратов: Амирит, 2017. С. 276-279.
17. Филинков Л. И. Особенности газолучистых систем отопления // Школа научно-технического творчества и концептуального проектирования: Международная научная школа для молодежи: в 2 т. Астрахань: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Астраханский государственный университет", 2011. С. 337-342.
18. Газолучистое отопление. Научно-практические проблемы и особенности проектирования / С.В. Чуйкин, Т.А. Змановский, А.Р. Бохан, К.А. Григорьева // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. 2019. № 4 (17). С.29-33.
19. Шевлякова О. Е., Портнов В. В. Об эффективности использования систем газолучистого обогрева для отопления больших помещений // Сборник трудов победителей конкурса на лучшую научную работу студентов и аспирантов ВГТУ. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2007. С. 69-70.
20. Recknagel Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik / Recknagel, Sprenger, Schramek // R. Oldenburg, Verlag GmbH, Munchen, 1995. 67 с.

References

1. Baader V. Don E., Brennderfer M. *Biogaz: teoriya i praktika* [Biogas: theory and practice]. Moscow, 1982.
2. Barashkova N. P. [Comparison of infrared gas emitters by design features (light and dark) and recommendations for use]. *Vestnik magistratury*, 2019, no. 1-2(88), pp. 53-55.
3. Belousov V. N., Smorodin S. N., Smirnova O. S. *Toplivo i teoriya goreniya. Toplivo uchebnoe posobie* [Fuel and the theory of combustion. Fuel. St. Petersburg, 2011. 84 p.
4. Bogomolov A.I., Bogomolov A.I. *Gazovye gorelki infrakrasnogo izlucheniya i ih primenenie* [Gas burners of infrared radiation and their application]. Moscow, 1967.
5. Ermakov N. O., Chuikin S. V. Optimizaciya raboty svetlogo izluchatelya na bednoj gazovoj smesi [Optimization of operation of a light emitter on a lean gas mixture]. *San-tehnika. Otoplenie. Kondicionirovanie. = Plumbing. Heating. Conditioning*, 2021, no.09 (237), pp. 48-51.
6. Ermakov N. O. Konstruktivnye izmeneniya v svetlom izluchatele dlya raboty na biogaze [Structural changes in the light emitter for biogas operation]. *Molodoj uchenyj = Young scientist*, 2021, no. 49 (391), pp. 27-29.
7. Ermakov N. O. Chuikin S. V. *Problemy ispol'zovaniya biogaza v svetlyh izluchatelyah* [Problems of using biogas in light emitters]. *Gradostroitel'stvo. Infrastruktura. Kommunikacii. = Urban Planning. Infrastructure. Communications*, 2020, no. 3, pp. 24-29.
8. Singer A. S., Singer A. S., Alimbayev V. G., Kozlov A.V. Gazovye infrakrasnye izluchateli [Gas infrared emitters]. *Innovative development of the agro-industrial complex for ensuring food security of the Russian Federation: A collection of materials of the International scientific and practical Conference*. Tyumen, 2020, pp. 53-60.
9. Zolotarevskij S. A. Gazovoe luchistoe otoplenie - radikal'noe reshenie dlya povysheniya energoeffektivnosti i konkurentosposobnosti promyshlennyyh predpriyatij [Gas radiant heating is a radical solution for improving energy efficiency and competitiveness of industrial enterprises]. *Avtomatizaciya i IT v energetike. = Automation and IT in the Energy Sector*. 2018, no. 5(106), pp. 46-51.
10. Kurilenko N. I., CHekardovskij M. N., Mihajlova L. YU., Ermolaev A. N. Povyshenie koefficienta poleznogo dejstviya luchistoj sistemy otopleniya s primeneniem v kachestve otopitel'nyh priborov "svetlyh" gazovyh infrakrasnyh izluchatelej [Increasing the efficiency of a radiant heating system with the use of "light" gas infrared emitters as heating devices]. *Inzhenernyj vestnik Dona = Engineering Bulletin of the Don*, 2015, no. 4(38), p. 73.
11. Kubler T. *Infrakrasnaya otopitel'naya tekhnika bol'shih pomeshchenij*. [Infrared heating equipment for large rooms]. St.Petersburg, 2004, 224 p.

12. Maslov V.A. *Energeticheskij menedzhment* [Energy Management: a textbook]. Mariupol, 2016, p. 95.
13. Naumova O. V., ZHiganov V. A. Osobennosti primeneniya infrakrasnyh izluchatelej v sistemah otopeniya [Features of the use of infrared emitters in heating systems]. *Nauchno-tekhnicheskie problemy sovershenstvovaniya i razvitiya sistem gazoenergосnabzheniya*. = *Scientific and technical problems of improvement and development of gas power supply systems*, 2020, no. 1, pp. 101-105.
14. Pelipenko V. N., Slesarev D. Y. *Gazovye gorelki infrakrasnogo izlucheniya: ucheb. posobie*. [Gas burners of infrared radiation: textbook. manual]. Togliatti, 2012, 118 p.
15. Pticyna E.V., Pticyn D. V., Kuvaldin A. B., Kislov A. P. Teplovizionnye issledovaniya temperaturnyh polej svetlyh infrakrasnyh izluchatelej [Thermal imaging studies of temperature fields of light infrared emitters]. *Energy and resource conservation - XXI Century : Materials of the XII International Scientific and Practical Internet Conference*, Orel, 2016, pp. 128-133.
16. Strel'nikov V. A., Sevost'yanov V. O. Tipy infrakrasnyh izluchatelej primenyaemyh dlya otopeniya proizvodstvennyh cekhov predpriyatij [Types of infrared emitters used for heating production workshops of enterprises]. *The current state and prospects for the development of construction, heat and gas supply and energy supply: materials of the VI International Scientific and Practical Conference*. Saratov: Amirit, 2017, p. 276-279.
17. Filinkov L. I. Osobennosti gazoluchistyh sistem otopeniya [Features of gas-powered heating systems]. *School of Scientific and Technical Creativity and Conceptual Design: International Scientific School for Youth*. Astrakhan, 2011, pp. 337-342.
18. Chuikin S. V., Zmanovsky T. A., Bohan A. R., Grigorieva K. A. «Gazoluchistoe otopenie». Nauchno-prakticheskie problemy i osobennosti proektirovaniya [«Gas-radiant heating». Scientific and practical problems and design features]. *Gradostroitel'stvo. Infrastruktura. Kommunikacii*. = *Urban Planning. Infrastructure. Communications*. 2019, no. 4 (17), pp. 29-33.
19. Shevlyakova O. E., Portnov V. V. Ob effektivnosti ispol'zovaniya sistem gazoluchistogo obogreva dlya otopeniya bol'shih pomeshchenij [On the efficiency of using gas-radiant heating systems for heating large rooms]. *Collection of works of the winners of the competition for the best scientific work of students and postgraduates of VSTU*. Voronezh, Voronezh State Technical University Publ., 2007, pp. 69-70.
20. Recknagel, Sprenger, Schramek Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. R. Oldenburg, Verlag GmbH, Munchen, 1995. 67 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Ермаков Никита Олегович, аспирант кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: nikita1594@mail.ru

Nikita O. Ermakov, Post-Graduate Student, Heat and Gas Supply and Oil and Gas Business Department, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: nikita1594@mail.ru

Чуйкин Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: nikita1594@mail.ru

Sergei V. Chuikin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Oil and Gas Business, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: nikita1594@mail.ru

Методика выбора способа управления распределенными информационными системами в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры

А. Б. Клименко¹ ✉

¹ Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем им. академика А.В. Каляева Южного федерального университета, ул. Чехова, д. 2, г. Таганрог 347928, Российская Федерация

✉ e-mail: anna_klimenko@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Целью данного исследования является подбор метода управления распределенной системой, который бы, на основании известных параметров, позволил уменьшить расход ресурсов вычислительных устройств. Под ресурсом информационной системы понимается вероятность безотказной работы (ВБР), которая снижается с течением времени для каждого узла, тем быстрее, чем выше его загруженность.

Методы. Учитывая, что при высокой динамике краевого слоя сети частота реконфигураций системы становится относительно высокой, а необходимость реконфигураций непредсказуема, снижение общего времени, затрачиваемого на реконфигурации, позволяет увеличить время, затрачиваемое на решение функциональных вычислительных задач системы, и тем самым снизить загруженность узлов. Время реконфигурации может быть уменьшено как за счет уменьшения времени детекции отказа в распределенной системе, так и за счет уменьшения времени поиска новой конфигурации. В данной работе рассмотрен способ снижения времени детекции отказов. Анализ применимости методов управления системой (централизованный, с распределенным лидером, децентрализованный) производится на основе полученных аналитических оценок времени детекции системой отказа в условиях управления посредством того или иного метода. Численный эксперимент позволяет выделить области параметров систем, где предпочтительно использование метода с распределенным лидером.

Результаты. Основным результатом данной работы является методика выбора способа управления распределенными информационными системами в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры, ориентированная на уменьшение расхода ресурсов вычислительных устройств.

Заключение. Время реконфигурации системы может быть сокращено за счет выбора наиболее подходящего метода управления. Таким образом увеличивается время, отводимое на решение функциональных задач приложения, снижается загруженность вычислительных узлов и, следовательно, повышаются значения ВБР на протяжении горизонта планирования.

Ключевые слова: крайевые вычисления; надежность; распределенные системы; реконфигурация; управление информационными системами; децентрализованное управление; распределенный лидер.

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

Финансирование: Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-29-03229 и 18-29-22093.

Для цитирования: Клименко А. Б. Методика выбора способа управления распределенными информационными системами в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(1): 57-72. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-57-72>.

Поступила в редакцию 06.02.2022

Подписана в печать 25.02.2022

Опубликована 31.03.2022

A Technique of the Distributed Information Systems Control Method Choice under the High Network Dynamics Conditions

Anna B. Klimenko ¹ ✉

¹ Scientific Research Institute of Multiprocessor Computer Systems of Southern Federal University
2 Chekhov str., Taganrog 347928, Russian Federation

✉ e-mail: anna_klimenko@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The purpose of this study is to select a method for managing a distributed system, which, based on known parameters, would reduce the consumption of resources of computing devices. The resource of an information system is understood as the probability of failure-free operation (reliability function), which degrades over time for each node, the faster, the higher its workload.

Methods. Considering that with high dynamics of the edge layer of the network, the frequency of system reconfigurations becomes relatively high, and the need for reconfigurations is unpredictable, reducing the total time spent on reconfigurations makes it possible to increase the time spent on solving functional computational problems of the system and thereby reduce the load of nodes. The reconfiguration time can be reduced both by reducing the time for detecting a failure in a distributed system, and by reducing the new configuration forming time. In this paper, a method for reducing the time of the failure detection is considered. The analysis of the applicability of system control methods (centralized, with a distributed leader, decentralized) is based on the obtained analytical estimates of the time the system detects a failure under control conditions using one method or another. A numerical experiment makes it possible to identify areas of system parameters, where it is preferable to use the method with a distributed leader.

Results. The main result of this work is a methodology for choosing a method for managing distributed information systems in conditions of high dynamics of the network infrastructure, focused on reducing the consumption of resources of computing devices.

Conclusion. System reconfiguration time can be shortened by choosing the most appropriate control method. Thus, the time allotted for solving the functional tasks of the application increases, the workload of the computational nodes decreases, and, therefore, the FBG values increase over the planning horizon.

Keywords: edge computing; reliability; distributed systems; reconfiguration; information systems management; decentralized control; distributed leader.

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

Funding: The research was carried out with the support of the Russian Foundation for Fundamental Research: № 18-29-03229 и 18-29-22093.

For citation: Klimenko A. B. A Technique of the Distributed Information Systems Control Method Choice under the High Network Dynamics Conditions. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(1): 57-72 (In Russ.). [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2022-26-1-57-72](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-57-72).

Received 06.02.2022

Accepted 25.02.2022

Published 31.03.2022

Введение

В настоящее время происходит интенсивное расширение круга информационных систем, использующих туманный и краевые слои сети для решения функциональных задач. Такая тенденция, прежде всего, связана с возрастанием объемов обрабатываемой информации, что приводит к недостаточности облачных сервисов как в смысле нагрузки на сеть при передаче данных в облако, так и в смысле латентности систем, возникающей вследствие необходимости передачи данных через многочисленные промежуточные узлы сети.

Однако туманный и краевой слои сети обладают высокой динамикой, то есть топология сети, узла, ее составляющие и связи между ними могут меняться практически непредсказуемо в зависимости от целей и задач владельцев узлов. Такая динамика внешних слоев сети приводит к множественным реконфигурациям систем, что, в свою очередь, может негативно сказываться на качестве предоставляемых сервисов (QoS), а также на загруженности устройств в случае, когда функциональные задачи должны решаться в строго отведенное для этого время [1-7].

Проблеме минимизации времени реконфигураций для информационных систем, функционирующих на краю сети, в

настоящее время посвящен достаточно широкий круг работ, например: [8-10]. Однако известные и находящиеся в открытом доступе работы рассматривают минимизацию времени на реконфигурацию с точки зрения повышения QoS. В данной статье проблема уменьшения времени реконфигурации будет рассмотрена с точки зрения остаточного ресурса вычислительных устройств.

Остаточный ресурс вычислительного устройства оценивается значением вероятности безотказной работы (ВБР) этого устройства [11]. В данной работе показано, каким образом остаточный ресурс связан с временем, отводимым для реконфигураций, и каким образом снижение временных затрат позитивно сказывается на ВБР устройства.

Целью данного исследования является подбор метода управления распределенной системой, который бы, на основании известных параметров, позволил уменьшить расход ресурсов вычислительных устройств.

Как результат исследования, в работе предложена методика выбора способа управления распределенными информационными системами в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры, сокращающая время детекции отказа в системе и тем самым предоставляющая дополнительное время для выполнения системой функциональных задач.

1. Материалы и методы

1.1. Реконфигурации систем в туманном и краевом слое сети и ВБР устройств

Проблема необходимости частых реконфигураций в динамических слоях сети является актуальной и рассматривается в работах [1-3]. Однако, учитывая тот факт, что не удалось обнаружить работы, в которых бы проблема была рассмотрена на примерах конкретных функционирующих систем с перечислением актуальных параметров сетевой инфраструктуры, будем рассматривать проблему для произвольной информационной системы, функционирующей в динамических слоях сети. Очевидно, что при миграции контейнеров/виртуальных машин время конфигурации в сильной степени будет зависеть от характеристик сети: чем выше скорость передачи данных, тем меньше соответственно времени потребуется на перемещение данных и на реконфигурацию в целом. Однако необходимо отметить, что край сети далеко не всегда обладает желаемыми характеристиками линий связи, что, в свою очередь, требует дополнительных мер по сокращению времени реконфигурации.

Рассмотрим выражение, позволяющее связать ВБР устройства и его загруженность [12]:

$$P(t) = e^{-\lambda_0 \cdot 2^{dL/10} t}, \quad (1)$$

где λ_0 – интенсивность отказов незагруженного устройства;

L – загруженность вычислительного устройства.

Введем также понятие пользовательской операции: пользовательской операцией в контексте данной работы является процедура сбора, обработки данных и предоставления пользователю результатов. Следует отметить, что время пользовательской операции для распределенных интернет-систем может составлять часы, поскольку, например, сбор данных может осуществляться посредством краулинга интернет-источников, противодействующих ему.

Под остаточным ресурсом системы устройств, реализующих вычисления в рамках функциональных задач информационной системы будем понимать следующее:

$$\Delta P = \prod_i P_i(T_0) - \prod_i P_i(T_{op}) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $P_i(T_0)$ – ВБР i -го устройства на начало пользовательской операции;

$P_i(T_{op})$ – ВБР i -го устройства на конец пользовательской операции.

Соответственно, с уменьшением значения ΔP , происходит увеличение остаточного ресурса [11,12].

Рассмотрим выражение (1). Значение ВБР на конец пользовательской операции зависит от загруженности устройства, которая, в том числе, зависит от доли времени, которая отводится для решения непосредственно функциональных задач. Реконфигурации, которые при этом происходят, уменьшают фактическое время для решения функциональных задач, поскольку реконфигурация является сама по себе вычислительной задачей, необходимость реше-

ния которой возникает в непредсказуемые моменты времени (рис.1). При этом реконфигурация также влияет на остаточный ресурс устройства.

В основе предлагаемой методики лежит следующее утверждение: умень-

шение суммарного времени реконфигураций на пользовательскую операцию позволяет таким образом распределить нагрузку с учетом дополнительного времени, что при этом снизится значение (2) (рис.2).

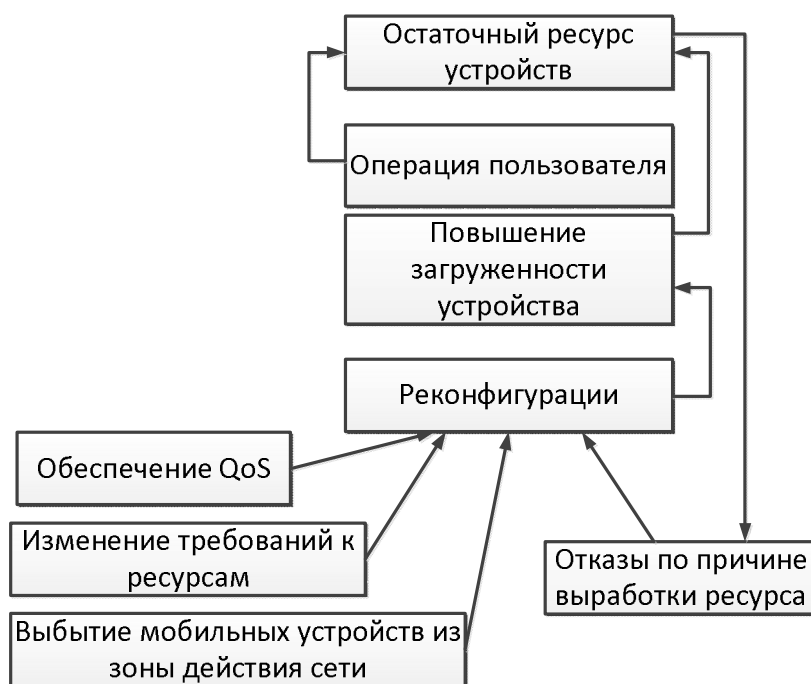


Рис. 1. Взаимное влияние параметров системы

Fig. 1. Mutual influence of system parameters

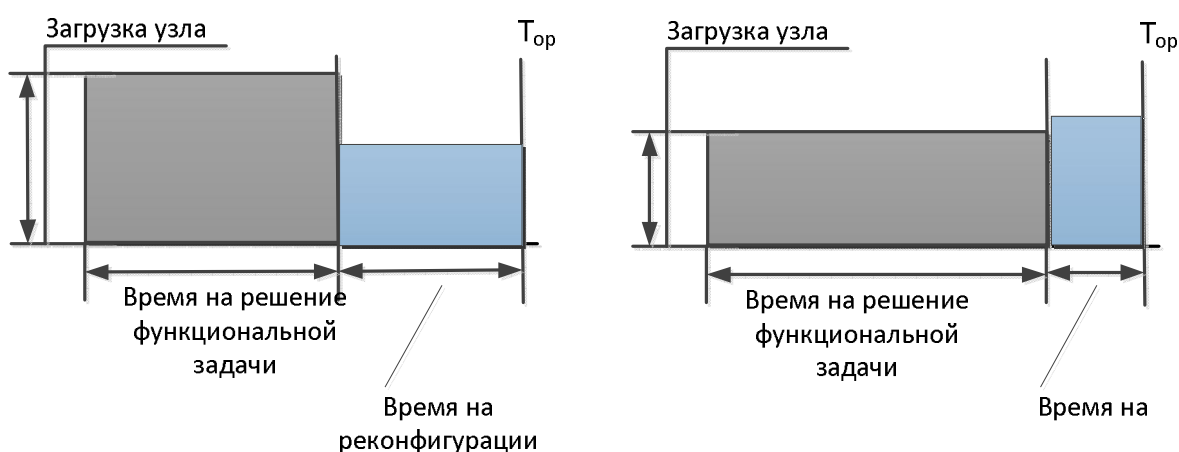


Рис. 2. Влияние времени реконфигураций на загруженность устройства

Fig. 2. The effect of reconfiguration time on device utilization

Время, требующееся на реконфигурацию, может быть уменьшено путем повышения нагрузки на вычислительное устройство, однако это приводит к ухудшению значений остаточных ресурсов устройств. По этой причине предлагается уменьшить время реконфигурации за счет применения такого метода управления элементами информационной системой, который бы для условий функционирования системы позволит сократить время реконфигурации.

В свою очередь, время реконфигурации складывается из:

- времени детекции отказа устройства (выбытия его из коллектива решающих устройств в рамках системы);
- времени формирования нового коллектива устройств.

В рамках данной работы проведено исследование зависимости времени детекции отказа для базовых методов управления системами:

- централизованного [13];
- с распределенным лидером [14-17];
- полностью децентрализованного [18-20].

На основе численного моделирования сформулирована методика выбора способа управления системой, которая позволяет уменьшить время реконфигурации и тем самым увеличить время, которое может быть потрачено на решение функциональных задач информационной системы.

1.2. Методы управления системой

Централизованное управление предполагает наличие узла, который в коллективе вычислительных устройств является лидером. Несомненным преимуществом такого подхода к организации управления является относительная простота реализации и высокое быстродействие в случае отказа одного из узлов-последователей. Однако в случае отказа лидера, система становится неуправляемой. Данная проблема решается путем введения резерва для узла-лидера, однако такой резерв требует дополнительной синхронизации данных с лидером, что ставит под вопрос целесообразность такого подхода.

Хорошей альтернативой организации отказоустойчивой системы с лидером является построение распределенного лидера. Такой подход используется во многих системах репликации данных [14-17] и описан в протоколах RAFT, ViewStamped Replication. В рамках подхода с распределенным лидером операции реализуются следующим образом: время функционирования системы разбивается на раунды (эпохи). В пределах одной эпохи функционирует один лидер, который, в случае отказа, заменяется другим. Достоинством данного метода является то, что он объединяет в себе достоинства централизованного метода (простоту реализации и скорость), но при этом обладает отказоустойчивостью, что, в свою очередь, актуально для динамичных слоев сети.

И, наконец, третий, рассмотренный здесь метод управления системой – полностью децентрализованный [18-20], при котором узлы эквиваленты и обладают унифицированным набором функций. Однако при высоких показателях надежности такой метод, во-первых, предполагает избыточность информационного обмена, во-вторых, в случае отказа узлов принимается совместное решение по поводу, какие именно узлы отказали. Это занимает дополнительное время.

Восстановление системы после отказа включает время детекции отказа и изменение конфигурации (новая привязка программных компонент к узлам). Соответственно, уменьшение времени детекции отказа, поиска и принятия новой конфигурации позволяет сократить время реконфигурации системы. Однако поиск новой конфигурации может быть оптимизирован путем выбора методов стохастического поиска, а также выбора методов распараллеливания, в то время как сокращение времени детекции отказа предлагается произвести путем выбора наиболее подходящего метода управления системой.

Приведем аналитические модели времени, необходимого для детекции отказа в рамках трех перечисленных методов управления.

При централизованном управлении детекция отказов заключается в следующем:

– необходимо зафиксировать отсутствие сигнала от подчиненного узла;

– просмотреть список узлов и объявить некоторые из них отказавшими.

Время, необходимое для детекции отказа таким способом, может быть оценено как:

$$O(D_{min}) + O(N-F) \leq t \leq O(D_{max}) + O(N-F). (3)$$

Детекция отказа с распределенным лидером складывается из следующих действий:

- фиксация отказа лидером, или
- фиксация подчиненным отказа лидера;
- установление связи с членами группы;
- выборы нового лидера;
- составление списка отказавших узлов лидером.

Время реконфигурации, соответственно, описывается выражением:

$$O(D_{min}) + O(N-F) \leq t \leq 2O(D_{max}) + 2(N-F)O(D_{max}) + O(N-F). (4)$$

Детекция отказа в системе с полностью децентрализованным управлением будет состоять из следующих шагов:

- фиксация отказа узла;
- обмен списками потенциально отказавших узлов;
- достижение консенсуса по отказавшим узлам;
- если консенсус не состоялся, повторить процедуру.

И, таким образом, оценивается как показано в выражении:

$$2O(D_{min}) + O(NF) < t < K(2O(D_{max}) + O(NF)). (5)$$

В следующем разделе будут приведены результаты моделирования, сформированные предварительные выводы по результатам и представлена методика, полученная на основе моделирования.

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Результаты численного моделирования

На основе аналитических оценок проведем серию экспериментов для зависимостей времени от:

- численности группы устройств при одном отказе (рис.3,4);
- максимального диаметра сети устройств при одном отказе (рис.5,6);
- количества одновременно отказавших устройств в сети (рис.7,8).

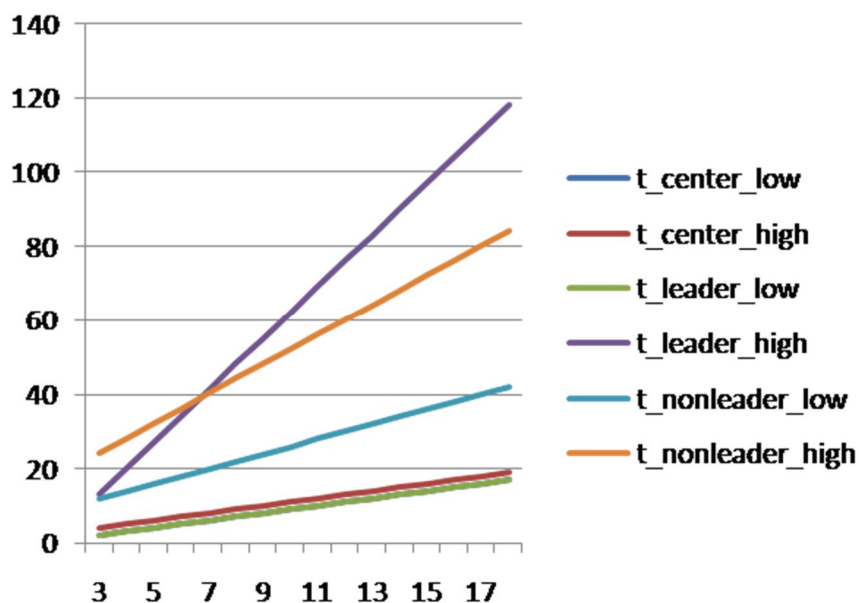


Рис. 3. Зависимость времени детекции от численности группы при диаметре сети=3

Fig. 3. The dependence of the detection time on the number of the group with the diameter of the network = 3

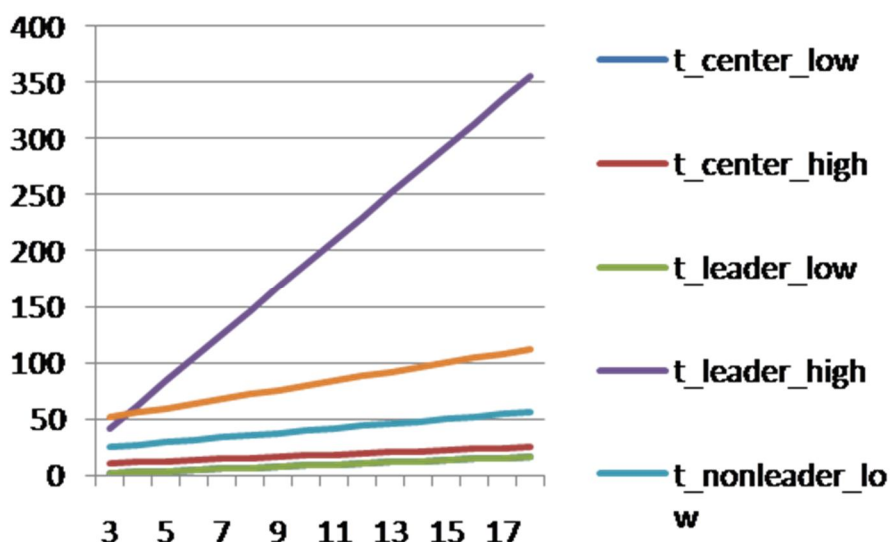


Рис. 4. Зависимость времени детекции от численности группы при диаметре сети=10

Fig. 4. The dependence of the detection time on the number of the group with a network diameter = 10

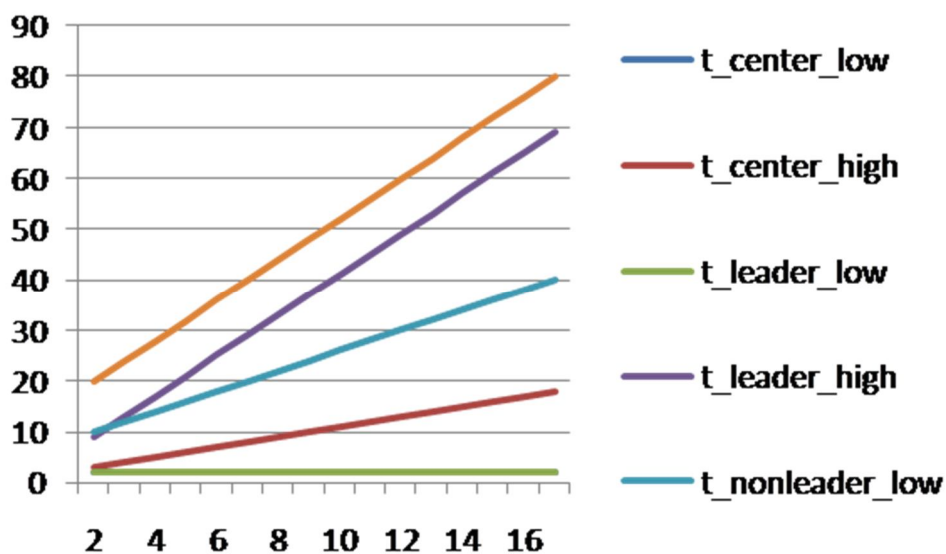


Рис. 5. Зависимость времени детекции от максимального диаметра сети при количестве устройств=3

Fig. 5. The dependence of the detection time on the maximum diameter of the network with the number of devices =3

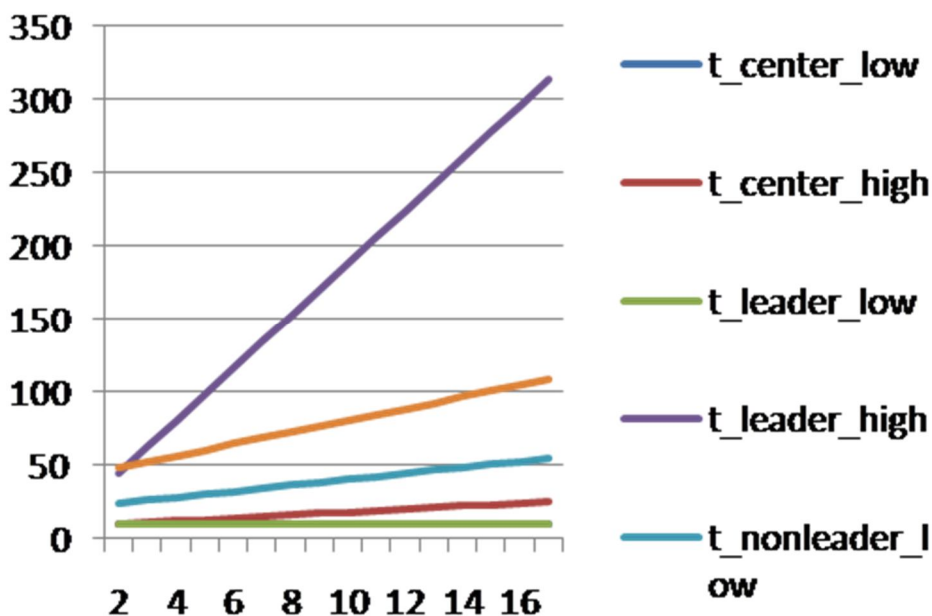


Рис. 6. Зависимость времени детекции от максимального диаметра сети при количестве устройств=10

Fig. 6. The dependence of the detection time on the maximum diameter of the network with the number of devices = 10

Наиболее весомые выводы, сделанные по результатам моделирования, следующие:

– при управлении системой на основе метода с распределенным лидером, наихудший результат получается в случае отказа лидера, но при этом, в случае отказов узлов-последователей, время детекции равно времени детек-

ции централизованного метода, что гораздо лучше, чем при полностью децентрализованном управлении;

– при отказах узлов более одного метод с распределенным лидером показывает лучший результат по причине сокращения относительного объема информации для обмена.

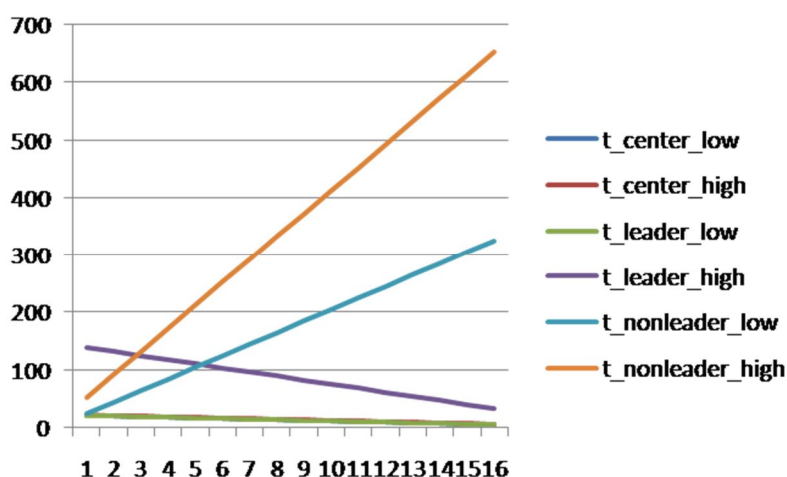


Рис. 7. Зависимость времени детекции от количества одновременно отказавших устройств при $D_{\max}=3$; $N=20$

Fig. 7. The dependence of the detection time on the number of simultaneously failed devices at $D_{\max}=3$; $N=20$

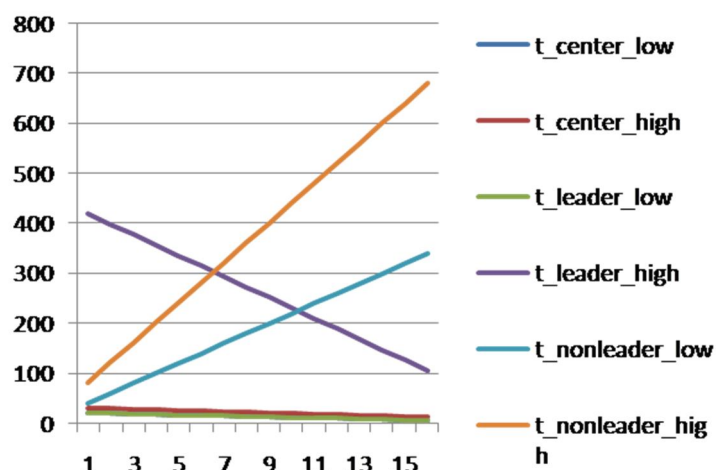


Рис. 8. Зависимость времени детекции от количества одновременно отказавших устройств при $D_{\max}=10$; $N=20$

Fig. 8. Dependence of the detection time on the number of failed devices at the same time at $D_{\max}=10$; $N=20$

Сведем результаты моделирования в таблицу 1, соотнося количественные результаты и свойства системы (параметры диаметр сети, количество узлов и их статичность).

Таким образом, на основании полученных данных может быть сформирована методика выбора способа управления распределенными информационными системами в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры.

Таблица 1. Применение методов управления

Table 1. Application of management methods

Сменный лидер / Replacement Leader	Децентрализованное управление / Decentralized Management
Малое количество задействованных устройств	Произвольное количество задействованных узлов
Малый диаметр сети	Произвольный диаметр сети
Высокая динамичность устройств (одновременный отказ от $\frac{1}{4}$ общей группы) при малом диаметре сети	Высокая динамичность узлов при одновременных отказах малого количества устройств
Наличие подгруппы узлов с высокими показателями статичности	Гомогенная группа по признаку статичности

2.2. Методика выбора способа управления

Основываясь на результатах моделирования, можно сделать определенные выводы о возможности выбора того или иного метода управления системой узлов, функционирующих в динамическом слое сети с целью сокращения времени реконфигурации. Последовательность действий в рамках предлагаемой методики приведена на рис. 9.

Таким образом, определяющим условием в выборе метода управления с децентрализованным лидером является наличие группы статичных узлов, на которых может функционировать распределенный лидер. Это объясняется

тем, что процедура смены лидера (а именно, пересылка контекстных данных и синхронизация узлов-последователей с лидером) является времязатратной и нивелирует все преимущества распределенного лидера по сравнению с прочими методами управления в том случае, если отказывает лидер.

Поскольку методики, ориентированные на сокращение времени реконфигурации, не рассматривают изменение ВБР устройства как целевую функцию, для оценки результата применения разработанной методики сравним значения ВБР устройства для $t=100$ ч. для различных значений доли времени, выделяемого на реконфигурацию (рис.10).

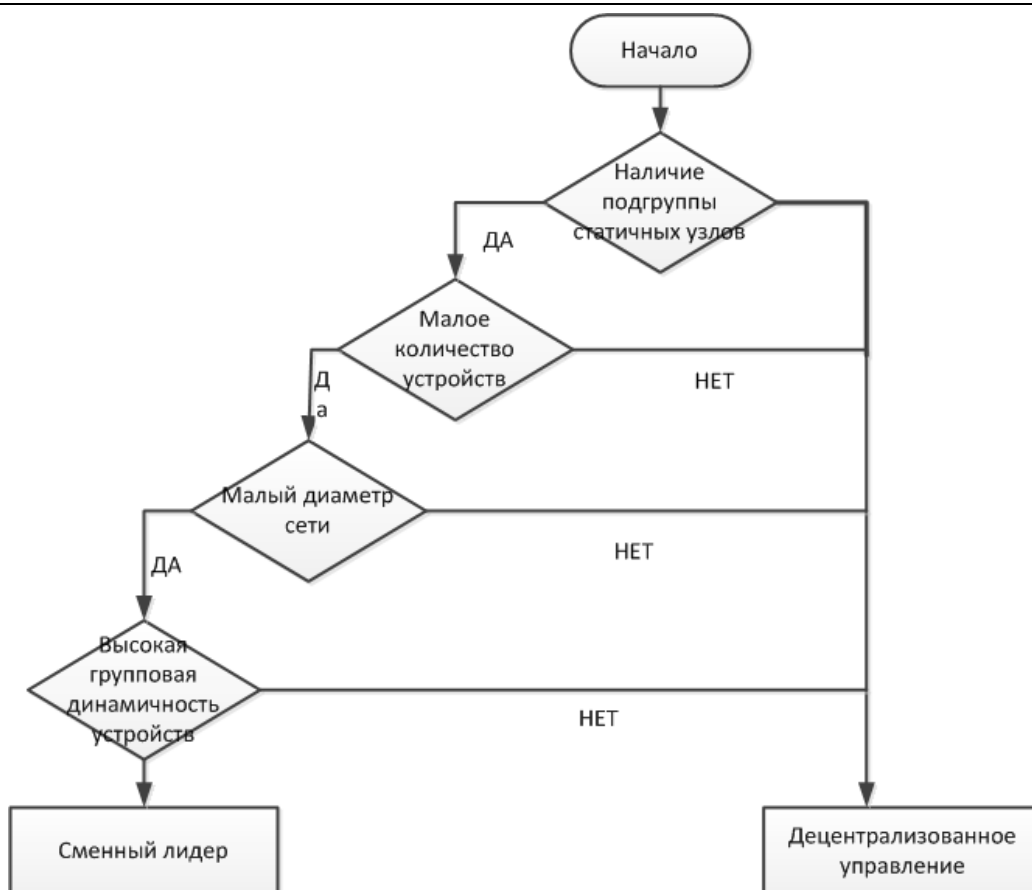


Рис. 9. Методика выбора способа управления распределенными информационными системами в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры

Fig. 9. Methodology for choosing a method for managing distributed information systems in conditions of high dynamics of network infrastructure

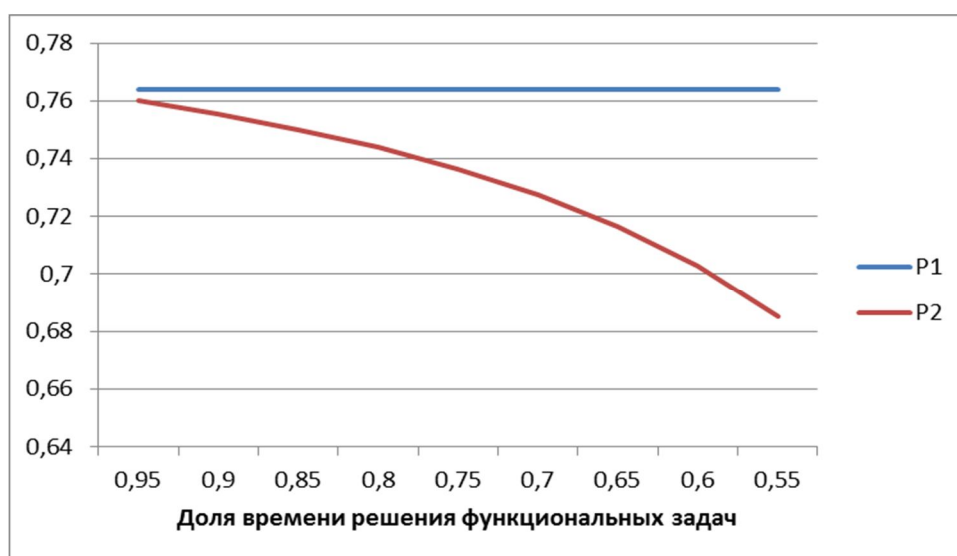


Рис. 10. Зависимость значения ВБР устройства в зависимости от доли времени пользовательской операции, используемой для решения функциональной задачи

Fig. 10. Dependence of the device's VBR value depending on the fraction of time of the user operation used to solve the functional problem

Видно, что с увеличением доли времени, тратящегося на реконфигурационные процессы, значение ВБР устройства ухудшается и достигает значимых величин (порядка 10%), когда реконфигурации начинают занимать более 55% времени пользовательской операции.

Выводы

В данной статье предложена методика выбора способа управления распределенными информационными системами в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры с целью уменьшения расхода ресурса вычислительных узлов, который достигается за счет со-

кращения времени реконфигурации системы и, таким образом, позволяет использовать дополнительное время для решения вычислительных задач информационных систем и тем самым снизить загруженность вычислительных узлов.

Моделирование временных затрат для различных методов управления распределенными информационными системами позволило выделить условия, при которых более целесообразно использовать метод управления с распределенным лидером, тогда как в остальных случаях целесообразно реализовать управление на основе децентрализованного метода управления.

Список литературы

1. Container Migration in the Fog / Puliafito Carlo, Vallati Carlo, Mingozzi Enzo, Merlino Giovanni, Longo Francesco, Puliafito Antonio // A Performance Evaluation. Sensors. 2019. 19. 1488. 10.3390/s19071488.
- 2.. 2017. Mobile Edge Computing Potential in Making Cities Smarter / Taleb Tarik, Dutta Sunny, Ksentini Adlen, Iqbal Muddesar, Flinck Hannu / IEEE Communications Magazine. 55. 38-43. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600249CM>.
3. Rejiba Zeineb, Masip Xavi, Marin-Tordera E. A Survey on Mobility-Induced Service Migration in the Fog, Edge, and Related Computing Paradigms. ACM Computing Surveys. 2019. 52. 1-33. <https://doi.org/10.1145/3326540>.
4. Wang Y., Gu Yu, Tao Xiaofeng. Edge Network Slicing With Statistical QoS Provisioning. IEEE Wireless Communications Letters. 2019. P. 1-1. <https://doi.org/10.1109/LWC.2019.2922605>.
5. Saggu Deepak, Azim Akramul. 2021. Transfer Learning on the Edge Networks. 1-8. <https://doi.org/10.1109/SysCon48628.2021.9447110>.
6. Wang Y. & Gu Yu, Tao Xiaofeng. Edge Network Slicing With Statistical QoS Provisioning. IEEE Wireless Communications Letters. 2019. P. 1-1. <https://doi.org/10.1109/LWC.2019.2922605>.
7. Niu Guanchong, Cao Qi, Pun Man-on. QoS-Aware Resource Allocation for Mobile Edge Networks: User Association, Precoding and Power Allocation. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2021. P. 1-1. 10.1109/TVT.2021.3076353.

8. Completion Time Minimization for UAV-Assisted Mobile-Edge Computing Systems / Xu Yu, Zhang Tiankui, Loo Jonathan, Yang Dingcheng, Xiao Lin // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2021. P. 1-1. <https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3112853>.
9. Collaborative Cloud and Edge Computing for Latency Minimization / Ren Jinke, Yu Guanding, He Yinghui, Li Geoffrey // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2019. P. 1-1. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2904244>.
10. Partial Offloading for Latency Minimization in Mobile-Edge Computing / Ren Jinke, Yu Guanding, Cai Yunlong, He Yinghui, Qu Fengzhong // 2017. 1-6. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2017.8254550>.
11. Klimenko Anna, Kalyaev Igor. 2021. A Technique to Provide an Efficient System Recovery in the Fog- and Edge-Environments of Robotic Systems. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87725-5_9.
12. Korovin I., Melnik E., Klimenko A. A Recovery Method for the Robotic Decentralized Control System with Performance Redundancy. In: Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R. (eds) Interactive Collaborative Robotics. ICR 2016. Lecture Notes in Computer Science, vol 9812. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-43955-6_2
13. Gardner Raymond. 2020. Centralized control systems, DCS, and SCADA. <https://doi.org/10.1201/9781003091134-17>.
14. Liskov Barbara, Cowling James. 2012. Viewstamped Replication Revisited.
15. Petrescu M., Petrescu R.. 2020. Log Replication in Raft vs Kafka. Studia Universitatis Babeş-Bolyai Informatica. 65. 66. <https://doi.org/10.24193/subbi.2020.2.05>.
16. Oki B. Viewstamped replication for highly available distributed systems. 2021.
17. Howard Heidi, Charapko Aleksey, Mortier Richard. 2021. Fast Flexible Paxos: Relaxing Quorum Intersection for Fast Paxos. P.186-190. <https://doi.org/10.1145/3427796.3427815>.
18. Müller Jörg. 2021. Decentralized Information Systems: Paradigms, Architectures, and Applications.
19. Castro Oom, Correia Miguel. 2001. Practical Byzantine fault tolerance.
20. König Hans-Jürgen. 1994. Competitive Advantages through Flexible Design of Decentralized Information Systems. https://doi.org/10.1007/978-3-642-46955-8_72.

References

1. Puliafito Carlo, Vallati Carlo, Mingozzi Enzo, Merlino Giovanni, Longo Francesco, Puliafito Antonio. Container Migration in the Fog: A Performance Evaluation, Sensors, 2019. 1488. <https://doi.org/10.3390/s19071488>.
2. Taleb Tarik, Dutta Sunny, Ksentini Adlen, Iqbal Muddesar, Flinck Hannu. Mobile Edge Computing Potential in Making Cities Smarter. IEEE Communications Magazine. 2017, 55, 38-43. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600249CM>.

3. Rejiba Zeineb, Masip Xavi, Marin-Tordera E. A Survey on Mobility-Induced Service Migration in the Fog, Edge, and Related Computing Paradigms. *ACM Computing Surveys*. 2019, 52. 1-33. <https://doi.org/10.1145/3326540>.
4. Wang Y., Gu Yu, Tao Xiaofeng. Edge Network Slicing With Statistical QoS Provisioning. *IEEE Wireless Communications Letters*. 2019, pp. 1-1. <https://doi.org/10.1109/LWC.2019.2922605>.
5. Saggu Deepak, Azim Akramul. Transfer Learning on the Edge Networks. 2021, 1-8. <https://doi.org/10.1109/SysCon48628.2021.9447110>.
6. Wang Y., Gu Yu, Tao Xiaofeng. Edge Network Slicing With Statistical QoS Provisioning. *IEEE Wireless Communications Letters*. 2019, pp. 1-1. <https://doi.org/10.1109/LWC.2019.2922605>.
7. Niu Guanchong, Cao Qi, Pun Man-on. QoS-Aware Resource Allocation for Mobile Edge Networks: User Association, Precoding and Power Allocation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2021, pp. 1-1. <https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3076353>.
8. Xu Yu, Zhang Tiankui, Loo Jonathan, Yang Dingcheng, Xiao Lin. Completion Time Minimization for UAV-Assisted Mobile-Edge Computing Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2021, pp. 1-1. <https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3112853>.
9. Ren Jinke, Yu Guanding, He Yinghui, Li Geoffrey. Collaborative Cloud and Edge Computing for Latency Minimization. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019, pp. 1-1. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2904244>.
10. Ren Jinke, Yu Guanding, Cai Yunlong, He Yinghui, Qu Fengzhong. Partial Offloading for Latency Minimization in Mobile-Edge Computing. 2017, 1-6. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2017.8254550>.
11. Klimenko Anna, Kalyaev Igor. A Technique to Provide an Efficient System Recovery in the Fog- and Edge-Environments of Robotic Systems. 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87725-5_9.
12. Korovin I., Melnik E., Klimenko A. A Recovery Method for the Robotic Decentralized Control System with Performance Redundancy. In: Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R. (eds) *Interactive Collaborative Robotics. ICR 2016. Lecture Notes in Computer Science*, 2016, vol. 9812. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-43955-6_2
13. Gardner Raymond. Centralized control systems, DCS, and SCADA. 2020. <https://doi.org/10.1201/9781003091134-17>.
14. Liskov Barbara, Cowling James. Viewstamped Replication Revisited. 2012
15. Petrescu M., Petrescu R. Log Replication in Raft vs Kafka. *Studia Universitatis Babeş-Bolyai Informatica*. 2020. 65. 66. <https://doi.org/10.24193/subbi.2020.2.05>.
16. Oki B. Viewstamped replication for highly available distributed systems. 2021.

17. Howard Heidi, Charapko Aleksey, Mortier Richard. Fast Flexible Paxos: Relaxing Quorum Intersection for Fast Paxos. 2021. 186-190. <https://doi.org/10.1145/3427796.3427815>.
18. Müller Jörg. Decentralized Information Systems: Paradigms, Architectures, and Applications. 2021
19. Castro Oom, Correia, Miguel. Practical Byzantine fault tolerance. 2001.
20. König Hans-Jürgen. Competitive Advantages through Flexible Design of Decentralized Information Systems. 1994. https://doi.org/10.1007/978-3-642-46955-8_72.

Информация об авторе / Information about the Author

Клименко Анна Борисовна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем имени академика А.В. Каляева Южного федерального университета, г. Таганрог, Российская Федерация, e-mail: anna_klimenko@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6527-8108>

Anna B. Klimenko, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Research Fellow, Scientific Research Institute of Multiprocessor Computer Systems of Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation, e-mail: anna_klimenko@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6527-8108>

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-73-91>

Модель и методика формирования оптимальной совокупности оборудования контроля и поверки предприятий автомобилестроительного кластера

Е.Э. Аверченкова¹ ✉, А.А. Шабанов²

¹ Брянский государственный технический университет
ул. Горького, д.36, г. Брянск 241050, Российская Федерация

² ООО "Эрга"
ул. Хрустальная, д. 22, г. Калуга 248018, Российская Федерация

✉ e-mail: lena_ki@inbox.ru

Резюме

Цель исследования. Разработать классификатор, модель, а также методику формирования оптимальной совокупности оборудования контроля и поверки для обеспечения эффективного функционирования организационно-технологической системы обеспечения механической сборки на основе резьбовых соединений автоматизированной системы управления технологическим процессом сборки на предприятиях автомобилестроительного кластера.

Методы. Совокупность оборудования контроля и поверки в организационно-технологической системе обеспечения механической сборки на предприятиях автомобилестроительного кластера представлена в работе на основе теоретико-множественного подхода. Основой разработки классификатора оборудования контроля и поверки стал метод иерархической классификации. Формализация процесса принятия решения по формированию совокупности оборудования контроля и поверки основывается на методах теории принятия решений и методов математического анализа.

Результаты. Предложена теоретико-множественная модель совокупности оборудования контроля и поверки, а также соответствующий классификатор. Описана методика принятия решения по формированию оптимальной совокупности оборудования контроля и поверки, позволяющая учитывать фактическую нагрузку на датчики измерения момента затяжки и оптимизировать затраты на закупку оборудования контроля и поверки. Применение разработанных моделей, классификаторов, методик и алгоритмов в условиях предприятия автомобилестроительного кластера показывает значительное снижение трудоемкости технологической подготовки производства, а также значительные показатели экономии финансовых затрат на закупку оборудования при формировании совокупности оборудования контроля и поверки.

Заключение. Разработанные классификатор, а также модель и методика формирования оптимальной совокупности оборудования контроля и поверки позволяют упростить управленческую работу на предприятии автомобилестроительного кластера и решают задачу оптимального управления подсистемой контроля и поверки, входящей в организационно-технологическую систему обеспечения механической сборки на основе резьбовых соединений автоматизированной системы управления технологическим процессом сборки на предприятиях автомобилестроительного кластера.

Ключевые слова: организационно-технологическое обеспечение производства; оборудование контроля и поверки; автомобилестроительный кластер

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

Для цитирования: Аверченкова Е.Э., Шабанов А.А. Модель и методика формирования оптимальной совокупности оборудования контроля и поверки предприятий автомобилестроительного кластера // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(1): 73-91. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-73-91>.

Поступила в редакцию 25.01.2022

Подписана в печать 14.02.2022

Опубликована 31.03.2022

Model and Methodology for Optimal Equipment Setting for Monitoring and Verification of Enterprises of the Automotive Cluster

Elena E. Averchenkova ¹ ✉, Aleksei A. Shabanov ²

¹ Bryansk State Technical University
36, Gorkogo str., Bryansk 241050, Russian Federation

² Erga Ltd,
22, Krustalnaya str., Kaluga 248018, Russian Federation

✉ e-mail: lena_ki@inbox.ru

Резюме

Purpose of research. To develop a classifier of control and verification equipment, to propose a model of a set of control and verification equipment, as well as a methodology for forming an optimal set of control and verification equipment to ensure the effective functioning of an organizational and technological system for providing mechanical assembly based on threaded connections of an automated assembly process control system at automotive cluster enterprises.

Methods. Calibration equipment set in the assembly production organizational and technological system based on thread joints of the automated assembly process control system at the enterprises of the automotive cluster is presented in the work on the basis of a set-theoretic approach. Set-theoretic models are used to describe the calibration equipment set. The method of hierarchical classification became the basis for the development of models. Formalization of the decision-making process on the formation of calibration equipment set is based on the methods of decision theory. Separate elements of the methodology are based on the use of methods of mathematical analysis.

Results. A set-theoretic model of the calibration equipment set is proposed. A classifier of calibration equipment is proposed. The technique of making a decision on the formation of calibration equipment set is described. The technique takes into account the actual load on the sensors for measuring the torque and allowing optimize the cost of calibration equipment purchasing. The cost savings from the use of the developed models, classifiers, methods and algorithms for production technological preparation and for equipment purchasing are calculated. The application of the developed models, classifiers, methods and algorithms in the conditions of an automotive cluster enterprise shows a significant reduction in the labor intensity of technological preparation of production, as well as significant savings in financial costs for the purchase of calibration equipment set.

Conclusion. The developed classifier, model and methodology for the formation of an optimal calibration equipment set make it possible to simplify managerial work at an automotive cluster enterprise and solve the problem of optimal control of calibration equipment subsystem, which is part of assembly production organizational and technological system based on thread joints of the automated assembly process control system at the enterprises of the automotive cluster.

Keywords: organizational and technological support of production; calibration equipment.

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

For citation: Averchenkova E. E., Shabanov A. A. Model and Methodology for Optimal Equipment Setting for Monitoring and Verification of Enterprises of the Automotive Cluster. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(1): 73-91 (In Russ.). [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2022-26-1-73-91](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-73-91).

Received 25.01.2022

Accepted 14.02.2022

Published 31.03.2022

Введение

При конвейерном крупносерийном производстве существенно возрастает влияние на себестоимость продукции производственных потерь, вызванных неисправным оборудованием, что может приводить к нарушению технологических допусков, несвоевременному выявлению брака и возрастанию потерь на устранение последствий брака. От организации калибровки сборочного оборудования существенно зависят производственные потери, а соответствие фактического момента затяжки сборочного инструмента его значению по технологическому процессу является мерой качества сборочной системы. Момент затяжки является основной характеристикой элементов совокупности сборочного оборудования (ССО) и контролируется оборудованием контроля и поверки. Поэтому разработка классификатора оборудования контроля и поверки, модели совокупности оборудования контроля и поверки (СОКП), а также методики формирования оптимальной СОКП на предприятиях автомобилестроительного кластера является важной целью.

По вопросу поверки оборудования можно отметить работу Мишиной Т.А. и Барабановой И.А. [1]. По измерениям момента затяжки и используемому для этого оборудованию можно отметить работы отечественных ученых [2-5]. Вопросы, посвященные процессам и оборудованию сборки, рассматривались в иностранных публикациях [6-11]. Особенности анализа качества болтовых соединений рассмотрены в работах [12, 13]. Исследования процессов калибровки оборудования и описание индексов воспроизводимости процессов, использующихся в качестве индикатора пригодности сборочного оборудования на основе резьбовых соединений, приведены в статьях [14-17]. Однако в современных исследованиях отсутствует классификатор, модель и методика оптимального формирования СОКП для предприятий автомобилестроительного кластера. В данной работе, как и в других работах авторов, применяется научный подход [18], позволяющий формализовать системы управления подсистемами организационно-технологической системы обеспечения механической сборки на предприятиях автомобилестроительного кластера с позиции теории

управления. В данной статье авторами развиваются идеи, заложенные, в том числе в работах [19-22], и предлагается методика оптимального формирования совокупности оборудования контроля и поверки на предприятиях автомобильно-строительного кластера.

Материалы и методы

Современная крупная организационно-технологическая система обеспечения механической сборки на основе резьбовых соединений автоматизированной системы управления технологическим процессом сборки на предприятиях автомобилестроительного кластера (СОМС АСУТП) обычно имеет в своем составе несколько тысяч различных сборочных инструментов, представляющих несколько десятков различных моделей инструментов. Состав оборудования подсистемы контроля и поверки (ПКП), являющейся частью СОМС АСУТП и предназначенной для калибровок элементов ССО и контроля затянутых резьбовых соединений, как правило, является сложным и разнородным.

Авторами был разработан классификатор СОКП, в ранних работах авторов [19-22] были проведены исследования, на основе которых были сформированы основные группы классификатора:

1 – Стационарные стенды измерения момента затяжки сборочного инструмента;

2 – Передвижные стенды измерения момента затяжки сборочного инструмента;

3 – Переносные стенды измерения момента затяжки сборочного инструмента;

4 – Моментные шкальные ключи.

Моментные шкальные ключи, как элемент оборудования контроля и поверки, в состав которого входят измерительные стрелочные, а также цифровые динамометрические ключи, можно выделить в особую подгруппу, т.к. они являются средством контроля – измерения фактического момента затяжки уже затянутого резьбового соединения, а не средством измерения момента затяжки, на который настраивается инструмент.

Разработанный классификатор в АСУТП предприятия служит для систематизации используемого оборудования контроля и поверки. Классификатор используется при поддержке принятия решений по формированию СОКП в АСУТП предприятия.

Важнейшим элементом всех измерительных стендов, входящих в оборудование контроля и поверки являются измерительные датчики для измерения момента затяжки. Датчики, устанавливаемые на измерительные стенды, имеют различные пределы для измерений момента затяжки. В данной работе предлагается оборудование контроля и поверки подразделить на 3 типа стендов: передвижные, переносные и стационарные. Каждый измерительный стенд должен рассматриваться в совокупности с комплектом необходимых для его работы измерительных датчиков. Таким образом, можно представить модель

стенда – элемента совокупности оборудования контроля и поверки следующим образом:

$$B_{\alpha} = \{S_{\gamma} | \gamma = 1 \dots 8\}, \quad (1)$$

где B_{α} – α -й стенд – элемент совокупности оборудования контроля и поверки; $\alpha = 1 \dots 3$ – типы стендов (стационарные, передвижные и переносные) выделяемые в совокупности оборудования контроля и поверки; S_{γ} – γ -й датчик, как правило, на один стенд конструкция позволяет установить до 4, иногда до 8 датчиков, поэтому в реальных СОМС количество датчиков $\gamma = 1 \dots 8$.

Модель совокупности оборудования контроля и поверки тогда представим следующим образом:

$$CE = \{B_{\alpha} | \alpha = 1 \dots m\}, \quad (2)$$

где CE – Совокупность оборудования контроля и поверки; B_{α} – α -й стенд – элемент совокупности оборудования контроля и поверки; m – общее количество стендов – элементов совокупности оборудования контроля и поверки. Как правило, для обслуживания крупной совокупности сборочного оборудования насчитывающей несколько тысяч сборочных инструментов, расположенных на большой территории, используются передвижные и переносные стенды измерения момента затяжки. Однако нередко все оборудование контроля и поверки для не очень большой ССО, не превышающей 1000 единиц сборочных инструментов, состоит только из одного стенда. Это связано с высокой стоимостью оборудования контроля и поверки. На практике, количество различных

стендов используемых на одном даже крупном сборочном предприятии редко превышает 10 штук, таким образом, $m = 1 \dots 10$.

Все элементы СОКП являются сложными в эксплуатации и имеют высокую стоимость. Например, стоимость приобретения передвижного стенда, оснащенного датчиками для контроля момента затяжки, может достигать нескольких миллионов рублей. Помимо этого, все элементы СОКП являются средствами измерения и должны проходить периодическую поверку, стоимость которой для оборудования данной группы также высока (стоимость поверки передвижного стенда, оснащенного датчиками для контроля момента затяжки, может достигать нескольких сот тысяч рублей). Т.е. стоимость эксплуатации данной группы оборудования также высока. Таким образом, приобретение и эксплуатация элементов СОКП является весьма дорогостоящими, что приводит к необходимости оптимизации СОКП.

Для повышения эффективности принятого решения и выработки оптимального решения процесс принятия решений по формированию оптимальной СОКП предлагается структурировать. Разработанный авторами процесс принятия решения по формированию оптимальной совокупности оборудования контроля и поверки состоит из следующих этапов:

1. Анализ СОКП локального предприятия автомобилестроительного кластера с учетом целевых ориентиров головного предприятия – СОКП должно обеспечивать измерение моментов за-

тяжки всех элементов совокупности сборочного оборудования.

2. Формирование критериев оптимальности:

- фактический калибровочный интервал момента затяжки j -го элемента совокупности сборочного оборудования до начала и в период его эксплуатации должен соответствовать моменту затяжки, на который данный инструмент был настроен в соответствии с технологическим процессом сборки изделия;

- стоимость оборудования контроля и поверки минимизирована;

- критерий согласования принятого решения – стоимость решения должна быть в установленных штаб-квартирой пределах.

3. Формирование альтернативных решений о формировании СОКП.

4. Выбор наилучшего решения о формировании СОКП с учетом критериев оптимального управления.

5. Принятие решения о формировании СОКП и его согласование с вышестоящим руководством – основой для согласования принятого решения руководством является критерий согласования принятого решения.

6. Реализация решения о формировании СОКП.

7. Оценка полученных результатов и корректировка при необходимости. Вся информация о вновь сформированной СОКП поступает в базу данных корпорации, где хранится, анализируется и полученный опыт используется для формирования новых и изменения суще-

ствующих СОКП на новых и существующих предприятиях автомобилестроительных кластеров в разных странах.

В табл. 1 представлены основные этапы методики формирования оптимальной СОКП на предприятии автомобилестроительного кластера.

Описание последовательности формирования оптимальной совокупности оборудования контроля и поверки представлено ниже:

1. Совокупность сборочного оборудования разделить на части в зависимости от возможности калибровки с помощью различных типов стандов. Рассмотрим модель совокупности сборочного оборудования в зависимости от возможности калибровки с помощью различных типов калибровочного оборудования:

$$AT = \{AT_1, AT_2, AT_3\}, \quad (3)$$

где AT – совокупность сборочного оборудования; AT_1 – часть совокупности сборочного оборудования, которую возможно калибровать на стационарных стандах измерения момента затяжки; AT_2 – часть совокупности сборочного оборудования, которую возможно калибровать на передвижных стандах измерения момента затяжки; AT_3 – часть совокупности сборочного оборудования, которую возможно калибровать на переносных стандах измерения момента затяжки. Одно или два из вышеуказанных подмножеств, могут быть пустыми, если применение тех или иных типов стандов в рассматриваемом случае нецелесообразно.

Таблица 1. Методика формирования оптимальной совокупности оборудования контроля и поверки**Table 1.** Methodology for creation of optimal calibration equipment set

Этап методики / Methodology stage	Содержание этапа / Stage content	Применяемые методы / Methods applied
1. Определение необходимых типов стендов и датчиков	1. Совокупность сборочного оборудования разделить на части в зависимости от возможности калибровки с помощью различных типов стендов 2. Определить типы стендов необходимые для калибровки совокупности сборочного оборудования 3. Подобрать модели датчиков таким образом, чтобы обеспечить настройку и калибровку всех элементов совокупности сборочного оборудования 4. Согласовать цену α -й модели стенда и γ -й модели стенда по критерию согласования принятого решения	Методы теории управления; методы теоретико-множественного подхода; методы принятия решений; методы математического анализа
2. Определение рациональной периодичности проверок мо- мента затяжки	1. Рассмотреть изменения момента затяжки за промежуток времени не менее 100 рабочих смен и определить на основании данной статистики скорость разрегулирования 2. Выбрать метод определения оптимальной периодичности проверок: - если скорость разрегулирования стремиться к нулю, то используется вероятностный подход; - если скорость разрегулирования отлична от нуля, то используется экстраполяционный подход 3. Определить оптимальную периодичность проверок способом, соответствующим величине скорости разрегулирования момента затяжки сборочного инструмента	
3. Расчет коли- чества датчиков и стендов	1. Выполнить расчет нагрузки на датчики на основании соответствия целевым характеристикам совокупности оборудования контроля и поверки 2. Расчет количества датчиков и стендов выполняется исходя из допустимой нагрузки на датчик и допустимого количества датчиков, устанавливаемых на стенд	

2. Для выбора необходимых типов стендов нужно рассмотреть, возможно ли калибровать тот или иной сборочный инструмент на используемом стенде в данных условиях производства. По результатам анализа выбираются типы стендов. Как правило, на предприятии мелкоузловой сборки, насчитывающем несколько тысяч сборочных инструментов, расположенных на большой территории, используются передвижные и переносные стенды измерения момента затяжки. В случае крупноузловой сборки (количество сборочных инструментов обычно не превышает 1000 штук) обычно используется один стационарный или передвижной стенд.

3. Для каждой из трех частей совокупности сборочного оборудования AT_1, AT_2, AT_3 нужно определить совокупность моментов затяжки резьбовых соединений, выполняемых инструментами, входящими в данное подмножество. Значения моментов затяжки инструментов, входящих в данное подмножество инструментов представить в виде упорядоченных множеств:

$$Z_\alpha = \{z_{\alpha_1}, z_{\alpha_2}, \dots, z_{\alpha_j}, \dots, z_{\alpha_{r-1}}, z_{\alpha_r}\},$$

где r – количество моментов затяжки, выполняемых частью совокупности сборочного оборудования, которую возможно калибровать на α -х стендах измерения момента затяжки; $\alpha = 1 \dots 3$ – типы стендов (стационарные, передвижные и переносные) выделяемые в совокупности оборудования контроля и поверки; z_{α_j} – числовые значения j -х моментов затяж-

ки сборочных инструментов калибруемых на α -х стендах измеренные в Н*м (Ньютон*метр).

Далее определить, какие датчики должны быть установлены на стенды. Датчики имеют различные пределы для измерений момента затяжки, каждый может обеспечить измерение множества моментов в некотором диапазоне. Подбор датчиков необходимо осуществить таким образом, чтобы обеспечить калибровку совокупности моментов затяжки Z_α , используемых в конкретном процессе механосборки:

$$Z_\alpha \in \{Z_{H_{\alpha_1_min}} \dots Z_{H_{\alpha_\gamma_max}}\},$$

где $Z_{H_{\alpha_1_min}}$ – минимальный момент затяжки калибруемый первым датчиком устанавливаемым на α -й стенд; $Z_{H_{\alpha_\gamma_max}}$ – максимальный момент затяжки калибруемый γ -м датчиком устанавливаемым на α -й стенд; $\alpha = 1 \dots 3$ – типы стендов (стационарные, передвижные и переносные) выделяемые в совокупности оборудования контроля и поверки; γ – количество датчиков устанавливаемых на α -й стенд.

4. Стоимость одного измерительного датчика составляет несколько сотен тысяч рублей. Поэтому, для того чтобы избежать нерационального распределения ресурсов и добиться минимизации стоимости оборудования по критерию оптимального управления - минимизации стоимости ОКП, рекомендуется выбирать оборудование с минимальной приведенной стоимостью:

$$Ц_{\alpha} = \frac{ЦП_{\alpha}}{\Xi_{\alpha}},$$

где $ЦП_{\alpha}$ – закупочная цена α -й модели станда; Ξ_{α} – ресурс оборудования, выраженный в количестве затяжек за время эксплуатации;

$$Ц_{\alpha\gamma} = \frac{ЦП_{\alpha\gamma}}{\Xi_{\alpha\gamma}},$$

где $ЦП_{\alpha\gamma}$ – закупочная цена γ -й модели датчика, устанавливаемого на α -ю модель станда; $\Xi_{\alpha\gamma}$ – ресурс оборудования, выраженный в количестве затяжек за время эксплуатации.

Важным является учет величины ресурса затяжек не по данным, предоставляемым производителем оборудования, а по накопленной в различных филиалах корпорации статистике практического использования данного оборудования.

Согласовать цены α -х моделей стандов $ЦП_{\alpha}$ и γ -й моделей датчиков $ЦП_{\alpha\gamma}$, устанавливаемых на α -е модели стандов по критерию согласования принятого решения:

$$\begin{cases} ЦП_{\alpha} \in \{ЦП_{\alpha \min}; ЦП_{\alpha \max}\} \\ ЦП_{\alpha\gamma} \in \{ЦП_{\alpha\gamma \min}; ЦП_{\alpha\gamma \max}\}, \end{cases} \quad (4)$$

где $ЦП_{\alpha \min}$ – нижний установленный штаб-квартирой предел цены α -й модели станда, $ЦП_{\alpha \max}$ – верхний установленный штаб-квартирой предел цены α -й модели станда; $ЦП_{\alpha\gamma \min}$ – нижний установленный штаб-квартирой предел цены γ -й модели датчика, $ЦП_{\alpha\gamma \max}$ – верхний установленный штаб-квартирой предел цены γ -й модели датчика.

5. Определить нагрузку на датчики при первоначальной настройке элементов ССО. При запуске нового производства или нового проекта все инструменты должны быть настроены на требуемые моменты затяжки, поэтому нагрузку на каждый датчик станда при настройке большой партии сборочного инструмента, поступившего в систему можно выразить с помощью предложенной авторами формулы:

$$H_{\gamma H} = m \sum_{j=x}^y b_j, \quad (5)$$

где $H_{\gamma H}$ – нагрузка на γ -й датчик при первоначальной настройке совокупности сборочных инструментов на требуемые моменты, $H_{\gamma H}$ измеряется в количестве калибровок; m – число контрольных затяжек, выполняемых каждым инструментом при его настройке. На практике число m для всех элементов ССО как правило одинаково, и составляет не менее 30 затяжек; b_j – количество инструментов настроенных на j -й момент затяжки; x – порядковый номер элемента множества моментов затяжки, для которого момент затяжки z_x – минимальный момент затяжки, контролируемый на γ -м датчике; y – порядковый номер элемента множества моментов затяжки, для которого момент затяжки z_y – максимальный момент затяжки, контролируемый на γ -м датчике.

6. Далее определить нагрузку на датчик станда в процессе работы сборочного инструмента. Для этого опре-

делить оптимальную периодичность калибровок оборудования для обеспечения с одной стороны требуемого уровня качества продукции, с другой стороны минимума финансовых затрат. Вопрос выбора оптимальной периодичности калибровок сборочного оборудования рассматривался ранее автором в работе [21]. Нагрузка на γ -й датчик рассчитывается по разработанной авторами формуле

$$H_{\gamma}(t) = t d \sum_{g=1}^f q_{\gamma g} \sum_{j=x}^y b_{jg}, \quad (6)$$

где $H_{\gamma}(t)$ – нагрузка на γ -й датчик за период времени t ; $g=1 \dots f$ – индексы групп сборочных инструментов, отличающиеся друг от друга различной периодичностью калибровки; f – количество групп сборочных инструментов, отличающиеся друг от друга периодичностью калибровки; d – число затяжек, выполняемых инструментом из g -й группы, настроенным на j -й момент затяжки при калибровке в период его эксплуатации, на практике d обычно одинаково для всех элементов ССО, и составляет от 3 до 5 затяжек; $q_{\gamma g}$ – периодичность калибровок каждого инструмента из g -й группы, настроенного на моменты затяжки из множества моментов, контролируемых на γ -м датчике; t – период времени, для которого рассчитывается нагрузка на оборудование, измеряемый в количестве рабочих смен; b_{jg} – количество инструментов из g -й группы, настроенных на j -й момент затяжки.

На практике, на каждом стенде, как правило, используется не более 3...4 датчиков. Этого количества обычно бывает достаточно, чтобы покрыть весь диапазон моментов. Допустимую нагрузку, измеряемую в количестве рабочих циклов, обычно содержит паспорт датчика. Однако, на практике, если это возможно, лучше использовать производственную статистику из базы данных корпорации с других предприятий, где используется такое же оборудование, поскольку в сравнении с показателями, заявленными производителями она имеет большую достоверность.

7. Измерительные стенды и датчики должны выдерживать требуемую нагрузку, измеряемую в количестве затяжек. Расчетное количество датчиков γ -й модели должно соответствовать неравенству:

$$W_{\gamma} \geq \frac{H_{\gamma H} + H_{\gamma}(t)}{H_{\gamma D}}, \quad (7)$$

где W_{γ} – количество датчиков γ -й модели; $H_{\gamma D}$ – допустимая нагрузка датчика γ -й модели; $H_{\gamma H}$ – нагрузка на γ -й датчик, при первоначальной настройке совокупности сборочных инструментов на требуемые моменты затяжки; $H_{\gamma}(t)$ – нагрузка на γ -й датчик за период времени t .

Если количество датчиков γ -й модели больше одного, то один датчик устанавливается на стенд, а остальные помещаются в совокупность запасных сборочных инструментов, приборов и приспособлений (СЗИП), и использу-

ются в случае выхода из строя работающего датчика.

8. В случае если количество датчиков, подлежащих установке на стенд, превышает технологические возможности стенда, то оставшиеся датчики необходимо установить на другой стенд этого же типа. Таким образом, расчетное количество стендов α -й модели должно соответствовать неравенству:

$$V_{\alpha} \geq \frac{W_{\alpha\Phi}}{W_{\alpha\Delta}}, \quad (8)$$

где V_{α} – количество стендов α -й модели; $W_{\alpha\Delta}$ – допустимое количество датчиков, которое возможно установить на стенд α -й модели; $W_{\alpha\Phi}$ – фактическое количество датчиков, которое необходимо установить на стенд α -й модели.

Результаты и их обсуждение

Разработанная методика позволяет ЛПР сократить время на принятие организационного решения за счет использования готовой последовательности действий в конкретной производственной ситуации формирования оптимальной СОКП. Разработанная последовательность действий может быть представлена в виде алгоритма на рис.1.

Экономический эффект при затратах на технологическую подготовку производства рассчитываем по формуле:

$$\Delta \mathcal{E}_i = \Delta T_i * D_{\text{и}}, \quad (9)$$

где $\Delta \mathcal{E}_i$ – экономия затрат в рублях от применения i -го пункта разработанных моделей, классификаторов, методик, алгоритмов и баз данных; ΔT_i – эконо-

мия затрат в часах от применения i -го пункта разработанных моделей, классификаторов, методик, алгоритмов и баз данных; при расчете затрат на технологическую подготовку производства необходимо учесть часовую ставку занятого инженера-технолога (вместе с отчислениями). Примем, что средняя оплата в час работника составит $D_{\text{и}} = 500$ руб/час.

Экономия затрат в процентах рассчитана по формуле:

$$\Delta T_{\text{П}i} = \frac{\Delta T_i}{T_{\text{Б}}} * 100\%, \quad (10)$$

где $\Delta T_{\text{П}i}$ – экономия затрат в процентах при использовании i -го пункта разработанных моделей, классификаторов, методик и алгоритмов; $T_{\text{Б}}$ – общая трудоемкость в часах без применения разработанных моделей, классификаторов, методик, алгоритмов и баз данных.

Расчет производился для СОМС АСУТП, содержащей 3350 единиц ССО. Общая трудоемкость технологической подготовки производства по формированию СОМС АСУТП без применения разработанных моделей, классификаторов, методик, алгоритмов и баз данных составила $T_{\text{Б}} = 960$ часов.

Применение каждого из разработанных пунктов позволило сократить трудоемкость на различное время. На основе формул (9) и (10) полученная экономия при применении каждого разработанного элемента управления посчитана в табл. 2.

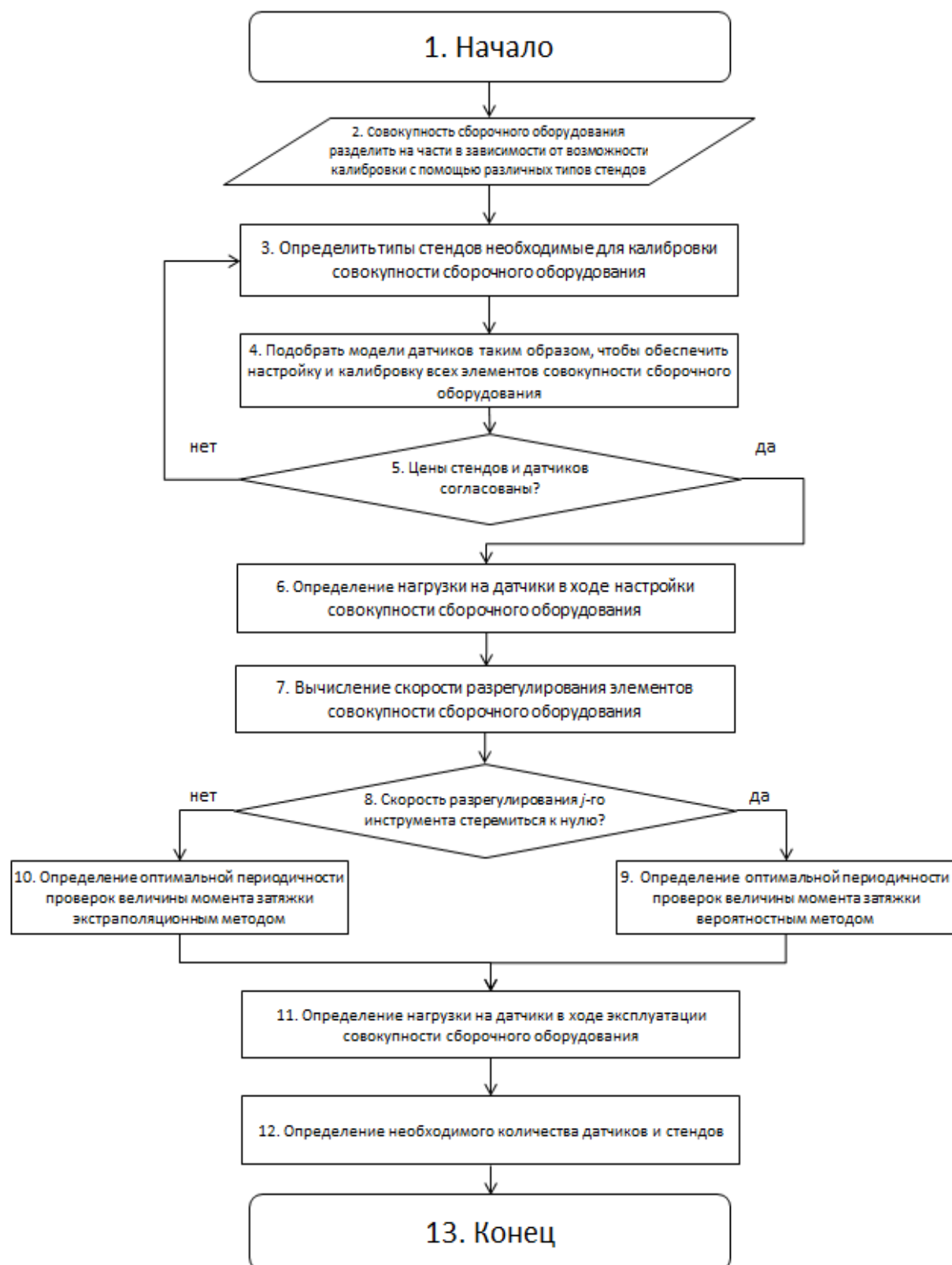


Рис. 1. Алгоритм формирования оптимальной совокупности оборудования контроля и поверки

Fig. 1. Algorithm for creation of optimal calibration equipment set

Таблица 2. Показатели трудоемкости технологической подготовки производства при формировании совокупности оборудования контроля и поверки**Table 2.** Labor intensity indicators of production technological preparation during calibration equipment set creation

Разработан- ный элемент управления СОМС АСУТП	Расчет	Эффектив- ность, %	Сокращение трудоемкости от примене- ния разрабо- танных пунк- тов, часов	Экономиче- ский эффект, рублей
1. Классифи- катор сбо- рочного обо- рудование системы обеспечения механической сборки в за- висимости от удобства и возможности их калибров- ки	$\Delta T_1 = 16$ часов $\Delta T_{П1} = \frac{16}{960} * 100\% = 1,67\%$ $\Delta \mathcal{E}_1 = 16 * 500 = 8000$ (руб)	$\Delta T_{П1} = 1,67\%$	$\Delta T_1 = 16$ часов	$\Delta \mathcal{E}_1 = 8000$ (руб)
2. Модель со- вокупности оборудования контроля и поверки	$\Delta T_2 = 8$ часов $\Delta T_{П2} = \frac{8}{960} * 100\% = 0,83\%$ $\Delta \mathcal{E}_2 = 8 * 500 = 4000$ (руб)	$\Delta T_{П2} = 0,83\%$	$\Delta T_2 = 8$ часов	$\Delta \mathcal{E}_2 = 4000$ (руб)
3. Классифи- катор сово- купности оборудования контроля и поверки	$\Delta T_3 = 8$ часов $\Delta T_{П3} = \frac{8}{960} * 100\% = 0,83\%$ $\Delta \mathcal{E}_3 = 8 * 500 = 4000$ (руб)	$\Delta T_{П3} = 0,83\%$	$\Delta T_3 = 8$ часов	$\Delta \mathcal{E}_3 = 4000$ (руб)
4. Методика и алгоритм формирова- ния совокуп- ности обо- рудование кон- троля и по- верки на ос- нове критери- ев оптималь- ности	$\Delta T_4 = 40$ часов $\Delta T_{П4} = \frac{40}{960} * 100\% = 4,17\%$ $\Delta \mathcal{E}_4 = 40 * 500 = 20000$ (руб)	$\Delta T_{П4} = 2,45\%$	$\Delta T_4 = 24$ часа	$\Delta \mathcal{E}_4 = 20000$ (руб)

Рассмотрим экономию финансовых затрат на закупку оборудования контроля и поверки. Экономический эффект определяется за счет снижения стоимости оборудования по формуле:

$$\Delta C_{\text{СОКП}} = C_{\text{Б_СОКП}} - C_{\text{СОКП}}, \quad (11)$$

где $\Delta C_{\text{СОКП}}$ – экономия затрат в рублях при использовании разработанных методики и алгоритма для формирования оптимальной СОКП, $C_{\text{Б_СОКП}}$ – стоимость закупки СОКП без использования разработанных методики и алгоритма, $C_{\text{СОКП}}$ – стоимость закупки СОКП при использовании разработанных методики и алгоритма.

$$C_{\text{Б_СОКП}} = 10\,400\,000 \text{ рублей};$$

$$C_{\text{СОКП}} = 6\,200\,000 \text{ рублей};$$

$$\Delta C_{\text{СОКП}} = 10\,400\,000 - 6\,200\,000 = 4\,200\,000 \text{ (руб)}$$

Экономия затрат в процентах рассчитана по формуле:

$$\Delta C_{\text{П_СОКП}} = \frac{\Delta C_{\text{СОКП}}}{C_{\text{Б_СОКП}}} * 100\%, \quad (12)$$

где $\Delta C_{\text{П_СОКП}}$ – экономия затрат в процентах при использовании разработанных методики и алгоритма.

$$\Delta C_{\text{П1}} = \frac{4\,200\,000}{10\,400\,000} * 100\% = 40,38\%.$$

Выводы

Задачей управления СОМС АСУТП является эффективное использование финансовых ресурсов на закупку оборудования для бесперебойного обеспечения производства, обеспечивающего успешный результат для головного офиса автомобильной корпорации, владеющей заводом автомобильного кластера. Разработанные авторами классификатор и модель совокупности оборудования контроля и поверки, а также методика формирования оптимальной СОКП позволяют решить эти задачи за счет наличия готовой последовательности действий по формированию оптимального состава оборудования. Разработки авторов можно использовать в технологических отделах крупных автомобилестроительных корпораций для планирования закупок оборудования контроля и поверки для существующих и вновь создаваемых предприятий автомобилестроительного кластера или предприятий других отраслей, имеющих аналогичную структуру СОМС АСУТП.

Список литературы

1. Мишина Т.А., Барабанова И.А. Применение методологии RFMEA-анализа для процесса поверки СИ // Современные материалы, техника и технологии. 2018. № 6 (21). С. 62-68.
2. Попов А.В., Чудинов В.А., Шаякбаров И.Э. Повышение качества контроля моментов затяжек резьбовых соединений методом отворачивания // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 2. С. 315-322.

3. Маломыжев О.Л., Скutelьник В.В., Бектемиров А.С. Исследование момента затяжки ответственных резьбовых соединений на срок их службы на примере шатунных болтов двигателей легковых автомобилей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 6 (113). С. 156-162.
4. Спиридонов О.В. Технологические расчеты при сборке резьбовых соединений // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 6. С. 43-48.
5. Зеленский А.В., Терехина О.В. Устройства измерения крутящего момента в технологических процессах соединения резьбовых изделий // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2012. Т. 2. С. 44-45.
6. Tan L., Sun C., Pang M., Xiang K., Tang B. Design of Screw Fastening Tool Based on SEA. In: Yu H., Liu J., Liu L., Ju Z., Liu Y., Zhou D. (eds) Intelligent Robotics and Applications. ICIRA 2019. Lecture Notes in Computer Science, vol 11740. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27526-6_32
7. Geda M.W., Kwong C.K., Jiang H. Fastening method selection with simultaneous consideration of product assembly and disassembly from a remanufacturing perspective. Int J Adv Manuf Technol 2019, 101, 1481–1493. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3027-1>
8. Faccio M., Ferrari E., Gamberi M. et al. Human Factor Analyser for work measurement of manual manufacturing and assembly processes. Int J Adv Manuf Technol, 2019, 103, 861–877. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03570-z>
9. Cloud, G.L. William M. Murray Lecture: Some Curious Unresolved Problems, Speculations, and Advances in Mechanical Fastening. Exp Mech 53, 2012, 1073–1104 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11340-013-9736-3>
10. Poparad H. Advanced Automotive Assembly Line Trends as Tools in Optimizing Production Line Performance. In: Chiru A., Ispas N. (eds) CONAT 2016 International Congress of Automotive and Transport Engineering. CONAT 2016. Springer, Cham. 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45447-4_65
11. Doshi J.A., Desai D. Overview of Automotive Core Tools: Applications and Benefits. J. Inst. Eng. India Ser. C 98, 515–526. 2017. <https://doi.org/10.1007/s40032-016-0288-z>
12. Tesfay Y.Y. Process Capability Analysis. In: Developing Structured Procedural and Methodological Engineering Designs. Springer, Cham. 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68402-0_6
13. Khomenko A., Koricho E.G., Haq M., Cloud G.L. In-service Preload Monitoring of Bolted Joints Subjected to Fatigue Loading Using a Novel ‘MoniTorque’ Bolt. In: Beese A., Zehnder A., Xia S. (eds) Fracture, Fatigue, Failure and Damage Evolution, Volume 8. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Springer, Cham. 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-21611-9_32

14. Xu W., Cheng Q., Yang C. et al. Dynamic analysis and looseness evaluation of bolted connection under vibration of machine tools. *Int J Adv Manuf Technol*. 2021. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07615-0>
15. Jeang A., Chung C.P. Process capability analysis based on minimum production cost and quality loss. *Int J Adv Manuf Technol* 43, 710–719. 2009. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1741-9>
16. Khodaygan S., Movahhedy M.R. Functional process capability analysis in mechanical systems. *Int J Adv Manuf Technol* 73, 899–912. 2014. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5800-0>
17. Yang Y. 2019. Application Research of Process Capability Analysis in Manufacturing Quality Control. In: Deng K., Yu Z., Patnaik S., Wang J. (eds) *Recent Developments in Mechatronics and Intelligent Robotics. ICMIR 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 856. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00214-5_53
18. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. 3-е изд. М.: Издательство физико-математической литературы, 2012. 604 с. ISBN 978-5-94052-222-5.
19. Шабанов А.А. Решение задачи оптимизации частоты проверок параметров оборудования // *Вопросы радиоэлектроники. Серия общетехническая (ОТ)*. Вып. 10. М.: АО «ЦНИИ Электроника», 2015. С. 105-114.
20. Шабанов А.А. Разработка методики рационального выбора структуры и состава запаса сборочных инструментов и приспособлений для системы обеспечения механической сборки // *Вопросы радиоэлектроники. Серия общетехническая (ОТ)*. Вып. 10. М.: АО «ЦНИИ Электроника», 2015. С. 115-124.
21. Шабанов А.А., Шабанов А.К. Анализ структуры подсистемы контроля и проверки современной системы обеспечения механосборки // *Труды XXXIII Всероссийской НТК «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем»* / Филиал военной академии РВСН им. Петра Великого. Серпухов, 2014. Сб. 4. С. 301–305.
22. Шабанов А.А., Аверченкова Е.Э. Моделирование систем управления организационно-технологическим обеспечением механической сборки на предприятиях автомобилестроительного кластера // *Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении*. 2021. №3(13), 4(14), С.58-68.

References

1. Mishina T.A., Barabanova I.A. *Primenenie metodologii PFMEA-analiza dlya processa poverki SI* [Application of the PFMEA-analysis methodology for the process of verification of measuring instruments]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, equipment and technologies*, 2018, no. 6 (21), pp 62-68.

2. Popov A.V., Chudinov V.A., Shayakbarov I.E. Povyshenie kachestva kontrolya momentov zatyazhek rez'bovyh soedinenij metodom otvorachivaniya [Improving the quality of threaded joints checking by unscrewing] *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* = *Bulletin of the Tula State University. Technical sciences*, 2018, no. 2, pp. 315-322.
3. Malomyzhev O.L., Skutel'nik V.V., Bektemirov A.S. Issledovanie momenta zatyazhki otvetstvennyh rez'bovyh soedinenij na srok ih sluzhby na primere shatunnyh boltov dvigatelej legkovykh avtomobilej [Study of the torque of critical threaded joints for their service life by the example of connecting rod bolts of car engines]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2016, no. 6 (113), pp 156-162.
4. Spiridonov O.V. Tekhnologicheskie raschety pri sborke rez'bovyh soedinenij Sborka v mashinostroenii, priborostroenii [Technological calculations for the assembly of threaded joints] *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii* = *Assembly in Mechanical Engineering, Instrumentation*, 2015, no. 6, pp 43-48.
5. Zelenskij A.V., Terekhina O.V. Ustrojstva izmereniya krutyashchego momenta v tekhnologicheskikh processah soedineniya rez'bovyh izdelij [Devices for torque measuring in technological processes of connecting threaded products] *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo"* = *Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"*, 2012, vol. 2, pp. 44-45.
6. Tan L., Sun C., Pang M., Xiang K., Tang B. (2019) Design of Screw Fastening Tool Based on SEA. In: Yu H., Liu J., Liu L., Ju Z., Liu Y., Zhou D. (eds) *Intelligent Robotics and Applications. ICIRA 2019. Lecture Notes in Computer Science*, vol 11740. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27526-6_32
7. Geda M.W., Kwong C.K., Jiang H. Fastening method selection with simultaneous consideration of product assembly and disassembly from a remanufacturing perspective. *Int J Adv Manuf Technol* 101, 1481–1493 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3027-1>
8. Faccio M., Ferrari E., Gamberi M. et al. Human Factor Analyser for work measurement of manual manufacturing and assembly processes. *Int J Adv Manuf Technol* 103, 861–877 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03570-z>
9. Cloud G.L. 2012 William M. Murray Lecture: Some Curious Unresolved Problems, Speculations, and Advances in Mechanical Fastening. *Exp Mech* 53, 1073–1104 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11340-013-9736-3>
10. Poparad H. (2017) Advanced Automotive Assembly Line Trends as Tools in Optimizing Production Line Performance. In: Chiru A., Ispas N. (eds) *CONAT 2016 International Congress of Automotive and Transport Engineering. CONAT 2016*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45447-4_65

11. Doshi J.A., Desai D. Overview of Automotive Core Tools: Applications and Benefits. J. Inst. Eng. India Ser. C 98, 515–526 (2017). <https://doi.org/10.1007/s40032-016-0288-z>
12. Khomenko A., Koricho E.G., Haq M., Cloud G.L. (2016) In-service Preload Monitoring of Bolted Joints Subjected to Fatigue Loading Using a Novel ‘MoniTorque’ Bolt. In: Beese A., Zehnder A., Xia S. (eds) Fracture, Fatigue, Failure and Damage Evolution, Volume 8. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-21611-9_32
13. Xu W., Cheng Q., Yang C. et al. Dynamic analysis and looseness evaluation of bolted connection under vibration of machine tools. Int J Adv Manuf Technol (2021). <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07615-0>
14. Tesfay Y.Y. (2021) Process Capability Analysis. In: Developing Structured Procedural and Methodological Engineering Designs. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68402-0_6
15. Jeang A., Chung C.P. Process capability analysis based on minimum production cost and quality loss. Int J Adv Manuf Technol 43, 710–719 (2009). <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1741-9>
16. Khodaygan S., Movahhedy M.R. Functional process capability analysis in mechanical systems. Int J Adv Manuf Technol 73, 899–912 (2014). <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5800-0>
17. Yang Y. (2019) Application Research of Process Capability Analysis in Manufacturing Quality Control. In: Deng K., Yu Z., Patnaik S., Wang J. (eds) Recent Developments in Mechatronics and Intelligent Robotics. ICMIR 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 856. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00214-5_53
18. Novikov D.A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami* [The theory of management of organizational systems]. Moscow, 2012. 604 p. ISBN 978-5-94052-222-5.
19. Shabanov A. A. *Reshenie zadachi optimizatsii chastoty proverok parametrov oborudovaniya* [Solution of the optimization problem of equipment parameters inspection frequency] *Voprosy radioelektroniki / Seriya obshchetekhnicheskaya (OT) Vypusk 10*. [Questions of radio electronics. General technical series. Is. 10]. Moscow, 2015, pp. 105-114
20. Shabanov A. A. *Razrabotka metodiki racional'nogo vybora struktury i sostava zapasa sborochnykh instrumentov i prispособlenij dlya sistemy obespecheniya mekhanicheskoy sborki* [Development of rational choice method of structure and composition of spare assembly tools and accessories for mechanical assembly system] *Voprosy radioelektroniki / Seriya obshchetekhnicheskaya (OT). Vyp. 10* [Questions of radio electronics. General technical series. Is. 10]. Moscow, 2015, pp. 115-124.
21. Shabanov A. A., Shabanov A. K. [Analysis of the structure of calibration equipment subsystem of a modern mechanical assembly support system] *Trudy XXXIII Vserossiyskoy NTK «Problemy effektivnosti i bezopasnosti funktsionirovaniya slozhnykh*

tekhnicheskikh i informatsionnykh sistem» [Proceedings of the XXXIII All-Russian Scientific and Technical Conference "Problems of the efficiency and safety of the functioning of complex technical and information systems"]. *Serpukhov, 2014, vol. 4*, pp 301-305 (in Russ.).

22. SHabanov A.A., Averchenkova E.E. Modelirovanie sistem upravleniya organizacionno-tekhnologicheskim obespecheniem mekhanicheskoy sborki na predpriyatiyah avtomobilestroitel'nogo klastera [Modeling of management systems for organizational and technological support of mechanical assembly at enterprises of the automotive cluster]. *Avtomatizatsiya i modelirovanie v proektirovanii i upravlenii = Automation and modeling in design and management*, 2021, №3(13), 4(14), pp.58-68.

Информация об авторах / Information about the Authors

Аверченкова Елена Эдуардовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Цифровая экономика», Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Российская Федерация, e-mail: lena_ki@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2098-6156>

Elena E. Averchenkova, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Digital Economy Department, Bryansk State Technical University, Bryansk, Russian Federation, e-mail: lena_ki@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2098-6156>

Шабанов Алексей Александрович, ООО "Эрга", г. Калуга, Российская Федерация, e-mail: aashabanov86@mail.ru

Aleksei A. Shabanov, Erga Ltd, Kaluga, Russian Federation, e-mail: aashabanov86@mail.ru

Технология виртуального сопряжения в процессе имитационного моделирования сложнофункциональных модулей систем управления промышленных роботов и многокоординатных мехатронных систем

А.А. Зеленский¹ ✉, М.М. Жданова¹, Т.Х. Абдуллин¹, В.В. Воронин¹

¹ Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Вадковский пер., д. 1, г. Москва 127055, Российская Федерация

✉ e-mail: a.zelenskiy@stankin.ru

Резюме

Цель исследования. Разработка инструмента для отладки интеллектуальных алгоритмов системы управления, включающих в себя обработку системы технического зрения и планирования программной траектории движения промышленных роботов.

Методы. Для достижения поставленной цели был проведен обзор существующих средств имитационного моделирования. Представлен протокол бесконтактного взаимодействия человека и робота. Разработан алгоритм распознавания жестовых команд на основе разности трехмерных двоичных микроблоков и построении скелета человеческого тела. Представлен пример использования программного средства ROBOGuid для имитационного моделирования движения промышленного робота в рамках разработки и отладки собственных методов управления, ориентированных на реальные объекты.

Результаты. Использование цифровых двойников технологического оборудования для имитации и отображения реальных технологических процессов в виртуальной среде, в контексте формирования новой концепции индустрии 4.0 и шестого технологического уклада, позволяет совершенствовать основные и вспомогательные производственные процессы, а также проводить анализ, исследование и оценку экономической эффективности новых технологических и технических решений. Имитационное моделирование позволяет разработать эргономичные способы взаимодействия человека с мехатронными объектами. Предлагаемое в работе решение протестировано на примере отработки сложного пространственного контура, имитирующего фрезерование детали. Экспериментальные исследования предложенного в работе алгоритма распознавания жестовых команд проведены на общедоступном наборе данных UCF101, результаты сравниваются с известными подходами распознавания действий человека.

Заключение. Разработанный модуль сопряжения был использован на примере отработки сложного пространственного контура, имитирующего фрезерование детали, а метод системы бесконтактного управления роботом показал свою эффективность и необходимость развития этого направления.

Ключевые слова: имитационное моделирование; промышленные роботы; система управления; дистанционное управление; автоматизация; взаимодействие человека и робота; распознавание жестов; коллаборативная робототехника.

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

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 21-79-10392, <https://rscf.ru/project/21-79-10392/>

Для цитирования: Технология виртуального сопряжения в процессе имитационного моделирования сложнофункциональных модулей систем управления промышленных роботов и многокоординатных мехатронных систем / А.А. Зеленский, М.М. Жданова, Т.Х. Абдуллин, В.В. Воронин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(1): 92-115. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-92-115>.

Поступила в редакцию 10.12.2021

Подписана в печать 08.02.2022

Опубликована 31.03.2022

Virtual Interface Technology in the Process of Simulation of Complex Functional Modules of Control Systems for Industrial Robots and Multi-Axis Mechatronic Systems

Alexander A. Zelensky ¹ ✉, Marina M. Zhdanova ¹, Tagir Kh. Abdullin ¹, Viacheslav V. Voronin ¹

¹ Moscow State University of Technology "STANKIN",
1 Vadkovsky lane, Moscow 127055, Russian Federation

✉ e-mail: a.zelenskiy@stankin.ru

Abstract

Purpose of research. Development of a tool for debugging intelligent control system algorithms, including the development of a vision system and planning a software trajectory for an industrial robot.

Methods. To achieve this goal, a review of existing simulation tools was carried out. A protocol of contactless human-robot interaction is presented. An algorithm for the recognition of gesture commands based on the difference of three-dimensional binary microblocks and the construction of the skeleton of the human body has been developed. An example of using the ROBOGUID software tool for imitating the motion of an industrial robot in the development and debugging of its own control methods focused on real objects is presented.

Results. The use of digital twins of technological equipment to simulate and display real technological processes in a virtual environment, in the context of the formation of a new concept of Industry 4.0 and the sixth technological order, allows improving the main and auxiliary production processes, as well as analyzing, researching and evaluating the economic efficiency of new technological and technical solutions. Simulation allows the development of ergonomic ways of human interaction with mechatronic objects. The solution proposed in the work was tested on the example of working out a complex spatial contour that simulates the milling of a part. Experimental studies of the gesture command recognition algorithm proposed in the work were carried out on the publicly available UCF101 dataset, the results are compared with known approaches to recognizing human actions.

Conclusion. The developed interface module was used on the example of working out a complex spatial contour that simulates the milling of a part, and the method of a contactless robot control system has shown its effectiveness and the need to develop this direction.

Keywords: simulation modeling; industrial robots; control system; remote control; automation; human-robot interaction; recognition of gestures; collaborative robotics.

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

Funding: This work is supported by the Russian Science Foundation under grant No 21-79-10392, <https://rscf.ru/project/21-79-10392/>.

For citation: Zelensky A. A., Zhdanova M. M., Abdullin T. Kh., Voronin V. V. Virtual Interface Technology in the Process of Simulation of Complex Functional Modules of Control Systems for Industrial Robots and Multi-Axis Mechatronic Systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(1): 92-115 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-92-115>.

Received 10.12.2021

Accepted 08.02.2022

Published 31.03.2022

Введение

Быстро меняющаяся конъюнктура рынка, расширение ассортимента продукции и применение новых материалов требует применения современного высокотехнологического оборудования во многих отраслях промышленности. Растут требования к динамике и точности многокоординатных технологических мехатронных объектов, к числу которых относятся промышленные роботы и сложные обрабатывающие центры. Также жесткие условия конкуренции на рынке требуют от современного производственного процесса с глубокой автоматизацией малого времени переналадки оборудования и отладки технологии обработки в рамках освоения новой продукции. Таким образом, в контексте формирования новой концепции индустрии 4.0 [1] и шестого технологического уклада необходимо предложить инструмент для гибкого и экономичного освоения технологии производства новой продукции. Потребность в подобном инструменте вызвало появление программных средств, использующих цифровые двойники технологического оборудования для имитации и отображения реальных технологических про-

цессов в виртуальной среде. Средства имитационного моделирования позволяют совершенствовать основные и вспомогательные производственные процессы, а также проводить анализ, исследование и оценку экономической эффективности новых технологических и технических решений. Поскольку использование цифровых двойников оборудования не требует широкого вмешательства в текущий техпроцесс, имитационное моделирование существенно снижает материальные и трудовые затраты при проведении отладочных мероприятий, а также исключает возникновение аварийных ситуаций, травм персонала и повреждения оборудования в результате ошибочных действий специалистов. Имитационное моделирование сложных или новых техпроцессов позволяет разработать эргономичные способы взаимодействия человека с мехатронными объектами.

Таким образом, целью работы является разработка инструмента для отладки алгоритма системы технического зрения и планирования траектории движения схвата манипулятора. В работе было разработано программное обеспечение для персонального компьютера и

скрипт на языке Karel в среде имитационного моделирования ROBOGuid для бесконтактного управления движениями робота и отработки целевых точек траектории движения инструмента.

Материалы и методы

Обзор существующих средств имитационного моделирования

На рынке есть несколько средств имитационного моделирования. В какой-то степени к ним можно отнести опцию SinuTrain [2] от компании Siemens. SinuTrain состоит из пакета ShopTurn [3] для симуляции стойки токарных станков и пакета ShopMill [4] для симуляции фрезерных станков. Опция позволяет программировать обработку деталей посредством заполнения плана обработки детали без знания G- и M-кодов по стандарту ISO 7 bit, а также провести проверку созданной программы механической обработки посредством графической симуляции.

Еще одним средством для имитационного моделирования является пакет программного обеспечения Vericut [5]. Vericut – программный комплекс для проверки и оптимизации технологических программ обработки деталей на обрабатывающих центрах ЧПУ или на нескольких объектах в составе гибкой производственной ячейки, а также для визуализации процесса обработки. Программный комплекс содержит несколько утилит различного назначения.

Продукт имеет широкую базу оборудования, включая станки, сложные обрабатывающие центры и промышленные роботы.

Программным средством имитационного моделирования для функционирования промышленных роботов является пакет RoboDK [6]. Продукт имеет широкую базу промышленных роботов популярных производителей. RoboDK позволяет использовать специализированную оснастку для проектирования и симуляции производственных процессов.

ROBOGuid [7] – программный продукт для промышленных роботов, представлен компанией Fanuk. ROBOGuid предоставляет широкий функционал для проектирования, отладки и визуализации функционирования роботов Fanuk. Программный продукт был использован для решения большого ряда задач в рамках разработки и внедрения собственной системы управления [8, 9] многокоординатных технологических объектов. В частности, для разработки и исследования алгоритма s-образного разгона-замедления приводов осей технологических объектов [10] с целью обеспечения требуемого качества обрабатываемой поверхности и плавности хода инструмента. Также велись исследования в области локального сглаживания траектории инструмента, в основе которого лежит применение сплайнов [11], с целью повышения производительности контурной обработки и, как следствие, снижения времени обработки.

Модуль виртуального сопряжения для имитационного моделирования управления промышленным роботом

В данной работе для имитационного моделирования использовался ROBOGUID, но технология подходит для любых цифровых платформ. ROBOGUID позволяет осуществить виртуальное подключение к цифровой производственной модели по быстродействующим виртуальным промышленным каналам связи, отражающим полную функциональ-

ность реальных каналов. Это позволяет в дальнейшем без дополнительной конфигурации использовать разработанные элементы системы управления на реальных объектах, например, компоненты сенсорного обеспечения для задач коллаборативной робототехники [12, 13].

Для отладки и визуализации разработанных элементов системы управления в среде ROBOGUID (рис. 1) был разработан модуль виртуального сопряжения.

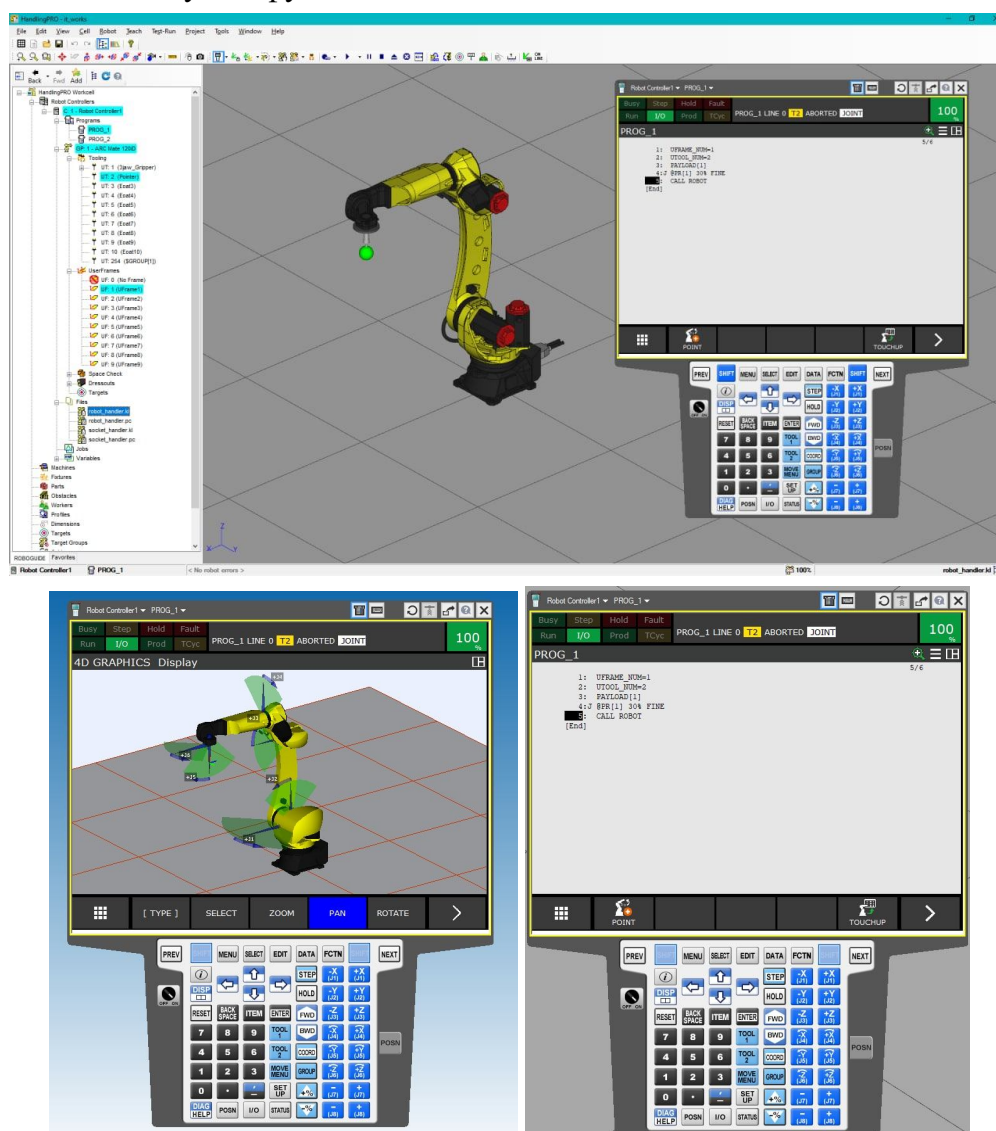


Рис. 1. Элементы среды ROBOGUID

Fig. 1. Elements of the ROBOGUID environment

В среде был создан скрипт на языке Karel [14], обрабатывающий информацию о целевых точках траектории движения. Программа на персональном компьютере через виртуальный TCP/IP [15] порт передает в среду ROBOGUID информацию о целевых точках. Часть скрипта под названием Server в фоновом режиме принимает команды по сети и складывает целевые точки в оче-

редь обработки. Вторая часть скрипта под названием Robot извлекает целевую точку из очереди и осуществляет движение. Среда визуализирует движение робота и траекторию движения инструмента. Блок-схемы частей Server и Robot скрипта показаны на рис. 2.

Листинг скриптов Server и Robot представлен в приложениях 1 и 2 соответственно.

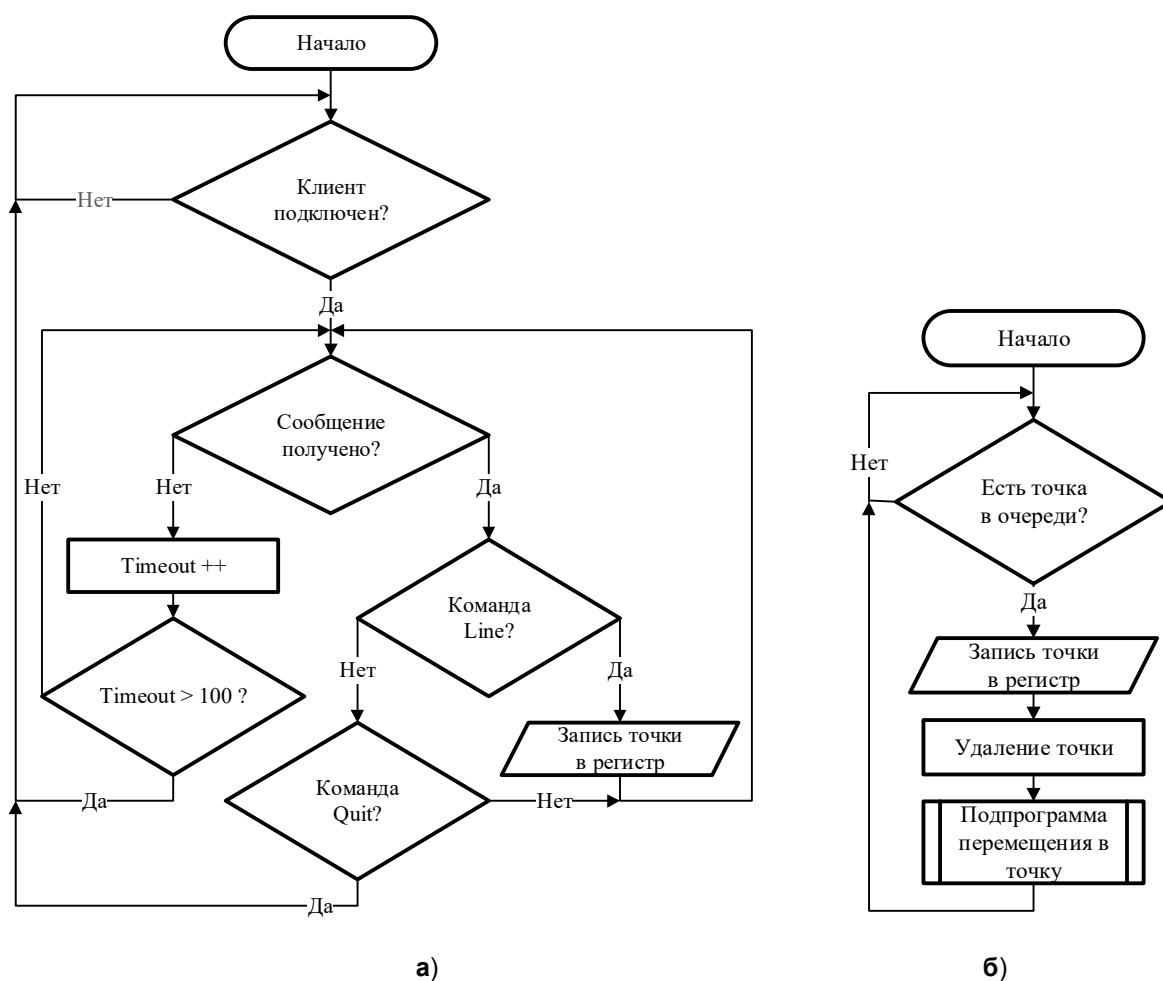


Рис. 2. Блок-схемы частей Server (а) и Robot (б) скрипта на языке Karel

Fig. 2. Block diagrams of the Server (a) and Robot (б) parts of the script in the Karel language

Модуль управления роботом на основе жестовых команд с использованием разработанного модуля сопряжения

Система управления мехатронным объектом представляет собой интер-

фейс взаимодействия человека и робота, который принимает команды от оператора в виде жестов. Система использует элементы технического зрения для бесконтактного получения входных

данных от пользователя. Разрабатываемый алгоритм управления подразумевает два режима работы: командный и манипулятивный режимы. Командный режим осуществляет выполнения базовых команд, которые не связаны с конкретными движениями манипулятора, но на которых строится вся структура управления, каждой жестовой команде соответствует определенная функциональная команда робота. При манипулятивном режиме функции рабочего органа робота, схожи с функциями руки человека. Протокол взаимодействия человека и робота представлен на рис. 3.

Модель бесконтактного управления робототехническим комплексом на основе жестовых команд реализуется в не-

сколько этапов. На первом этапе происходит сбор данных, который осуществляется элементами системы технического зрения. Затем на основе полученной информации формируется дескриптор, описывающий конкретный временной отрезок. Классификация действий происходит в соответствии с заранее определенными классами. В результате классификации действия-команды оператора, в пункте управления формируется управляющая команда роботу.

Для распознавания жестовых команд человека-оператора используется алгоритм, основанный на объединении изображений видеопоследовательности видимого спектра и карт глубины.

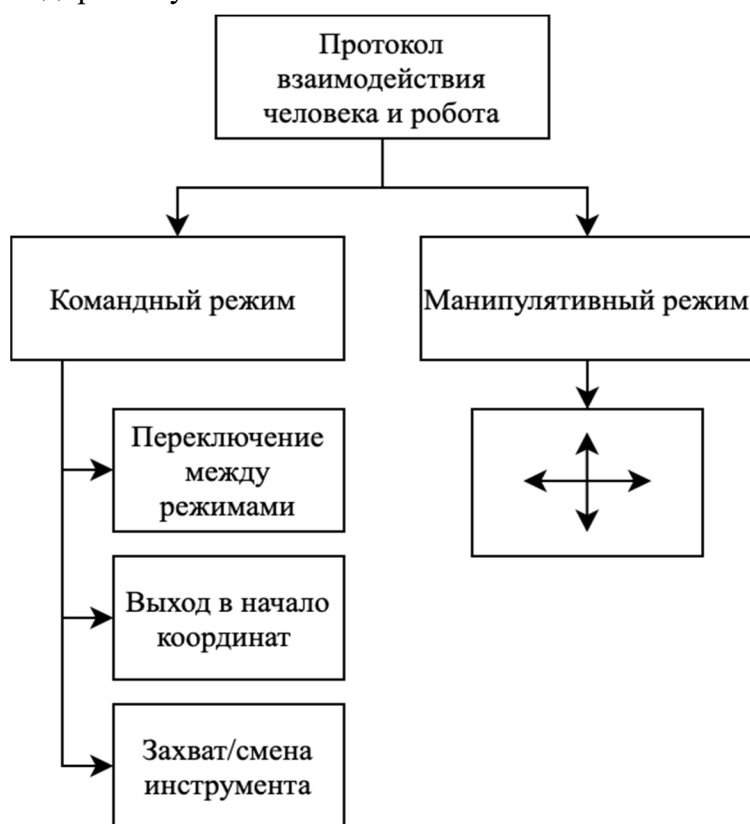


Рис. 3. Протокол взаимодействия человека и робота на основе жестовых команд в среде ROBOGuid

Fig. 3. Human-robot interaction protocol based on gesture commands in the ROBOGuid environment

Взаимоопыляемый характер информации, получаемой различными способами, позволяет повысить надежность и устойчивость распознавания [17], обеспечивает построение более информативного дескриптора [18, 19]. Общая структура алгоритма представлена на рис. 4.

Алгоритм включает следующие основные этапы: 1) совмещение входных изображений видимого спектра и данных глубины; 2а) свертка объединенных данных с трехмерными пространственно-временными фильтрами Габора и построение дескриптора с помощью алгоритма разности трехмерных двоичных микроблоков; 2б) извлечение скелета человека и построение дескриптора на основе геометрических особенностей расположения суставных (особых) точек скелета; 3) конкатенация дескрипторов, полученных на этапах 2а и 2б в единый вектор признаков; 4) классификация.

Эта структура имеет некоторые вариации и не требует строгого соблюдения правил реализации. Разнообразие и сложность задач распознавания, специфика особенностей выполняемых действий не позволяет реализовать единый универсальный подход к их решению. Представленный алгоритм позволяет пользователям обойти некоторые этапы реализации, если они, по их мнению, нерациональны, требуют значительных временных или вычислительных ресурсов.

Так, например, можно реализовать алгоритм без использования данных о глубине, в этом случае на вход подается только информация с датчика видимого спектра, а второй этап объединения данных пропускается.

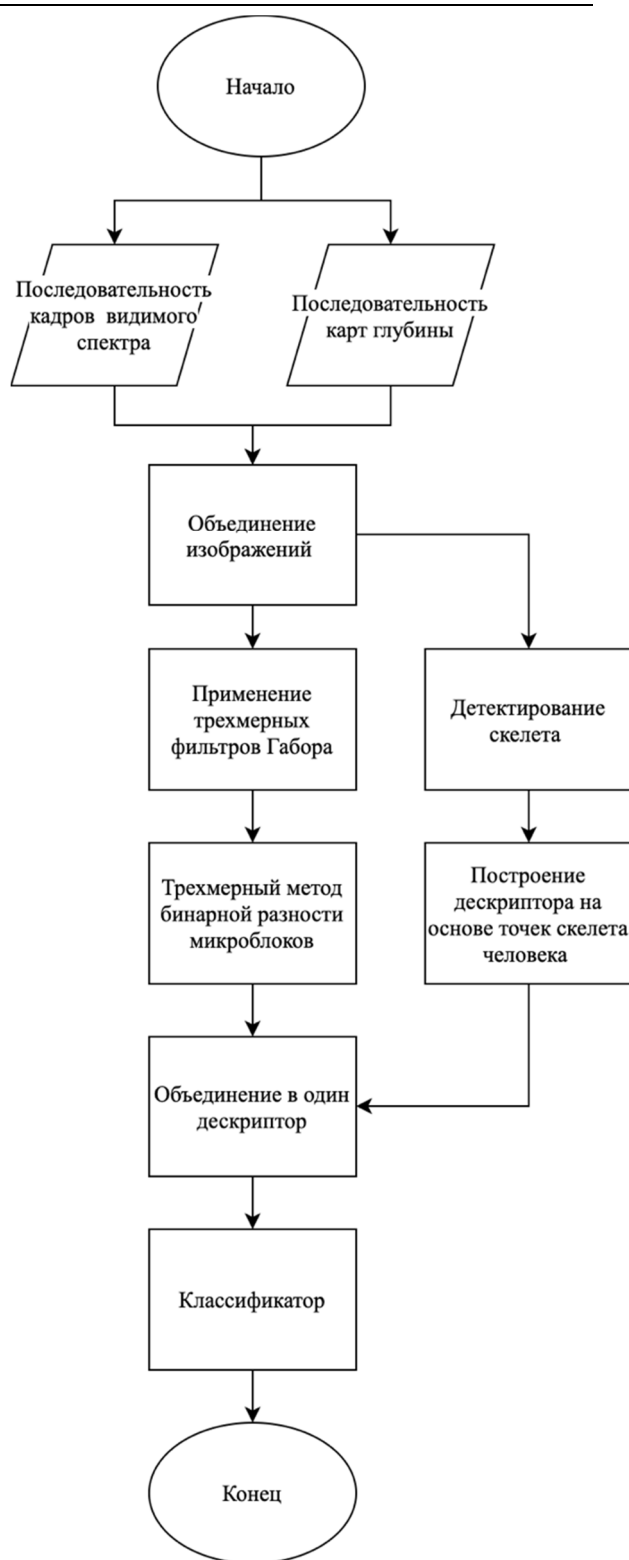


Рис. 4. Блок-схема алгоритма распознавания жестовых команд человека-оператора

Fig. 4. Block diagram of an algorithm for recognizing gesture commands of a human operator

Этап объединения данных и свертка с банком трехмерных фильтров Габора [20] подробно описаны в работе [21].

Объединение изображений осуществляется по следующей формуле:

$$f_{\text{usedImage}} = \hat{g}_1 \tilde{\oplus} \hat{g}_2 \tilde{\oplus} \hat{g}_3, \quad (1)$$

где g_1 – изображение видимого спектра; g_2 – изображение глубины; g_3 – максимум комбинированного изображения, полученного путем выбора максимального значения интенсивности глубины или видимого изображения в каждом местоположении пикселя; $\tilde{\oplus}$ – оператор сложения параметризованной модели логарифмической обработки изображений, $\hat{g}_i$ – результат скалярного умножения параметризованной модели логарифмической

рифмической обработки изображений, как представлено ниже:

$$g_1 \tilde{\oplus} g_2 = g_1 + g_2 - \left(\frac{g_1 g_2}{\max(g_1, g_2)} \right), \quad (2)$$

$$\hat{g}_i = (\Omega_i \tilde{\oplus} g_i) = \max(g_i) - \max(g_i) \left(1 - \frac{g_i}{\max(g_i)} \right)^{\Omega_i}. \quad (3)$$

Константы Ω_i , представленные в [22] имеют следующие значения $\sum \Omega_i = 1$, $\Omega_1 = 0,2989$, $\Omega_2 = 0,5870$ и $\Omega_3 = 0,1141$.

Процедура применения фильтров Габора [20] к видеопоследовательности представлена на рис. 5 и выполняется на втором этапе предложенного алгоритма распознавания действий.

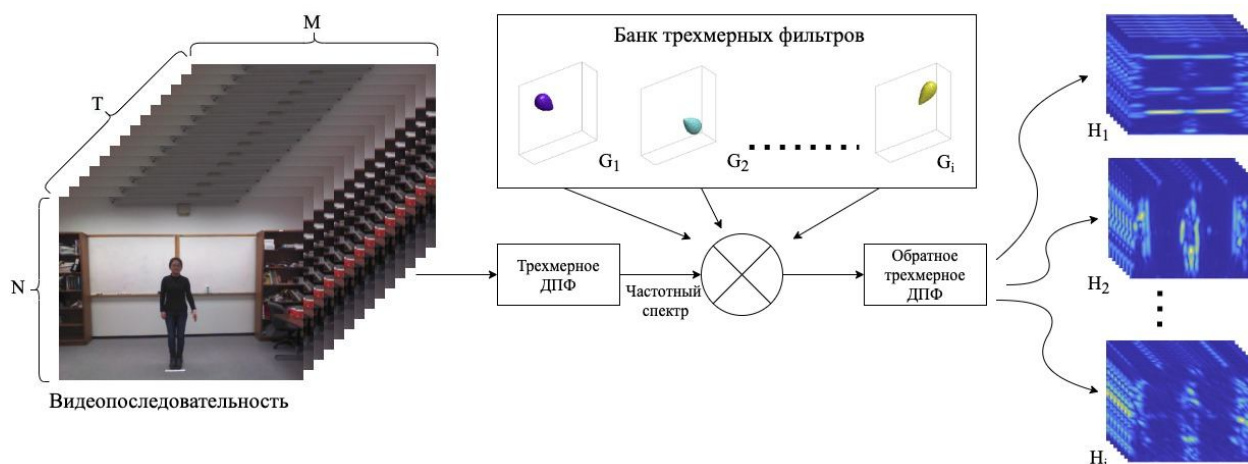


Рис. 5. Визуализация алгоритма применения фильтров Габора к видеопоследовательности

Fig. 5. Visualization of the algorithm for applying Gabor filters to a video sequence

Движение – важный элемент, который представляет выполняемое действие на сцене. Частотный спектр двумерного изображения лежит на плоскости, ориентация которой зависит от скорости модели. Имея двумерное изображение $f_0(x, y)$, можно создать объемную пространственно-временную

последовательность изображений, путем перемещения $f_0(x, y)$ со скоростью $\bar{u} = [u_1, u_2]$ во времени. Этот объем выражается как:

$$f(x, y, t) = f_0(x - u_1 t, y - u_2 t). \quad (4)$$

Трехмерное преобразование Фурье $F(x, y, t)$ в пространстве и времени вычисляется по следующей формуле:

$$F(f_x, f_y, f_t) = \frac{1}{MNT} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \sum_{t=0}^{T-1} f(x, y, t) e^{-j2\pi \left(\frac{x f_x}{M} + \frac{y f_y}{N} + \frac{t f_t}{T} \right)}, \quad (5)$$

где M, N, T – ширина, высота и длина видео соответственно, x, y, t – пространственно-временная позиция каждой точки в созданном пространстве. Трехмерное дискретное преобразование

$$F(f_x, f_y, f_t) = \frac{1}{MNT} \sum_{t=0}^{T-1} \left[\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f_0(x - u_1 t, y - u_2 t) e^{-j2\pi \left(\frac{x f_x}{M} + \frac{y f_y}{N} \right)} \right] e^{-j2\pi \left(\frac{t f_t}{T} \right)}. \quad (6)$$

Внутреннее слагаемое в формуле (6) – двумерное преобразование Фурье $f_0(x - u_1 t, y - u_2 t)$, может быть упрощено:

$$\begin{aligned} F(f_x, f_y, f_t) &= \\ &= \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} F_0(f_x, f_y) e^{-j2\pi \left(\frac{u_1 t f_x}{M} + \frac{u_2 t f_y}{N} \right)} e^{-j2\pi \left(\frac{t f_t}{T} \right)} = \\ &= F_0(f_x, f_y) \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} e^{-j2\pi \left(\frac{u_1 t f_x}{M} + \frac{u_2 t f_y}{N} \right)} e^{-j2\pi \left(\frac{t f_t}{T} \right)}, \quad (7) \end{aligned}$$

где $F_0(f_x, f_y)$ представляет собой двумерное преобразование Фурье $f_0(x, y)$. Преобразование Фурье комплексных компонент – условие дельта функции Дирака, отсюда получается

$$F(f_x, f_y, f_t) = F_0(f_x, f_y) \delta \left(\frac{u_1 f_x T}{M} + \frac{u_2 f_y T}{N} + f_t \right), \quad (8)$$

где δ – дельта функция Дирака. Таким образом, $F(f_x, f_y, f_t)$ будет иметь не нулевое значение на плоскости, проходящей через начало координат, как дельта функция, которая будет не нулевой только когда $\left(\frac{u_1 f_x T}{M} + \frac{u_2 f_y T}{N} + f_t \right) = 0$. Этот вывод показывает, что преобразование Фурье из сигнала, может быть рассчитано путем нахождения последователь-

Фурье имеет такой же объем, как и созданное пространство. После подстановки уравнения (4) в (5) и переставив условия, преобразование Фурье имеет вид:

ности плоскостей, содержащих движение. Объекты с различным движением будут вырабатывать частотные компоненты в разных плоскостях.

Для того чтобы отразить различные характеристики движений в сцене, применяется банк трехмерных фильтров Габора, составляющие которого отличаются ориентацией и масштабом. Передаточная функция каждого трехмерного фильтра настроена на частоту f_{r0} по направлению заданных полярными и азимутальными углами θ_0 и ϕ_0 в сферической системе координат:

$$G(f_r, \theta, \phi) = \exp \left\{ -\frac{(f_r - f_{r0})^2}{2\sigma_r^2} - \frac{(\theta - \theta_0)^2}{2\sigma_\theta^2} - \frac{(\phi - \phi_0)^2}{2\sigma_\phi^2} \right\}, \quad (9)$$

где $f_r = \sqrt{f_x^2 + f_y^2 + f_t^2}$, а $\phi = \arctan \left(\frac{f_y}{f_x} \right)$ и

$$\theta = \arccos \left(\frac{f_t}{\sqrt{f_x^2 + f_y^2 + f_t^2}} \right). \text{ Параметры } \sigma_r, \sigma_\theta \text{ и}$$

σ_ϕ – радиальные и угловые полосы, соответственно, определяющие удлинение фильтра в пространственно-временной частотной области.

Затем, каждый сгенерированный трехмерный фильтр применяется к частотному спектру клипа, и вычисляется выходной сигнал

$$G_i(f_x, f_y, f_t) = F(f_x, f_y, f_t) [G_i(f_x, f_y, f_t)], \quad (10)$$

где $G_i(f_x, f_y, f_t)$ выходной сигнал с применением i -го фильтра.

На следующем этапе вычисляется обратное преобразование Фурье:

$$H_i(x, y, t) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \sum_{t=0}^{T-1} f(x, y, t) e^{-j2\pi \left(\frac{xf_x}{M} + \frac{yf_y}{N} + \frac{tf_t}{T} \right)}. \quad (11)$$

В результате для каждого фильтра, из банка трехмерных фильтров Габора, получается вектор функции, который представляет отдельный клип, характеризующий определенное направление действий. Результирующий массив имеет размерность 4 (ширина кадра $\times$ высота кадра $\times$ количество кадров $\times$ количество фильтров). После сокращения размерности массив сохраняет в себе пространственную информацию, как ответ на каждый фильтр.

Далее происходит построение трехмерной бинарной разности микроблоков (Алгоритм 1). Deskриптор, полученный на данном этапе, обеспечивает высоко-ориентированное представление областей изображения, путем плотного захвата микроблоков внутри каждой области в нескольких ориентациях и масштабах.

Алгоритм 1: Трехмерная бинарная разность между микроблоками

Вход: Видеопоследовательность.

1. Разделение видеоряда на клипы по 3 кадра.

2. Разбиение клипа на трехмерные непересекающиеся патчи (каждый патч размером $16 \times 16 \times 3$).

3. Построение внутри каждого патча трехмерных кубоидов разного размера ($3 \times 3 \times 3$, $5 \times 5 \times 3$, $7 \times 7 \times 3$).

4. Вычисление расстояния Хэмминга между случайно выбранной парой кубоидов внутри каждого патча видеоклипа.

5. Объединение значений Хэмминга в единый вектор для каждого патча.

6. Конкатенация векторов каждого патча в единый вектор для всего клипа.

7. Шаг 2-6 повторяются последовательно для каждого трех кадров всего видеоряда до тех пор, пока не будут достигнуты последние 3 кадра.

8. Конкатенация полученных векторов для каждого клипа в единый дескриптор для всей видеопоследовательности.

Выход: Deskриптор видеопоследовательности.

На первом этапе видеопоследовательность делится на пересекающиеся последовательности из трех кадров. Далее, каждая видеопоследовательность делится на трехмерные непересекающиеся патчи, размер каждого патча составляет $16 \times 16 \times 3$. Внутри каждого патча строятся кубоиды, количество которых может варьироваться. Координаты центральных пикселей для построения кубоидов выбираются случайным обра-

зом, но они фиксированы для кубоидов разного размера.

Кубоиды внутри трехмерных патчей строятся по принципу объемного локального двоичного паттерна (Volumetric Local Binary Pattern, VLBP) [23]. VLBP – это расширенный оператор локального бинарного шаблона для описания характеристик объекта в пространственно-временной области. Пространственно-временная информация в этом случае представлена таким образом, чтобы рассматривать последовательность кадров как объем (кубоид) и определять окрестность каждого пикселя в трехмерном пространстве.

Локальный бинарный шаблон (LBP) – широко используемый оператор для извлечения функций из двумерных изображений, который имеет превосходную надежность при распознавании образов [24]. В классической реализации LBP определяется как область размером 3×3 . В этой области значение интенсивности центрального пикселя, взятого за порог, сравнивается со значением соседних 8 пикселей (12). Если значение пикселя превышает пороговое значение, этому пикселю присваивается 1, в противном случае – 0 (13). Таким образом, результатом применения основного оператора LBP к пикселю является 8-битный двоичный код, описывающий окрестность этого пикселя [24].

$$LBP_{P,R} = \sum_{p=0}^{P-1} f(i_p - i_c) 2^p, \quad (12)$$

где P – круговая окрестность пикселей (в классической реализации рассматри-

вается 8 соседних пикселей, т.е. $P=8$); R – радиус; i_p – интенсивность пикселей круговой окрестности ($p=0, 1, \dots, P-1$), i_c – интенсивность центрального пикселя; $f(x)$ – это функция, которая записывает «1», если центральный пиксель меньше или равен соседнему, иначе – «0»:

$$f(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } i_p \geq i_c, \\ 0, & \text{если } i_p < i_c. \end{cases} \quad (13)$$

Чтобы расширить LBP для анализа динамической текстуры V , динамическая текстура определяется в локальной области последовательности кадров. VLBP определяется в подобъеме $3 \times 3 \times 3$. При вычислении оператора VLBP двоичный код строится по аналогии с LBP, но соседние пиксели, расположенные в предыдущем и следующем кадрах, также сравниваются с центральным пикселем, как показано на рис. 6.

VLBP рассчитывается следующим образом [22]:

$$\begin{aligned} V = & v(i_{t_c-L,c} - i_{t_c,c}, i_{t_c-L,0} - i_{t_c,c}, \dots, \\ & i_{t_c-L,p-1} - i_{t_c,c}, i_{t_c,c}, i_{t_c,0} - i_{t_c,c}, \dots, \\ & i_{t_c,p-1} - i_{t_c,c}, i_{t_c+L,0} - i_{t_c,c}, \dots, i_{t_c+L,p-1} - i_{t_c,c}, \\ & i_{t_c+L,c} - i_{t_c,c}), \end{aligned} \quad (14)$$

где $i_{t_c,c}$ – соответствует значению интенсивности уровня серого центрального пикселя окрестности локального объема; $i_{t_c-L,c}$ и $i_{t_c+L,c}$ – соответствуют значениям уровня серого центральных пикселей в предыдущем и следующем кадрах с интервалом времени L ;

$i_{t,p} (t=t_c-L, t_c, t_c+L; p=0, \dots, P-1)$ соответствуют значениям интенсивности уровней серого пикселей P одинаково разнесенных на окружности радиусом $R (R>0)$ в изображении t , которые образуют круговое симметричное множество соседних пикселей.

Этот оператор фиксирует появление различных паттернов в окрестности каждого пикселя на $(2(P+1)+P=3P+2)$ -мерной гистограмме [23].

Процедура вычисления оператора большого локального двоичного шаблона показана на рис. 7.

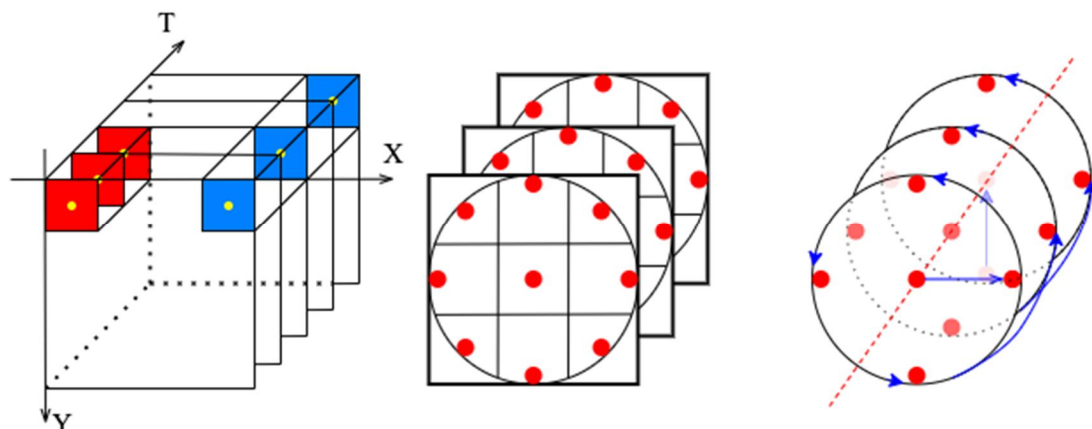


Рис. 6. Принцип построения кубоида внутри пространственно-временного фрагмента видеопоследовательности [23]

Fig. 6. The principle of constructing a cuboid inside a space-time fragment of a video sequence [23]

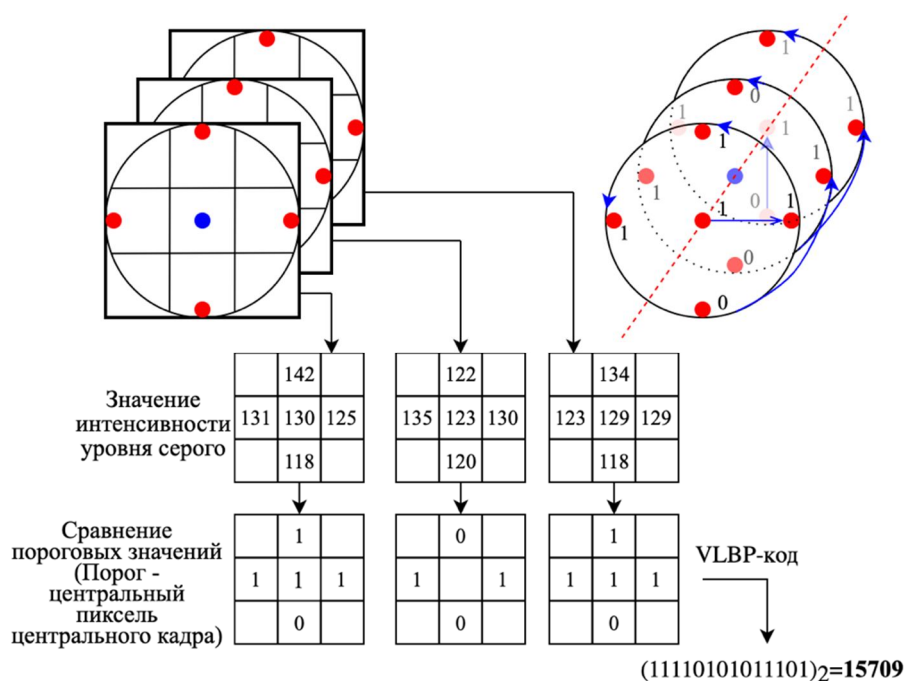


Рис. 7. Пример процедуры расчета VLBP с параметрами $L=1, P=4, R=1$

Fig. 7. An example of a VLBP calculation procedure with parameters $L=1, P=4, R=1$

Рассмотрим пример построения оператора объемной VLBP для кубоидов внутри трехмерного фрагмента видеопоследовательности в соответствии с рис. 8. На рисунке схематично показаны 3 последовательных кадра и построены пары кубоидов, для которых оператор VLBP рассчитывается, как описано выше. Кубоиды обозначены

светло-серым и темно-серым цветами. Красные линии соединяют кубоиды между двоичными кодами VLBP, для которых будет вычислено расстояние Хэмминга (красные линии отмечены только на первом рисунке кубоидами радиуса $R = 1$, во избежание перегруженности рисунков с кубоидами радиусом $R=2$ и $R=3$).

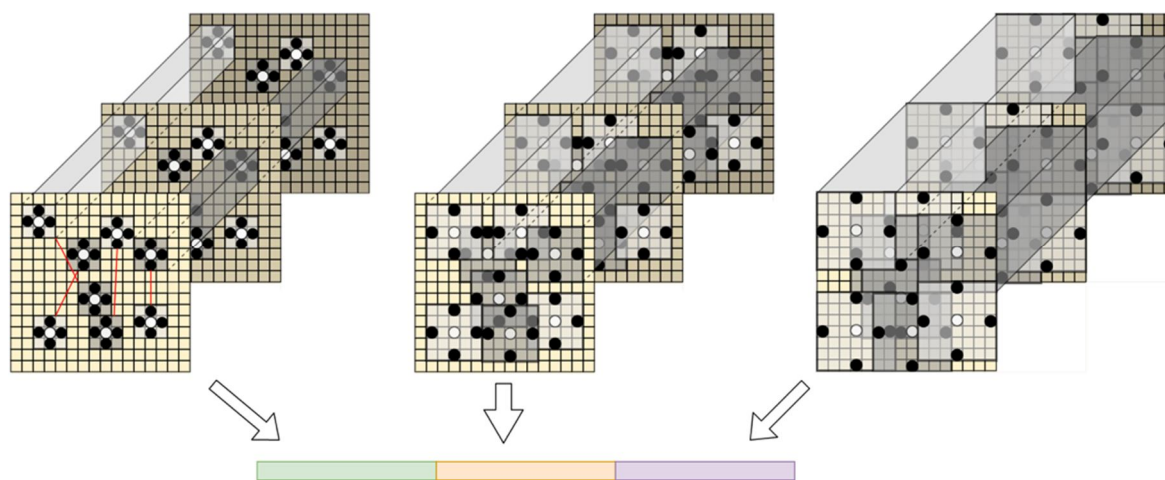


Рис. 8. Пример построения кубоидов в трехмерном патче размером $16 \times 16 \times 3$

Fig. 8. An example of building cuboids in a 3D patch with a size of $16 \times 16 \times 3$

На рис. 7 показан размер трехмерного патча $16 \times 16 \times 3$, кубоиды размерами $3 \times 3 \times 3$, $5 \times 5 \times 3$ и $7 \times 7 \times 3$. Координаты центральных пикселей (C) выбраны случайным образом – отмечены белым цветом. После выбора центральных координат кубоида они остаются фиксированными и сохраняются для каждого фрагмента видеопоследовательности. Соседние пиксели ($P=4$) расположены на равном расстоянии от центрального с радиусом $R=1,2,3$ – схематично отмечены черным цветом. В качестве примера на рис. 7 представлено всего 8 кубоидов, на практике их количество может варьироваться. Затем для каждой пары

кубоидов (на рис. 7, соединенных красной линией) вычисляется расстояние Хэмминга [25]. Значения, полученные для каждой пары кубоидов разного размера, последовательно записываются в один вектор, который характеризует трехмерный фрагмент в нескольких разрешениях.

Расстояние Хэмминга d_{xy} – это количество позиций, в которых соответствующие символы двух векторов одинаковой длины x_i и y_i различны:

$$d_{xy} = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|. \quad (15)$$

Оператор трехмерной бинарной разности между микроблоками рассчи-

тывается только для трех кадров, предполагается, что он будет применяться последовательно к следующим кадрам для всего видео с построением гистограммы для каждого трех кадров. Все полученные гистограммы последовательно объединяются в один результирующий вектор признаков для многокадрового обучения.

Предлагаемые функции извлекают информацию из фрагмента изображения на трех разных уровнях: разрешение, ориентация и масштаб. Одновременное извлечение микроблоков разного размера приводит к их описанию в нескольких разрешениях. Случайный выбор центральных координат кубов облегчает получение информации в нескольких направлениях. Масштабная инвариантность достигается за счет изменения расстояния между точками [26].

Использование оператора локального бинарного шаблона для вычисления гистограммы кубоида дает ряд преимуществ: инвариантность относительно яркости, относительно низкие вычислительные затраты за счет бинарных вычислений.

Для повышения производительности и эффективности системы распознавания действий параллельно с построением трехмерного дескриптора бинарной разности между микроблоками анализируется скелет человека [27] и строится дескриптор на основе геометрических признаков, которые информативно описывают расстояния между суставами тела человека, как описано в [21].

На заключительном этапе дескрипторы подаются в классификатор для категоризации действий, выполняемых на видеопоследовательности. Этот этап можно охарактеризовать двумя подходами: объединение дескриптора скелета и трехмерной бинарной разности микроблоков в один вектор и его классификация, или классификация каждого из дескрипторов отдельно, с присвоением веса каждому из них, и последующем принятием решения. В этой статье предлагается классифицировать дескрипторы отдельно с помощью мультиклассовой SVM с последующим принятием решения о категоризации действий, происходящих в видеоклипе [21].

После принятия решения о категории действия, происходящем во входной видеопоследовательности, алгоритм на персональном компьютере через виртуальный TCP/IP порт передает в среду ROBOGuid команду роботу.

Результаты и их обсуждение

Экспериментальные результаты модуля управления роботом на основе жестовых команд

В настоящее время нет существующего стандартизированного набора жестовых команд, предназначенного для управления роботом, на основе которого можно проверить эффективность методов распознавания действий, поэтому представленный алгоритм распознавания жестовых команд был протестирован на общедоступном наборе данных UCF101 [28]. Это набор данных для

распознавания действий реалистичных видеороликов, собранных с YouTube, имеет 101 категорию действий. Сложность представленной базы данных заключается в движении камеры, вариациях внешнего вида и позы объектов, масштаба, точек обзора, условий освещения, загроможденном фоне и т.д. Использование данного тестового набора позволяет сравнить предложенный алгоритм с существующими подходами.

Для эксперимента были выбраны видеоролики на которых человек, выполняющий действие, представлен в полный рост, присутствует изменения освещения, неоднородность фона, присутствуют амплитудные движения руками. Таким образом, алгоритм был протестирован на следующих действиях: бокс, толчок и прыжок, джек-прыжок, тай-чи, приседания с собственным весом, скакалка, жим лежа, отжимания, хула-хуп, жонглирование мячами и йо-йо.

Результаты экспериментов представлены в таблице 1. Эффективность

предложенного алгоритма сравнивается с популярными методами (iDT + HSV, Two-stream + LSTM, LTC) [29]. Под эффективностью подразумевается точность классификации – отношение правильно распознанных объектов к количеству всех образцов:

$$\text{Acc} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}} \cdot 100\%, \quad (16)$$

где TP – правильно идентифицированные образцы; FP – образцы с ошибкой распознавания; TP+FP – весь тестовый набор.

Анализ полученных результатов показывает, что эффективность разработанного метода относительно высока. Предлагаемый метод имеет следующие преимущества по сравнению с существующими в настоящее время методами: это не итеративный, вычислительно привлекательный алгоритм, который оптимизирует использование (глобальной) пространственной/временной и динамической информации и имеет разумное время вычислений.

Таблица 1. Точность распознавания действия на тестовых видео из набора данных UCF101

Table 1. Accuracy of action recognition on test videos from the UCF101 dataset

Методы / Methods	Акк (%)
iDT+HSV	87,9
Two-stream+LSTM	88,6
LTC	91,7
Предложенный алгоритм	93,2

Исследование разработанного модуля сопряжения на примере отработки сложного пространственного контура

Разработанный модуль сопряжения был использован на примере отработки сложного пространственного контура, имитирующего фрезерование детали. Тестовый контур состоял из 73589 точек и включал в себя линейные и сплайновые участки. Интерполируемые точки были сформированы таким образом, что учитывали алгоритмы с-образного планирования подач и сгла-

живания траектории инструмента кубическим B -сплайном, обеспечим траектории геометрическую непрерывность G^2 . Вставка сплайнов выполнялась в системе координат детали, в которой дополнительно была введена СК вращательного движения для реализации алгоритма сглаживания ориентации инструмента, представляющей собой единичный вектор, перпендикулярный обрабатываемой поверхности. Результаты визуализации отработки контура показаны на рис. 8.

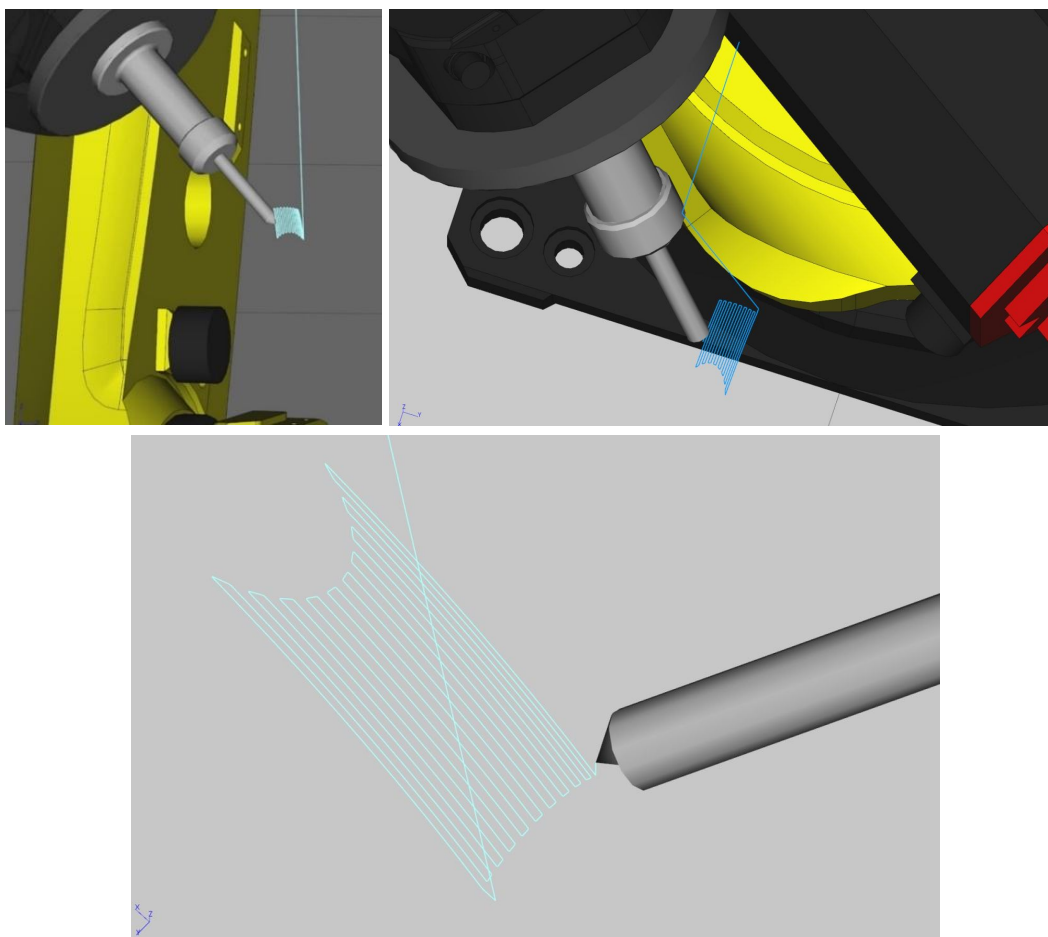


Рис. 8. Траектория движения инструмента на примере отработки сложного пространственного контура в среде ROBOGUID

Fig. 8. Tool path using the example of complex spatial contour development in the ROBOGUID environment

Выводы

1. На современном этапе развития производства необходимо использовать современное высокотехнологическое оборудование, к числу которых относятся промышленные роботы и сложные обрабатывающие центры, а также средства имитационного моделирования для снижения времени переналадки оборудования и отладки технологии обработки в рамках освоения новой продукции, что существенно снижает материальные и трудовые затраты.

2. Средства имитационного моделирования можно использовать не только для разработки и отладки технологических программ, но и для апробации собственных методов и алгоритмов управления посредством интеграции

собственного программного обеспечения в средства моделирования.

3. В рамках разработки системы управления роботом и исследования разработанных алгоритмов и методов был использован программный пакет ROBOGuid от компании Fanuk, была разработана программа передачи информации о целевых точках движения инструмента через виртуальный TCP/IP порт и скрипт для отработки целевых точек в среде моделирования.

4. Разработанный модуль сопряжения был использован на примере отработки сложного пространственного контура, имитирующего фрезерование детали, а метод отладки алгоритмов и методов системы управления показал свою эффективность и необходимость развития этого направления.

Список литературы

1. Индустрия 4.0 в станкостроении / А. А. Грибков, М. С. Морозкин, В. Р. Купцов, П. М. Пивкин, А. А. Зеленский // *СТИН*. 2021. № 4: 9-11. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44870393>

2. SinuTrain for SINUMERIK Operate. Siemens; 2021 [проектировано 10 ноября 2021]. <https://new.siemens.com/global/en/markets/machinebuilding/machine-tools/cnc4you/sinutrain-uebersicht.html>.

3. ShopTurn; 2021 [проектировано 10 ноября 2021]. Доступно: https://docviewer.yandex.ru/?tm=1634583248&tld=ru&lang=ru&name=TUST_0404_ru.pdf&text=ShopTurn&url=https%3A//support.industry.siemens.com/dl/files/019/28803019/att_32871/v1/TUST_0404_ru.pdf&lr=213&mime=pdf&l10n=ru&sign=d0d5accb52e1d8a43751b49e7d44e6ce&keyno=0.

4. ShopMill; 2021 [проектировано 10 ноября 2021]. Доступно: https://docviewer.yandex.ru/?tm=1634583319&tld=ru&lang=ru&name=TUSM_1209_ru_ru-RU.pdf&text=Shop-Shop-

Mill&url=https%3A//support.industry.siemens.com/dl/files/295/41131295/att_80704/v1/TUSM_1209_ru_ru-RU.pdf&lr=213&mime=pdf&l10n=ru&sign=89ed36f9c3c96b52801a3f382b11df71&keyno=0.

5. Vericut; 2021 [проецировано 10 ноября 2021]. Доступно: <http://vericut.ru/index.php/products/products>

6 Simulate Robot Applications. RoboDK; 2021 [проецировано 11 ноября 2021]. Доступно: <https://robodk.com/index>.

7. ROBOGuid; 2021 [проецировано 11 ноября 2021]. Доступно: <https://www.fanuc.eu/ru/ru/роботы/принадлежности/roboguide>.

8. Высокопроизводительная система числового программного управления на базе программируемых логических интегральных схем / А.А. Зеленский, М.А. Харьков, С.П. Ивановский, Т.Х. Абдуллин // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2018, 14(5): 8–12.

9. Высокопроизводительная цифровая система на основе ПЛИС для управления движением многокоординатных станков и промышленных роботов / А.А. Зеленский, Т.Х. Абдуллин, Ю.В. Илюхин, М.А. Харьков // *СТИН*. 2019, (8): 5-8.

10. Зеленский А.А., Абдуллин Т.Х., Алепо А.В. Особенности построения в реальном времени s-образной кривой разгона/торможения при кусочно-линейной интерполяции поверхностей сложной формы. *Робототехника и техническая кибернетика*. 2021, 9 (3): 17–26.

11. Zhao H., Zhu L.M., Ding H. A real-time look-ahead interpolation methodology with curvature-continuous B-spline transition scheme for CNC machining of short line segments. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2013, 65: 88-98. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.10.005>

12. Using neuro-accelerators on FPGAs in collaborative robotics tasks. *Proceedings Volume 11876* / A. Zelensky, E. Semenishchev, A. Alepko, T. Abdullin, Y. Ilyukhin, V. Voronin // *Optical Instrument Science, Technology, and Applications II*. 2021, 118760O. <https://doi.org/10.1117/12.2600582>

13. Heterogeneous neuromorphic processor based on risc-v architecture for real-time robotics tasks / A. Zelensky, A. Alepko, V. Dubovskov, V. Kuptsov // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2. Сер. "Artificial Intelligence and Machine Learning in Defense Applications II". 2020, 115430L. <https://doi.org/10.1117/12.2574470>

14. Karel. Википедия; 2021 [обновлено 14 февраля 2021; проецировано 10 ноября 2021]. Доступно: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Karel>.

15. TCP/IP. Википедия; 2021 [обновлено 28 октября 2021; процитировано 10 ноября 2021]. Доступно: <https://ru.wikipedia.org/wiki/TCP/IP>.
16. Chen C., Jafari R., Kehtarnavaz N. UTD-MHAD: A Multimodal Dataset for Human Action Recognition Utilizing a Depth Camera and a Wearable Inertial Sensor. *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing*, 2015. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2015.7350781>
17. Serrano-Cuerda J., Fernández-Caballero A., López M. Selection of a visible-light vs. thermal infrared sensor in dynamic environments based on confidence measures. *Applied Sciences*. 2014, 4(3): 331-350. <https://doi.org/10.3390/app4030331>
18. Модель объединения изображений, полученных с датчиков различной природы / М.М. Жданова, В.В. Воронин, Р.А. Сизякин, Н.В. Гапон, О.С. Балабаева // *Динамика технических систем «ДТС-2019»: сб. тр. XV междунар. науч.-техн. конф.* 2019, 81-84.
19. Fusion of color and depth information for human actions recognition / V. Voronin, M. Zhdanova, E. Semenishchev, A. Zelensky, O. Tokareva // *Signal Processing, Sensor/Information Fusion, and Target Recognition XXIX*. 2020, Т. 11423. <https://doi.org/10.1117/12.2560130>.
20. Solmaz B., Assari S. M., Shah M. Classifying web videos using a global video descriptor. *Machine vision and applications*. 2013, 24(7): 1473-1485. <https://doi.org/10.1007/s00138-012-0449-x>
21. Human activity recognition for efficient human-robot collaboration / M. Zhdanova, V. Voronin, E. Semenishchev, Y. Ilyukhin, A. Zelensky // *Proc. International Society for Optics and Photonics*. 2020, 115430K. <https://doi.org/10.1117/12.2574133>.
22. Wan Q. et al. Face description using anisotropic gradient: thermal infrared to visible face recognition. *Mobile Multimedia/Image Processing, Security, and Applications*. 2018, 106680V. <https://doi.org/10.1117/12.2304898>.
23. Zhao G., Pietikäinen M. Dynamic texture recognition using volume local binary patterns. *Springer*. 2006, 165-177. https://doi.org/10.1007/978-3-540-70932-9_13.
24. Maenpaa T. The Local Binary Pattern Approach to Texture Analysis: Extensions and Applications. 2004. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=8860330>.
25. Parametric local multiview hamming distance metric learning / D. Zhai, X. Liu, H. Chang, Y. Zhen, X. Chen, M. Guo, W. Gao // *Pattern Recognition*. 2018, 75: 250-262. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2017.06.018>
26. Mehta R., Eguiazarian K. E. Texture classification using dense micro-block difference. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2016, 25(4): 1604-1616 <https://doi.org/10.1109/TIP.2016.2526898>.

27. Belagiannis V., Zisserman A. Recurrent human pose estimation. *12th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition*. 2017: 468-475. <https://doi.org/10.1109/FG.2017.64>
28. Soomro K., Zamir A. R., Shah M. UCF101: A Dataset of 101 Human Action Classes From Videos in The Wild. *CRCV-TR-12-01*. 2012. <https://arxiv.org/abs/1212.0402>
29. Bag of visual words and fusion methods for action recognition: comprehensive study and good practice / X. Peng, L. Wang, X. Wang, Y. Qiao // *Computer Vision and Image Understanding*. 2016, 150: 109-125 <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2016.03.013>

References

1. Gribkov A. A., Pivkin P. M., Zelenskii A. A. Industriya 4.0 v stankostroenii [State Industrial Policy and the Machine-Tool Industry]. *Russian Engineering Research*. 2021, 41(4): 342-346. <https://doi.org/10.3103/S1068798X21040092>
2. SinuTrain for SINUMERIK Operate. Siemens; 2021 [cited November 10, 2021]. Access: <https://new.siemens.com/global/en/markets/machinebuilding/machine-tools/cnc4you/sinutrain-uebersicht.html>.
3. ShopTurn; 2021 [cited November 10, 2021]. Access: https://docviewer.yandex.ru/?tm=1634583248&tld=ru&lang=ru&name=TUST_0404_ru.pdf&text=ShopTurn&url=https%3A//support.industry.siemens.com/dl/files/019/28803019/att_32871/v1/TUST_0404_ru.pdf&lr=213&mime=pdf&l10n=ru&sign=d0d5accb52e1d8a43751b49e7d44e6ce&keyno=0.
4. ShopMill; 2021 [cited November 10, 2021]. Access: https://docviewer.yandex.ru/?tm=1634583319&tld=ru&lang=ru&name=TUSM_1209_ru_ru-RU.pdf&text=ShopMill&url=https%3A//support.industry.siemens.com/dl/files/295/41131295/att_80704/v1/TUSM_1209_ru_ru-RU.pdf&lr=213&mime=pdf&l10n=ru&sign=89ed36f9c3c96b52801a3f382b11df71&keyno=0.
5. Vericut; 2021 [cited November 10, 2021]. Access: <http://vericut.ru/index.php/products/products>
6. Simulate Robot Applications. RoboDK; 2021 [cited November 10, 2021]. Access: <https://robodk.com/index>.
7. ROBOGUIDE; 2021 [cited November 10, 2021]. Access: <https://www.fanuc.eu/ru/ru/роботы/принадлежности/roboguide>.
8. Zelensky A.A., Kharkov M.A., Ivanovsky S.P., Abdullin T.Kh. Vysokoproduktivnaya sistema chislovogo programmnoy upravleniya na baze programmiruyemykh logicheskikh integral'nykh skhem [High-performance numerical control system based on programmable logic integrated circuits]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2018, 14(5): 8–12. (In Russ.)

9. Zelenskii A.A., Abdullin T.Kh., Ilyukhin Yu.V., Kharkov M.A. Vysokoproduktivnaya tsifrovaya sistema na osnove PLIS dlya upravleniya dvizheniyem mnogoosnoy stankov i promyshlennykh robotov [High performance FPGA based digital motion control system for multi-axis machine tools and industrial robots]. *STIN=STIN*. 2019, (8): 5-8. (In Russ.)

10. Zelenskii A.A., Abdullin T.Kh., Alepko A.V. Osobennosti postroyeniya v real'nom vremeni s-obraznoy krivoy razgona/tormozheniya pri kusochno-lineynoy interpolatsii poverkhnostey slozhnoy formy [Features of real-time construction of an s-shaped acceleration / deceleration curve with piecewise-linear interpolation of complex-shaped surfaces]. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika = Robotics and technical cybernetics*. 2021, 9 (3): 17–26. (In Russ.)

11. Zhao H., Zhu L.M., Ding H. A real-time look-ahead interpolation methodology with curvature-continuous B-spline transition scheme for CNC machining of short line segments. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2013, 65: 88-98. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.10.005>

12. Zelensky A., Semenishchev E., Alepko A., Abdullin T., Ilyukhin Y., Voronin V. Using neuro-accelerators on FPGAs in collaborative robotics tasks. *Proceedings Volume 11876, Optical Instrument Science, Technology, and Applications II*. 2021, 118760O. <https://doi.org/10.1117/12.2600582>

13. Zelensky A., Alepko A., Dubovskov V., Kuptsov V. Heterogeneous neuromorphic processor based on risc-v architecture for real-time robotics tasks. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2. Ser. "Artificial Intelligence and Machine Learning in Defense Applications II"*. 2020, 115430L. <https://doi.org/10.1117/12.2574470>

14. Karel. Wikipedia; 2021 [updated February 14, 2021; cited November 10, 2021]. Access: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Karel>.

15. TCP/IP. Wikipedia; 2021 [updated October 28, 2021; cited November 10, 2021]. Access: <https://ru.wikipedia.org/wiki/TCP/IP>.

16. Chen C., Jafari R., Kehtarnavaz N. UTD-MHAD: A Multimodal Dataset for Human Action Recognition Utilizing a Depth Camera and a Wearable Inertial Sensor. *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing*, 2015. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2015.7350781>.

17. Serrano-Cuerda J., Fernández-Caballero A., López M. Selection of a visible-light vs. thermal infrared sensor in dynamic environments based on confidence measures. *Applied Sciences*. 2014, 4(3): 331-350. <https://doi.org/10.3390/app4030331>

18. Zhdanova M.M., Voronin V.V., Sizyakin R.A., Gapon N.V., Balabaeva O.S. Model' ob'yedineniya izobrazheniy, poluchennykh s datchikov razlichnoy prirody [A model for

combining images obtained from sensors of different nature]. *Dinamika tekhnicheskikh sistem «DTS-2019»: sb. tr. XV mezhdunar. nauch.-tekhn. Konf. = Proc. Dynamics of technical systems "DTS-2019"*. 2019, 81-84. (In Russ.)

19. Voronin V., Zhdanova, M., Semenishchev, E., Zelensky, A., Tokareva, O. Fusion of color and depth information for human actions recognition. *Signal Processing, Sensor/Information Fusion, and Target Recognition XXIX*. 2020, T. 11423. <https://doi.org/10.1117/12.2560130>.

20. Solmaz B., Assari S. M., Shah M. Classifying web videos using a global video descriptor. *Machine vision and applications*. 2013, 24(7): 1473-1485. <https://doi.org/10.1007/s00138-012-0449-x>

21. Zhdanova M., Voronin V., Semenishchev E., Ilyukhin Y., Zelensky A. Human activity recognition for efficient human-robot collaboration. *Proc. International Society for Optics and Photonics*. 2020, 115430K. <https://doi.org/10.1117/12.2574133>.

22. Wan Q. et al. Face description using anisotropic gradient: thermal infrared to visible face recognition. *Mobile Multimedia/Image Processing, Security, and Applications*. 2018, 106680V. <https://doi.org/10.1117/12.2304898>

23. Zhao G, Pietikäinen M. Dynamic texture recognition using volume local binary patterns. *Springer*. 2006, 165-177. https://doi.org/10.1007/978-3-540-70932-9_13

24. Maenpaa T. The Local Binary Pattern Approach to Texture Analysis: Extensions and Applications. 2004. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=8860330>.

25. Zhai D., Liu X., Chang H., Zhen Y., Chen X., Guo M., Gao W. Parametric local multiview hamming distance metric learning. *Pattern Recognition*. 2018, 75: 250-262. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2017.06.018>

26. Mehta R., Eguiazarian K. E. Texture classification using dense micro-block difference. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2016, 25(4): 1604-1616 <https://doi.org/10.1109/TIP.2016.2526898>.

27. Belagiannis V., Zisserman A. Recurrent human pose estimation. *12th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition*. 2017: 468-475. <https://doi.org/10.1109/FG.2017.64>

28. Soomro K., Zamir A. R., Shah M. UCF101: A Dataset of 101 Human Action Classes From Videos in The Wild. *CRCV-TR-12-01*. 2012. <https://arxiv.org/abs/1212.0402>

29. Peng X., Wang L., Wang X., Qiao Y. Bag of visual words and fusion methods for action recognition: comprehensive study and good practice. *Computer Vision and Image Understanding*. 2016, 150: 109-125 <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2016.03.013>

Информация об авторах / Information about the Authors

Зеленский Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, директор Института цифровых интеллектуальных систем МГТУ «СТАНКИН», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: a.zelenskiy@stankin.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3464-538X>, Researcher ID: AAG-2201-2019

Alexander A. Zelensky, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Director of the Institute of Digital Intelligent Systems MSTU «STANKIN», Moscow, Russian Federation, e-mail: a.zelenskiy@stankin.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3464-538X>, Researcher ID: AAG-2201-2019

Жданова Мария Михайловна, младший научный сотрудник МГТУ «СТАНКИН», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: mpismenskova@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1119-5221>, Researcher ID: A-2068-2014

Marina M. Zhdanova, Junior Researcher of MSTU «STANKIN», Moscow, Russian Federation, e-mail: mpismenskova@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1119-5221>, Researcher ID: A-2068-2014

Абдуллин Тагир Хабибович, ведущий инженер, преподаватель кафедры «Промышленной электроники и интеллектуальных цифровых систем», МГТУ «СТАНКИН», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: everestultimate@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2910-5477>

Tagir Kh. Abdullin, Leading Engineer, Lecturer at the Department of Industrial Electronics and Intelligent Digital Systems of MSTU «STANKIN», Moscow, Russian Federation, e-mail: everestultimate@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2910-5477>

Воронин Вячеслав Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заместитель директора центра когнитивных технологий и машинного зрения МГТУ «СТАНКИН», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: voronin_sl@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8114-6383>, Researcher ID: H-7334-2013

Viacheslav V. Voronin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Deputy Director of the Center for Cognitive Technologies and Machine Vision of MSTU «STANKIN», Moscow, Russian Federation e-mail: voronin_sl@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8114-6383>, Researcher ID: H-7334-2013

Совместное моделирование нечеткой двусвязной системы управления продольным точением в MSC.Adams и Matlab

А. В. Белоусов¹, А. В. Рыбина¹ ✉

¹ Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова
ул. Костюкова, д. 46, г. Белгород 308012, Российская Федерация

✉ e-mail: anna.vasilevna@mail.ru

Резюме

Цель исследования. В статье рассматривается возможность разработки и моделирования нечеткой двусвязной системы управления процессом токарной обработки деталей на основе совместного применения программы для создания виртуальных моделей MSC.Adams и пакета математического анализа Matlab. Актуальность темы исследования связана с тенденцией применения в отечественном и зарубежном станкостроении функций искусственного интеллекта для компенсации температурных деформаций, силовых и вибрационных возмущений, мониторинга состояния инструментов, адаптивного управления с учетом фактического состояния процесса резания в режиме реального времени. При проектировании новых систем управления процессом токарной обработки изделий важной задачей является создание математических и виртуальных моделей и синтеза интеллектуальных алгоритмов управления, обеспечивающих решение задач в условиях воздействия неопределенных возмущений.

Методы. Для разработки математической модели и ее анализа применены основы теории нечетких множеств в задачах управления, теории металлообработки, методы математического моделирования систем управления. Синтез нечеткого регулятора и виртуальная модель выполнены с помощью современных прикладных программных пакетов Matlab и MSC.Adams.

Результаты. В статье представлен алгоритм нечеткого управления резанием и его реализация в среде Simulink с передачей данных в MSC.Adams, а также виртуальный прототип токарного станка в MSC.Adams. Приведены и проанализированы графики виброперемещений режущей кромки инструмента, изменения температуры и силы резания.

Заключение. Результаты тестирования модели показывают, что использование совместного моделирования нечеткой двусвязной системы управления токарной обработкой возможно для решения задачи повышения эффективности обработки на действующем оборудовании в условиях воздействия неопределенных возмущений.

Ключевые слова: продольное точение; процесс резания; температура резания; вибрации; виртуальная модель; MSC.Adams; шероховатость.

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

Для цитирования: Белоусов А. В., Рыбина А. В. Совместное моделирование нечеткой двусвязной системы управления продольным точением в MSC.Adams и Matlab // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(1): 116-128. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-116-128>.

Поступила в редакцию 24.01.2022

Подписана в печать 09.02.2022

Опубликована 31.03.2022

© Белоусов А. В., Рыбина А. В., 2022

Joint Modeling of a Fuzzy Two-Connected Longitudinal Turning Control System in MSC. Adams and Matlab

Alexander V. Belousov¹, Anna V. Rybina¹ ✉

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

✉ e-mail: tanygin@yandex.com

Abstract

Purpose of research. The article considers the possibility of developing and modeling a fuzzy bipartite control system of the turning process based on the joint application of the program for creating virtual models MSC.Adams and mathematical analysis package Matlab. The relevance of the research topic is related to the trend of application of artificial intelligence functions in domestic and foreign machine tool industry for compensation of temperature deformations, force and vibration disturbances, tool condition monitoring, adaptive control taking into account the actual state of the cutting process in real time. In designing new control systems of the turning process, an important task is to create mathematical and virtual models and synthesis of intelligent control algorithms, providing solutions to problems under conditions of uncertain perturbations.

Methods. For the development of the mathematical model and its analysis basics of the theory of fuzzy sets in the problems of control, theory of metalworking, methods of mathematical modeling of control systems have been applied. The synthesis of fuzzy controller and virtual model have been developed with the help of modern applied software packages Matlab and MSC.Adams.

Results. The fuzzy cutting control algorithm and its implementation in the Simulink environment with the data transfer to MSC.Adams, as well as the virtual prototype of the lathe in MSC.Adams are presented in the article. Graphs of the vibration movements of the cutting edge of the tool, changes in temperature and cutting force are given and analyzed.

Conclusion. The results of model testing show that the use of joint modeling of fuzzy two-connected turning control system is possible to solve the problem of improving the efficiency of machining on the operating equipment under the influence of uncertain disturbances.

Keywords: longitudinal turning; cutting process; cutting temperature; vibrations; virtual model; MSC.Adams; roughness.

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

For citation: Belousov A. V., Rybina A. V. Joint Modeling of a Fuzzy Two-Connected Longitudinal Turning Control System in MSC. Adams and Matlab. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(1): 116-128 (In Russ.). [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2022-26-1-116-128](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-116-128).

Received 24.01.2022

Accepted 09.02.2022

Published 31.03.2022

Введение

В настоящее время главной тенденцией развития отечественного и зарубежного станкостроения является применение функций искусственного интеллекта для компенсации температурных деформаций, силовых и вибрационных возмущений; мониторинга состояния инструментов, адаптивного управления с учетом фактического состояния процесса резания в режиме реального времени [1-3]. Важную роль при разработке новых систем управления процессом металлообработки имеет решение задач создания математических или виртуальных моделей и синтеза алгоритмов управления, обеспечивающих функционирование в условиях воздействия неопределенных возмущений [4-9]. В работе [10] представлен подход к разработке обобщенной модели системы управления процессом токарной обработки изделий в Matlab/Simulink с учетом взаимодействия силовых, вибрационных и температурных процессов. Как известно, собственные вибрации и колебания температуры при продольном точении изделий оказывают существенное влияние на высоту микронеровностей обработанной поверхности.

В настоящей работе будет представлена виртуальная модель станка, разработанная в среде Adams, и нечеткая двусвязная система управления, реализованная в Matlab/Simulink, а также оценка шероховатости и волнистости обработанной поверхности детали. Задача совместного решения уравнений

динамики резания и алгоритма нечеткого управления была сформулирована и реализована в инженерных пакетах для создания виртуальных моделей и математического анализа MSC.Adams и Matlab/Simulink. Программное обеспечение MSC.Adams позволяет создать виртуальную модель (возможно в дальнейшем нелинейную и упругую) кинематической схемы станка с указанием размеров и материалов без описания аналитической модели на основе системы дифференциальных уравнений [11-13]. Matlab включает пакет расширений Fuzzy Logic Toolbox для разработки алгоритма нечеткого вывода с динамической настройкой подачи и скорости вращения. Большинство существующих систем адаптивного управления резанием включает регулирование одного режимного параметра, чаще всего подачи, для повышения точности стабилизации характеристик качества поверхностного слоя целесообразно использовать многосвязные системы управления, в частности в данной работе предложен нечеткий алгоритм изменения скорости резания и подачи в процессе формообразования. Экспериментально доказано, что оптимальным условиям резания соответствуют оптимальная температура и минимальный или минимально-стабилизированный параметр силы резания. Данное утверждение подтверждается в работе [14] на основе опытов с одновременным измерением составляющих силы и температуры резания. Современное технологическое оборудо-

вание – это многоконтурные нестационарные и нелинейные системы. Динамическое состояние металлообрабатывающего оборудования изменяется в процессе работы не только при смене операций, но и в процессе выполнения типовой операции технологического процесса. Так как все возмущающие воздействия априорно учесть практически невозможно, то при расчете режимов резания необходимо учитывать множество факторов, связанных с фактическим состоянием заготовки, инструмента и всей технологической системы в целом. Этим и определяется актуальность оптимизации режимов механической обработки изделий с учетом фактического состояния процесса в режиме реального времени. Применение двух каналов управления позволит наиболее полно использовать запас мощности приводов подач и главного движения. Метод совместного моделирования токарных станков на основе MSC. Adams и Matlab позволит совершенствовать системы управления режимами обработки с учетом вибрационных и тепловых процессов при резании для достижения заданных параметров шероховатости поверхности изделий при воздействии внешних возмущающих воздействий.

Материалы и методы

Динамическая модель системы резания токарного станка может быть

представлена системой уравнений с тремя степенями свободы:

$$[M]\{\ddot{q}\} + H\{\dot{q}\} + C\{q\} = \{F(t)\},$$

где $[M]$ — симметричная диагональная инерционная матрица масс элементов расчетной модели; $M\{\ddot{q}\}$ – второй закон Ньютона; $H\{\dot{q}\}$ – сила упругости; $C\{q\}$ – конструкционная демпфирующая сила, пропорциональная перемещению, $\{F(t)\}$ – сила резания, включающая три взаимно-перпендикулярных составляющих [15, 16]. Циклическое изменение динамического усилия резания, вызванное системой резец-заготовка, вызывает вибрацию вдоль осей X, Y, Z . С помощью разработанной модели упругой системы можно определить упругое перемещение вершины резца в осевом, радиальном и касательном направлениях под действием составляющих силы резания.

Виртуальный прототип реализован в MSC.Adams, и с помощью модуля MSC.Adams Controls (рис. 1, 2) модель кинематики станка интегрирована в нечеткую двусвязную систему управления токарным станком, реализованную в среде Matlab/Simulink (рис. 3).

Нечеткая модель состоит из двух входных и двух выходных переменных. Алгоритм коррекции параметров режима резания для токарной обработки изделий на основе нечетко-логического вывода включает восемь этапов [17, 18].

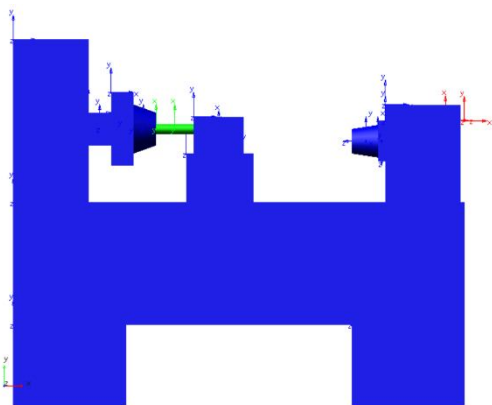


Рис. 1. Виртуальный прототип
токарного станка в Adams

Fig. 1. Virtual lathe prototype at Adams

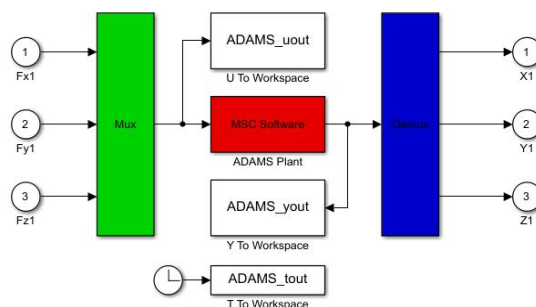


Рис. 2. Блок Adams_sub, обеспечивающий
интеграцию модели Adams с
Matlab/Simulink

Fig. 2. Adams_sub block providing integration
of the Adams model with
Matlab/Simulink

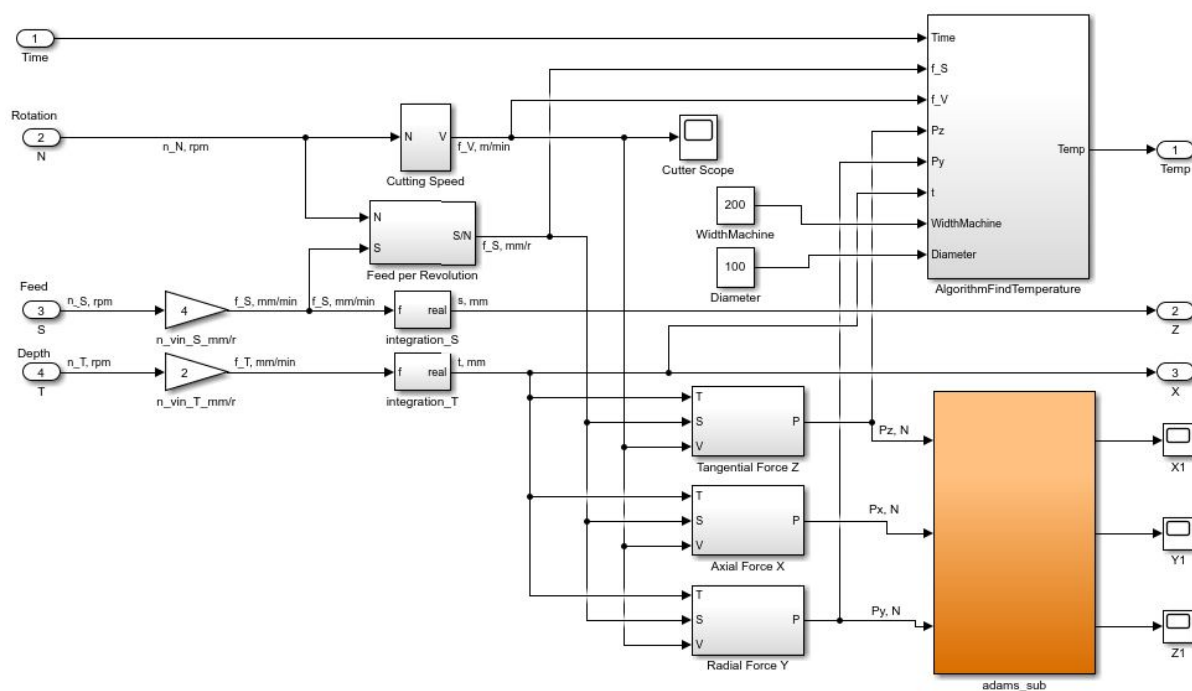


Рис. 3. Математическая модель токарного станка в Matlab Simulink с передачей данных в MSC.Adams

Fig. 3. Mathematical model of a lathe in Matlab Simulink with data transfer to MSC.Adams

1. Расчет прогнозируемых значений силы и температуры резания при токарной обработке изделия по эмпирическим формулам с учетом заданных па-

раметров станка, режущего инструмента и детали.

2. Формализация описания процесса продольного точения:

$T = \{ \langle T, \mu(T) \rangle \}, F = \{ \langle F, \mu(F) \rangle \},$
 $V = \{ \langle V, \mu(V) \rangle \}, S = \{ \langle S, \mu(S) \rangle \},$
 где $\mu(T) \rightarrow [0,1], \mu(F) \rightarrow [0,1], \mu(V) \rightarrow [0,1],$
 $\mu(S) \rightarrow [0,1]$ — степени принадлежности переменных температуры T , силы

резания F , скорости резания V и подачи S . На рис. 4 представлены функции принадлежности переменных (рис. 4).

3. Разработка базы правил знаний, основанной на пятнадцати нечётких продукционных правилах (табл. 1).

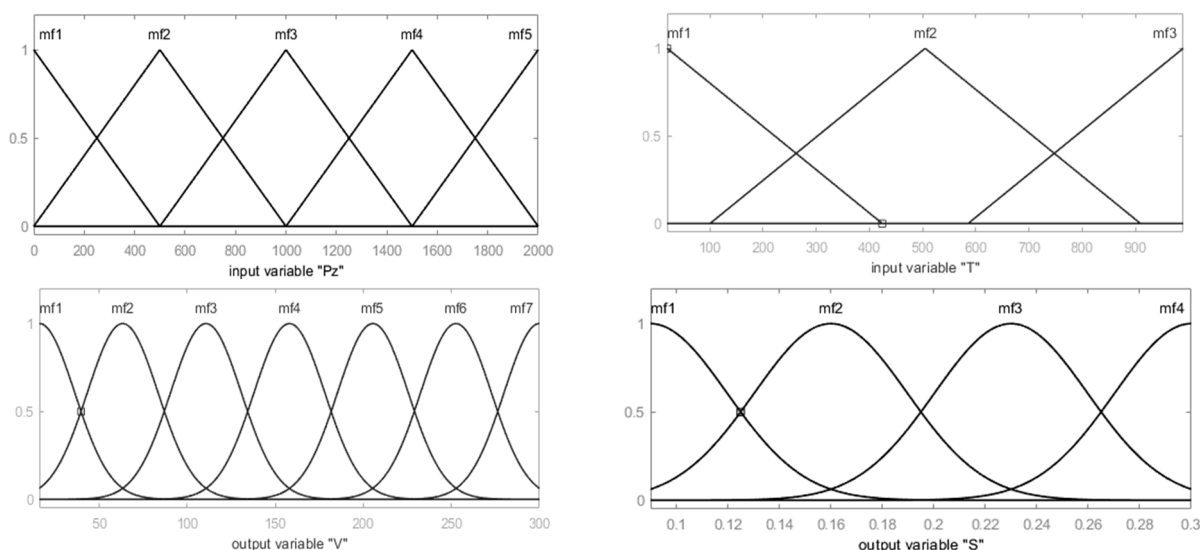


Рис. 4. Входные функции силы и температуры резания и выходные функции скорости резания и подачи

Fig. 4. Input functions for cutting force and temperature and output functions for cutting speed and feed

Таблица 1. База правил модели нечеткого логического вывода

Table 1. The rule base of the fuzzy inference model

Fuzzy rule	If		Then	Fuzzy rule	If		Then	Fuzzy rule	If		Then
1	T_1	F_1	V_7, S_1	6	T_2	F_1	V_6, S_1	11	T_3	F_1	V_7, S_1
2	T_1	F_2	V_6, S_1	7	T_2	F_2	V_5, S_2	12	T_3	F_2	V_6, S_1
3	T_1	F_3	V_6, S_2	8	T_2	F_3	V_4, S_2	13	T_3	F_3	V_2, S_4
4	T_1	F_4	V_5, S_2	9	T_2	F_4	V_3, S_3	14	T_3	F_4	V_2, S_4
5	T_1	F_5	V_4, S_2	10	T_2	F_5	V_2, S_4	15	T_3	F_5	V_1, S_4

Установка соответствия между численным значением и значением функции принадлежности переменных V и S .

$V' = \bigcup_{i=1}^n V_i, S' = \bigcup_{i=1}^m S_i$, где n, m — коли-

чество заключений нечетко логического вывода.

Для аккумуляции усеченных функций принадлежности V' и S' используется операция максимума $\alpha_i = \max(V')$, $\beta_i = \max(S')$.

Дефазификация с помощью метода центра тяжести выходных величин скорости и подачи:

$$V'' = \frac{\sum_{i=1}^n V_i' \mu(V')}{\sum_{i=1}^n \mu(V')}, \quad S'' = \frac{\sum_{i=1}^n S_i' \mu(S')}{\sum_{i=1}^n \mu(S')}.$$

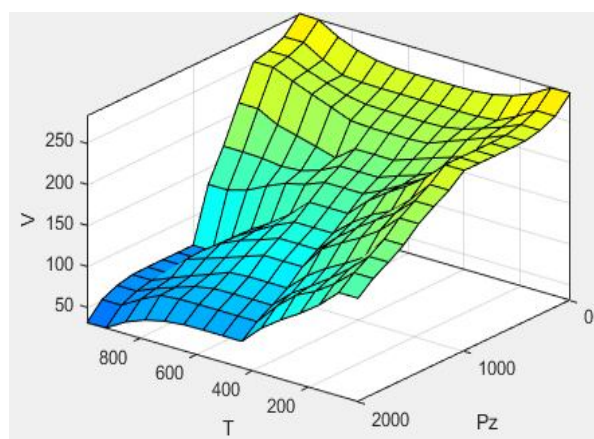
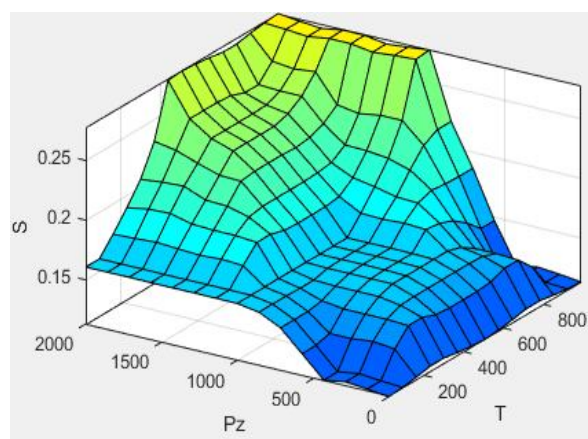


Рис. 5. Поверхности отклика выходных переменных скорости и подачи нечеткой системы управления

Fig. 5. Response surfaces of output speed and feed variables of fuzzy control system

Сравнение исходных значений выходных переменных с текущими и передача сигнала о необходимости изменения параметров резания.

На основе разработанной нечеткой математической модели были получены графики поверхностного отклика нечетких выходных переменных V и S (рис. 5).



Результаты и их обсуждение

Для демонстрации работы модели рассмотрен процесс продольного точения цилиндрической заготовки из стали 45 резцом с рабочей частью из твердого сплава T15K6 без использования СОЖ. Требуемая шероховатость обработанной поверхности $Ra=2,5$ мкм, оптимальная температура $T=950^{\circ}\text{C}$ [19], температура окружающей среды $T_{oc}=20^{\circ}\text{C}$. Используя Matlab Simulink и Adams, рассматриваемый процесс токарной обработки был смоделирован во времени от первоначального контакта между режущим инструментом и заготовкой

до тех пор, пока процесс резания не стабилизируется.

На рис. 6 и 7 приведен результат расчета вибрационных перемещений инструмента при продольном точении заготовки на основе полученной компьютерной модели нечеткого управления процессом токарной обработки. Вибрационные перемещения инструмента приводят к снижению качества обработанной поверхности (волнистость, шероховатость), а также повышению температуры резания. Из рис. видно, что в момент начала резания вибрационные колебания инструмента в направлениях X и Z резко возрастают.

Также были получены графики изменения температуры и силы резания P_z (рис. 8, 9).

Из графиков можно сделать вывод об уменьшении колебаний силы реза-

ния после возрастания и стабилизации температуры в зоне резания при продольном точении, вследствие чего обеспечивается общая стабилизация процесса обработки.

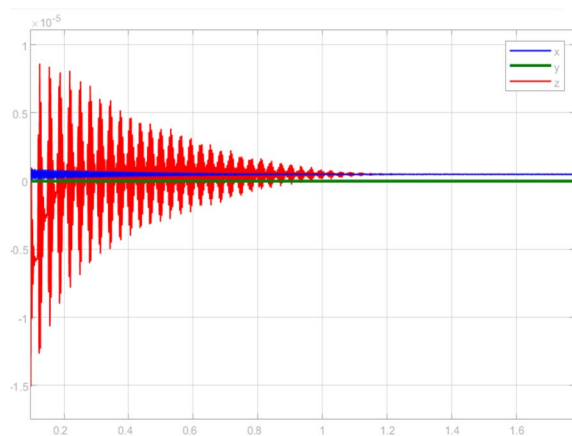


Рис. 6. Графики виброперемещений режущей кромки инструмента вдоль осей X, Y, Z при $0 < t < 2$ с

Fig. 6. Graphs of vibration displacements of the cutting edge of the tool along the X, Y, Z axes at $0 < t < 2$ s.

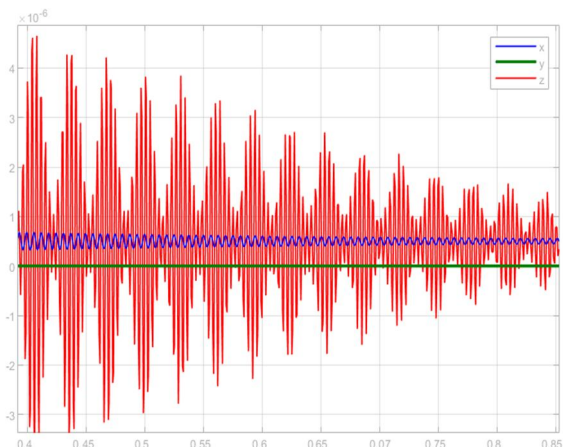


Рис. 7. Графики виброперемещений режущей кромки инструмента вдоль осей X, Y, Z при $0.4 < t < 0.85$.

Fig. 7. Graphs of vibration displacements of the cutting edge of the tool along the X, Y, Z axes at $0.4 < t < 0.85$

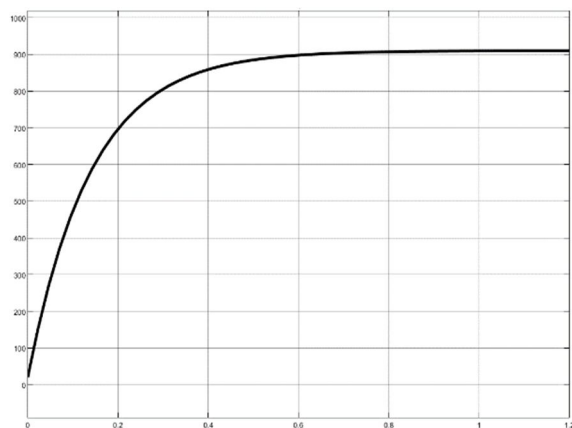


Рис. 8. График изменения температуры в зоне резания от времени

Fig. 8. Graph of temperature change in the cutting zone from time

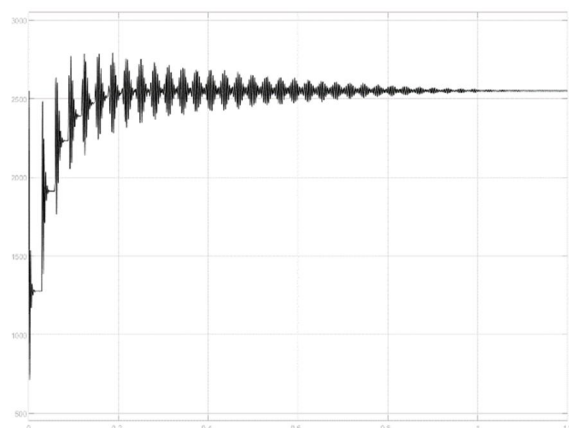


Рис. 9. Графики изменения силы резания от времени

Fig. 9. Graphs of changes in cutting force over time

Волнистость обработанной поверхности полностью определяется уровнем амплитуд автоколебания режущей кромки инструмента, а высотные параметры шероховатости в большей степени определяются интенсивностью автоколебаний. Для определения волнистости и шероховатости по амплитуде колебаний при точении используются разные методики, в данной работе использованы эмпирические зависимости [20]:

$$W_z = C_{W_z} A^{\lambda_{W_z}},$$

$$R_a = C_{R_a} \frac{S^{y_{R_a}} t^{x_{R_a}} \alpha^{n_{R_a}} A^{\lambda_{R_a}}}{V^{z_{R_a}} \gamma^{m_{R_a}}},$$

где W_z – волнистость; R_a – среднеарифметическое отклонение профиля поверхности; C_{W_z} , $A^{\lambda_{W_z}}$, C_{R_a} , $S^{y_{R_a}}$, $t^{x_{R_a}}$, $\alpha^{n_{R_a}}$, $A^{\lambda_{R_a}}$, $V^{z_{R_a}}$, $\gamma^{m_{R_a}}$ — эмпирические коэффициенты для заданных параметров обрабатываемого материала.

Полученные значения параметров $W_z = 14,34$ мкм $R_a = 1,62$ мкм, при расчете продольная шероховатость не учитывалась, так как она меньше поперечной.

Для внедрения разработанной системы управления на станках с ЧПУ необходимо установить датчики силы и температуры резания, а нечеткий закон управления скоростью резания для достижения оптимальной температуры и подачи для регулирования силы резания возможен посредством ПЛК. Таким

образом, траектория движения режущего инструмента и глубина резания будет задаваться штатной системой программного управления станка, а необходимые значения скорости резания и подачи будут определяться динамически на основе нечетких интеллектуальных алгоритмов анализа информации, получаемой от измерительной аппаратуры и характеризующей текущее состояние процесса резания.

Выводы

Интегрирование пакетов виртуального моделирования и математического анализа MSC.Adams и Matlab позволило создать полномасштабную имитационную модель с учетом нечетких алгоритмов управления. Полученная совместная модель на основе виртуального прототипа в Adams и нечеткой двусвязной системы управления токарным станком в Matlab позволяет проводить исследования без создания полномасштабной натурной модели. Из приведенных результатов моделирования видно, что нечеткий закон управления токарной обработкой обеспечивает требуемые показатели качества поверхности в соответствии с заданием. В связи с этим, предложенную совместную модель можно рекомендовать к дальнейшему исследованию для разработки систем управления продольным точением.

Список литературы

1. Кабалдин Ю.Г. Искусственный интеллект и киберфизические механообрабатывающие системы в цифровом производстве. НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2018. 271 с.
2. A Review of Indirect Tool Condition Monitoring Systems and Decision-Making Methods in Turning: Critical Analysis and Trends / M. Kuntoglu, A. Aslan, U. Ali Usca, E. Salur // *Sensors*, 2021, 21, 108. <https://dx.doi.org/10.3390/s21010108>.
3. Бобырь М.В. Интеллектуальная система управления оборудованием с ЧПУ // *Автоматизация. Современные технологии*. 2018. № 7. С. 301-306.
4. Мостовой В.Д., Бирюков В.П. Компенсация взаимосвязи контуров управления поперечной и продольной подачи на основе редуцированной модели токарной обработки // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2018. № 1 (25). С. 151-166.
5. Learning dynamics and vibrations by MSC. Adams software. URL: <https://aintelligentmanufacturing.com/wp-content/uploads/2020/10/Learning-Dynamics-and-Vibrations-by-ADAMS.pdf> (дата обращения: 11.01.2022).
6. Zakovorotny V., Lapshin V., Gvindjiliya V. Tool wear due to deformation displacements during metal turning // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2188, N 1. P. 030002.
7. Modeling of tool wear: irreversible energy transformations / V.L. Zakovorotny, V.P. Lapshin, T.S. Babenko // *Russian Engineering Research*. 2018. Vol. 38, N 9. P. 707–708.
8. Influence of the temperature in the tool-workpiece contact zone on the deformational dynamics in turning / V.P. Lapshin, I.A. Turkin, V.V. Khristoforova, T.S. Babenko // *Russian Engineering Research*. 2020. Vol. 40, iss. 3. P. 259– 265. <https://doi.org/10.3103/S1068798X20030156>.
9. Linear Regression Thermal Displacement Lathe Spindle Model / Lin C-J, Su X-Y, Hu C-H, Jian B-L, Wu L-W, Yau H-T. // *Energies*, 2020, 13, 949. <https://doi.org/10.3390/en13040949>.
10. Моделирование системы управления режимами токарной обработки с учетом изменения температуры в зоне резания / В.Г. Рубанов, И.А. Рыбин, С.А. Сильченко, А.В. Рыбина // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2020. №3/4(10). С. 50-63.
11. MSC Software Corporation. URL: <http://www.mssoftware.ru/>.
12. ControlEngineering. URL: <https://controlengrussia.com/> (дата обращения: 20.01.2022).

13. Рыбина А.В. Моделирование и анализ динамических характеристик обрабатывающего центра. URL: https://www.mscsoftware.com/sites/default/files/ru_forum_pdfs/vuz2017_19_BGTU_Rybina.pdf.
14. Лапшин В.П., Христофорова В.В., Носачев С.В. Взаимосвязь температуры и силы резания с износом и вибрациями инструмента при токарной обработке металлов // Обработка металлов. 2020. № 3. С. 44–58. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2020-22.3-44-58>.
15. Туркин И.А., Русановский Р.В., Калинин А.И. Влияние температуры на динамику процесса ортогонального резания при обработке металлов на станках токарной группы // Молодой исследователь Дона. 2020. № 2(23). С. 55–61.
16. Заковоротный В.Л., Винокурова И. А. Влияние производства тепла на динамику процесса резания // Вестник ДГТУ. 2017. № 3 (90). С. 14–26.
17. Slavica Prvulovic, Predrag Mosorinski, Dragica Radosav, Jasna Tolmac, Milica Josimovic, Vladimir Sinik Determination of the temperature in the cutting zone while processing machine plastic using fuzzy-logic controller (FLC), Ain Shams Engineering Journal, Volume 13, Issue 3. 2022. 101624. ISSN 2090-4479. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.10.019>.
18. Grinek A.V., Boychuk I.P., Dantsevich I.M. Using fuzzy models in machining control system and assessment of sustainability IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.: Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment, Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018.
19. Силин С.С. Метод подобия при резании металлов / С.С. Силин. М. : Машиностроение, 1979. 152 с.
20. Пятых А.С. Повышение производительности и качества обработки отверстий на основе оценки динамики процесса резания // Вестник ИргТУ. 2018. № 9. С. 67–81.

References

1. Kabaldin YU.G. *Iskusstvennyy intellekt i kiberfizicheskie mekhanoobrabatvayushchie sistemy v cifrovom proizvodstve* [Artificial Intelligence and Cyber-Physical Machining Systems in Digital Manufacturing]. NNSTU n.a. R.E. Alekseev, 2018, 271 p.
2. Kuntoglu M., Aslan A., Ali Usca U., Salur E. A Review of Indirect Tool Condition Monitoring Systems and Decision-Making Methods in Turning: Critical Analysis and Trends. *Sensors*, 2021, 21, 108. <https://dx.doi.org/10.3390/s21010108>.
3. Bobyr' M.V. Intellektual'naya sistema upravleniya oborudovaniem s ChPU [Intelligent control system for CNC equipment]. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii = Automation. Modern Technologies*, 2018, no. 7, pp. 301–306.
4. Mostovoi V.D., Biryukov V.P. Kompensatsiya vzaimosvyazi konturov upravleniya poperechnoi i prodol'noi podachi na osnove redutsirovannoi modeli tokarnoi obrabotki

[Compensation of the interconnection of the control circuits of transverse and longitudinal feed based on a reduced turning model]. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, Systems, Networks in Economics, Technology, Nature and Society*, 2018. no. 1 (25). pp. 151-166.

5. Learning dynamics and vibrations by MSC. Adams software URL: <https://aintelligentmanufacturing.com/wp-content/uploads/2020/10/Learning-Dynamics-and-Vibrations-by-ADAMS.pdf> (дата обращения: 11.01.2022).

6. Zakovorotny V., Lapshin V., Gvindjiliya V. Tool wear due to deformation displacements during metal turning. *AIP Conference Proceedings*. 2019, vol. 2188, no. 1. P. 030002.

7. Zakovorotny V.L., Lapshin V.P., Babenko T.S. Modeling of tool wear: irreversible energy transformations. *Russian Engineering Research*, 2018, vol. 38, no. 9, pp. 707–708.

8. Lapshin V.P., Turkin I.A., Khristoforova V.V., Babenko T.S. Influence of the temperature in the tool-workpiece contact zone on the deformational dynamics in turning. *Russian Engineering Research*. 2020, vol. 40, iss. 3, pp. 259–265. <https://doi.org/10.3103/S1068798X20030156>.

9. Lin C-J, Su X-Y, Hu C-H, Jian B-L, Wu L-W, Yau H-T. Linear Regression Thermal Displacement Lathe Spindle Model. *Energies*, 2020, 13, 949. <https://doi.org/10.3390/en13040949>.

10. Rubanov V. G., Rybin I. A., Sil'chenko S. A., Rybina A. V. Modelirovanie sistem upravleniya rezhimami tokarnoi obrabotki s uchetom izmeneniya temperatury v zone rezaniya [Modeling of control system for turning modes, taking into account temperature changes in the cutting area *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Management, Computer Engineering, Computer Science. Medical Instrumentation*, 2020, no. 3/4(10), pp. 50-63.

11. MSC Software Corporation. Available at: <http://www.mscsoftware.ru/>

12. ControlEngineering. Available at: <https://controlengrussia.com/> (accessed: 20.01.2022).

13. Rybina A.V. Modeling and analysis of dynamic characteristics of the processing center. URL: https://www.mscsoftware.com/sites/default/files/ru_forum_pdfs/vuz2017_19_BGTU_Rybina.pdf.

14. Lapshin V. P., Khristoforova V. V., Nosachev S. V. Vzaimosvyaz' temperatury i sily rezaniya s iznosom i vibratsiyami instrumenta pri tokarnoi obrabotke metallov [The relationship of temperature and cutting force with wear and tool vibrations in metal turning] // *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Processing (technology, equipment, tools)*, 2020, no. 3, pp. 44–58. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2020-22.3-44-58>.

15. Turkin I. A., Rusanovskii R. V., Kalinin A. I. Vliyanie teperatury na dinamiku protsessa ortogonal'nogo rezaniya pri obrabotke metallov na stankakh tokarnoi gruppy [The

influence of temperature on the dynamics of orthogonal cutting process during metal processing on lathes]. *Molodoi issledovatel' Dona* = *Young Researcher of the Don*, 2020, no. 2(23), pp. 55-61.

16. Zakovorotnyi V. L., Vinokurova I. A. Vliyanie proizvodstva tepla na dinamiku protsessa rezaniya [The effect of heat production on the dynamics of the cutting process]. *Vestnik DGTU* = *Bulletin of the DSTU*, 2017, no. 3 (90), pp. 14–26.

17. Slavica Prvulovic, Predrag Mosorinski, Dragica Radosav, Jasna Tolmac, Milica Josimovic, Vladimir Sinik Determination of the temperature in the cutting zone while processing machine plastic using fuzzy-logic controller (FLC), *Ain Shams Engineering Journal*, Volume 13, Issue 3. 2022. 101624. ISSN 2090- 4479. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.10.019>.

18. Grinek A. V., Boychuk I. P., Dantsevich I. M. Using fuzzy models in machining control system and assessment of sustainability IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.: Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment, Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018.

19. Silin S. S. *Metod podobiya pri rezanii metallov* [The method of similarity in metal cutting]. Moscow, Mechanical Engineering, 1979, 152 p.

20. Pyatykh A. S. Povyshenie proizvoditel'nosti i kachestva obrabotki otverstii na osnove otsenki dinamiki protsessa rezaniya [Improving the productivity and quality of hole processing based on the assessment of the dynamics of the cutting process]. *Vestnik IrGTU* = *Bulletin of IrSTU*, 2018, no. 9, pp. 67–81.

Информация об авторах / Information about the Authors

Белоусов Александр В., кандидат технических наук, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: ntk@intbel.ru

Alexander V. Belousov, Cand. Of Sci. (Engineering), Director of the Institute of Energy, Information Technologies and Control Systems, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: ntk@intbel.ru

Рыбина Анна В., аспирант, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: anna.vasilevna@mai.ru

Anna V. Rybina, Post-Graduate Student, Department of Technical Cybernetics, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: anna.vasilevna@mai.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-129-147>

Моделирование течения неньютоновских жидкостей в тороидальном канале инерционного вискозиметра с системой технического зрения

Корнаева Е. П.¹ ✉, Стебаков И. Н.¹, Корнаев А. В.¹, Дрёмин В. В.^{1,2}

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

² College of Engineering and Physical Sciences, Aston University,
Birmingham, B4 7ET, United Kingdom

✉ e-mail: lenoks_box@mail.ru

Резюме

Цель. Теоретическое обоснование геометрических, кинематических и термодинамических параметров устройства нового инерционного вискозиметра, а также разработка приближенной модели течения неньютоновских жидкостей с использованием сверточных нейронных сетей и данных лазерной спекл-контрастной визуализации.

Методы. Исследование состоит из двух частей. Первая посвящена теоретическому исследованию течения вязких жидкостей в тороидальном канале нового инерционного вискозиметра. Математическая модель течения включает безразмерные уравнения Навье-Стокса и конвективной теплопроводности, анализ которых позволил оценить условия однородности полей давлений и температур. Численное решение упрощенного уравнения Навье-Стокса получено методом контрольных объемов. Вычислительный эксперимент позволил выявить дополнительные условия работы вискозиметра. Вторая часть исследований направлена на решение задачи о предсказании значений скорости сдвиговой деформации на поверхности течения и объемного расхода. В основе приближенной модели течения лежит ансамбль сверточных нейронных сетей, обученных на данных лазерной спекл-контрастной визуализации течения жидкости в прозрачной трубке.

Результаты. Получены рекомендации о рабочих параметрах инерционного вискозиметра для исследуемых типов жидкостей в заданном диапазоне вязкости. Разработана приближенная модель в виде ансамбля глубоких нейронных сетей, позволяющая на основе изображений течения жидкости определять объемный расход и скорость сдвиговой деформации на поверхности течения.

Заключение. Полученное в результате теоретического анализа приближенное уравнение Навье-Стокса для течения вязкой жидкости в тороидальном канале может быть использовано для численного определения кинематической вязкости. Для этого необходимы характеристики течения, такие как объемный расход и скорость сдвиговой деформации на поверхности течения могут быть найдены с помощью предварительно обученной модели в виде ансамбля сверточных нейронных сетей на основе данных лазерной спекл-контрастной визуализации. В качестве испытуемой жидкости может быть любая неньютоновская жидкость, способная отражать когерентное излучение. В частности, это могут быть физиологические жидкости, в том числе кровь.

Ключевые слова: уравнение Навье-Стокса; скорость сдвиговой деформации; объемный расход; вязкость; неньютоновская жидкость; кровь; лазерная спекл-контрастная визуализация; глубокое обучение; компьютерное зрение; инерционный вискозиметр.

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

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

Для цитирования: Моделирование течения неньютоновских жидкостей в тороидальном канале инерционного вискозиметра с системой технического зрения / Е. П. Корнаева, И. Н. Стебаков, А. В. Корнаев, В. В. Дрёмин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(1): 129-147. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-26-1-129-147>.

Поступила в редакцию 18.01.2022

Подписана в печать 25.02.2022

Опубликована 31.03.2022

Non-Newtonian Fluid Flow Modeling in the Inertial Viscometer with a Computer Vision System

Elena P. Kornaeva¹ ✉, Ivan N. Stebakov¹, Alexey V. Kornaev¹, Viktor V. Dremin^{1,2}

¹ Orel State University named after I.S. Turgenev
20 Naugorskoe highway. 94, Orel 302020, Russian Federation

² College of Engineering and Physical Sciences, Aston University,
Birmingham, B4 7ET, United Kingdom

✉ e-mail: lenoks_box@mail.ru

Abstract

Purpose of research. Development of theoretical premises for the new inertial viscometer, as well as the development of an approximate model of the viscosity fluid flow using convolutional neural networks and laser speckle contrast imaging data.

Methods. The study consists of two parts. The first is devoted to a theoretical study of viscosity fluid flow in the toroidal channel of epy new inertial viscometer. The mathematical model of the flow includes the dimensionless equations of Navier-Stokes and convective heat conduction, the analysis of which made it possible to estimate the conditions for the uniformity of pressure and temperature fields. The numerical solution of the simplified Navier-Stokes equation was obtained by the control volume method. The computational experiment made it possible to identify additional operating conditions for the viscometer. The second part of the research is aimed at solving the problem of predicting the values of the shear strain rate on the tour surface and the flow rate. The approximate flow model is based on an ensemble of convolutional neural networks trained on data from laser speckle-contrast visualization of a fluid flow in a transparent tube.

Results. The recommendations on the operating parameters of the inertial viscometer for the studied types of liquids in a given viscosity range are obtained. An approximate model has been developed in the form of an ensemble of deep neural networks, which makes it possible to determine the volumetric flow rate and the shear strain rate on the flow surface based on fluid flow images.

Conclusion. The approximate Navier-Stokes equation obtained as a result of theoretical analysis for the flow of a viscous fluid in a toroidal channel can be used to numerical determination the kinematic viscosity. So, the necessary flow characteristics, such as volumetric flow rate and shear strain rate on the flow surface, can be found using the developed and pretrained convolutional neural network based on laser speck contrast imaging data. The test fluid can be any non-Newtonian fluid capable of reflecting coherent radiation. In particular, it can be physiological fluids, including blood.

Keywords: Navier-Stokes equation; shear rate; flow rate; viscosity; non-Newtonian fluid; blood; laser speckle contrast imaging; deep learning; computer vision; inertial viscometer.

Funding: This work was supported by the Russian Science Foundation under the Project 20-79-00332.

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

For citation: Kornaeva E. P., Stebakov I. N., Kornaeve A. V., Dremine V. V. Non-Newtonian Fluid Flow Modeling in the Inertial Viscometer with a Computer Vision System. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(1): 129-147 (In Russ.). [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2022-26-1-129-147](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-129-147).

Received 18.01.2022

Accepted 25.02.2022

Published 31.03.2022

Введение

Измерение вязкости физиологических жидкостей представляет интерес с точки зрения диагностики ряда заболеваний. В частности изменение вязкости крови ассоциировано с сердечно-сосудистыми патологиями, диабетом, инфекционными заболеваниями [1-4], анемиями, а также лейкозами различного типа [5]. Цельная кровь представляет собой псевдопластичную жидкость, разжижающуюся при сдвиге, что означает, что увеличение скорости сдвиговой деформации вызывает снижение вязкости [6]. Многие справочники по сердечно-сосудистым заболеваниям считают нормальными значения вязкости крови от 3,5 до 5,5 мПа·с. Однако вязкость крови нельзя обобщить одним значением. Благодаря свойству крови разжижаться при сдвиге, которое зависит от реологических свойств эритроцитов, вязкость этой жидкости изменяется в зависимости от гемодинамических условий [7]. Та же самая кровь может иметь значение вязкости 60 мПа·с при скорости сдвига $0,1\text{с}^{-1}$, тогда как при скорости сдвига 200с^{-1} вязкость будет составлять 5 или 6 мПа·с [8].

Изменение вязкости крови проводят на вискозиметрах в различном диапазоне скоростей сдвиговых деформаций. Большинство популярных вискозиметров являются капиллярными или ротационными. Теоретической базой для них являются соответственно течения Пуазейля [6, 9] и Куэтта [9]. Другие типы, в том числе вискозиметры с диафрагмой, вискозиметры с падающим шариком, вибрационные вискозиметры и ультразвуковые вискозиметры [10] – просты в применении, но имеют ряд существенных допущений в теории и методах, поэтому их применение к среде со сложной реологией затруднительно.

Что касается измерения вязкости крови, то чаще всего используют капиллярные или ротационные вискозиметры, а также вискозиметры с падающим в испытуемой жидкости телом. Так например, в работе [11] для измерения вязкости крови использовался ротационный вискозиметр Brookfield DV-III с адаптером типа Ultra LV для низких диапазонов динамической вязкости от 1..10 мПа·с [12]. Объем испытуемой жидкости для этого адаптера составляет

около 16 мл [12], что является существенным недостатком. Для капиллярных вискозиметров и вискозиметров с падающим шариком требуется меньший объем жидкости, однако их существенным недостатком является отсутствие возможности регулирования скорости сдвиговой деформации в процессе измерений. Для вискозиметров такого типа разную скорость сдвиговой деформации можно задавать только меняя диаметр трубки как для капиллярных или диаметр трубки и угол наклона капилляра как для вискозиметров с падающим телом, например шариком, цилиндром или иглой [13-16].

Таким образом, к общим недостаткам существующих методик измерения вязкости неньютоновских жидкостей можно отнести проблему задания разных скоростей сдвиговых деформаций (капиллярные вискозиметры и вискозиметры с падающим в потоке теле), либо невозможность фиксировать заданное давление (капиллярные, ротационные вискозиметры и вискозиметры с падающим в потоке теле), большой объем испытуемой жидкости (для ротационных).

Ранее авторами была разработана методика измерения динамического коэффициента вязкости на инерционном вискозиметре [17]. Динамическая вязкость определялась из обобщенного закона Ньютона как коэффициент пропорциональности между девиаторами тензоров напряжений и скоростей де-

формаций [18]. Для этого экспериментально определялся момент силы трения и вычислялось касательное напряжение на поверхности течения. Для определения скорости деформации использовалось предположение о квадратичном профиле скорости в канале. К недостаткам методики можно отнести относительно большие размеры установки и достаточно грубое предположение о профиле скорости. В данной работе авторам удалось уменьшить характерные размеры гидродинамической части вискозиметра, при этом переопределив условия сохранения однородности полей давления и температур. В результате объем испытуемой жидкости составляет около 1,87 мл. Так же удалось избавиться от допущений о профиле скорости течения внутри канала. Последнее достигнуто дополнением установки системой технического зрения, фиксирующей изображения течения жидкости в заданные моменты времени и предсказывающая по ним значения скорости сдвиговой деформации на поверхности течения и объемный расход. Система технического зрения состоит из источника когерентного излучения, КМОП-камеры, а также мини-компьютера Jetson Nano с ядрами CUDA, который позволяет обрабатывать изображения с камеры непосредственно на устройстве. Использование методов регистрации динамического рассеяния света для анализа параметров

кровотока часто применяется в различных областях медицины и позволяют производить исследования в режиме «in vivo» [19-21]. В частности, метод лазерной спекл-контрастной визуализации (ЛСКВ) позволяет в режиме реального времени получать визуализацию микроциркуляции в тканях [22]. В работе [23] показано, что значение спекл-контрастов коррелирует со средней скоростью потока жидкости в капилляре.

В основу разрабатываемой методики заложена гипотеза о том, что по данным ЛСКВ можно определить кинематические характеристики течения. Тогда, зная кинематику движения, можно вычислить кинематическую вязкость из уравнения Навье-Стокса.

Основной целью работы является теоретическое обоснование геометрических, кинематических и термодинамических параметров устройства нового инерционного вискозиметра, а также разработка приближенной модели течения вязких жидкостей с использованием сверточных нейронных сетей (СНС) и данных ЛСКВ.

Материалы и методы

Концептуальная и математическая модель течения жидкости в тороидальном канале

Рассматривается нестационарное течение вязкой жидкости в тороидальном канале (рис.1). Характерные разме-

ры канала: r - радиус канала и расстоянием от центра оси симметрии тора до центра канала R . Основными уравнениями, описывающими этот процесс, являются уравнение Навье-Стокса, неразрывности и уравнение конвективной теплопроводности [18]. Эти уравнения удобнее записать в тороидальной системе координат (рис. 1) с коэффициентами Лямэ [24]: $H_1=1$, $H_2=\beta_1 \cos \beta_3 + R$, $H_3 = \beta_1$.

Переход к криволинейной системе координат позволяет значительно упростить модель, во-первых, поле скоростей будет иметь одну ненулевую компоненту $\mathbf{V} = [0 \quad v_2 \quad 0]$, во-вторых, упростится форма записи граничных условий. А уравнение неразрывности примет тривиальный вид: $\partial v_2 / \partial \beta_2 = 0$. Из последнего следует, что v_2 не зависит от координаты β_2 , т.е. $v_2 = v(\beta_1, \beta_3)$.

Так как среда закачена в тор под некоторым постоянным давлением p_0 , тогда в силу симметрии области течения давление является функцией двух координат $p(\beta_1, \beta_3)$.

Для определения условий однородности полей давления и температур, уравнения математической модели представлены в безразмерном виде.

Обезразмеривающие величины выбирались так, чтобы безразмерные координаты и функции изменялись в диапазоне $[0,1]$. Способ обезразмеривания представлен в табл. 1.

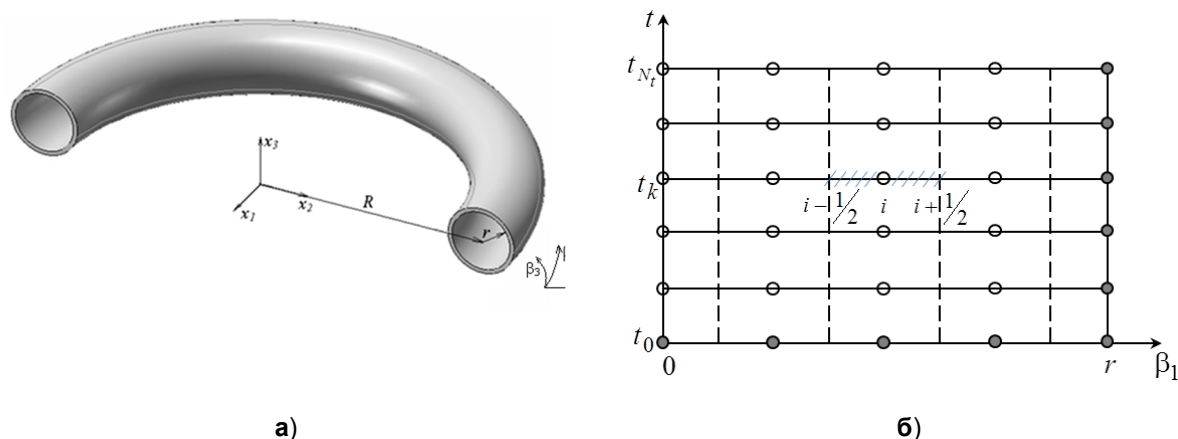


Рис. 1. Область течения (а); дискретизация расчетной области (б)

Fig. 1. Flow in the channel (а); mesh grid of rate area (б)

Таблица 1. Способ обезразмеривания

Table 1. Dimensionless method

Безразмерная величина / Dimensionless feature	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$	$\hat{H}_2$	$\hat{H}_3$	$\hat{v}$	$\hat{p}$	$\hat{t}$	$\hat{T}$
Способ обезразмеривания / Dimensionless method	$\frac{\beta_1}{r}$	$\frac{\beta_2}{2\pi}$	$\frac{\beta_3}{2\pi}$	$\frac{H_2 - (R-r)}{2r}$	$\frac{H_3}{r}$	$\frac{v}{V_0}$	$\frac{p}{p_0}$	$\frac{t}{t_0}$	$\frac{T-T_0}{\Delta T}$

С учетом принятых допущений, безразмерный тензор $\hat{T}_{\xi}$ скоростей деформации содержит четыре ненулевых компоненты:

$$\hat{\xi}_{12} = \hat{\xi}_{21} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \hat{v}}{\partial \hat{\beta}_1} - \frac{\hat{v}}{\hat{H}_2 + \gamma} \frac{\partial \hat{H}_2}{\partial \hat{\beta}_1} \right),$$

$$\hat{\xi}_{23} = \hat{\xi}_{32} = \frac{\psi}{2} \left(\frac{1}{\hat{H}_3} \frac{\partial \hat{v}}{\partial \hat{\beta}_3} - \frac{\hat{v}}{\hat{H}_3(\hat{H}_2 + \gamma)} \frac{\partial \hat{H}_2}{\partial \hat{\beta}_3} \right),$$

где $\xi^* = \frac{V_0}{r}$ – обезразмеривающая скорость деформации;

$\gamma = \frac{R-r}{2r}$ – безразмерный геометрический параметр;

$\psi = \frac{1}{2\pi}$ – безразмерный геометрический параметр.

Тогда компоненты дивергента тензора напряжений согласно обобщенному закону Ньютона [18] имеют вид:

$$\hat{s}_{12} = \hat{s}_{21} = \hat{\mu} \left(\frac{\partial \hat{v}}{\partial \hat{\beta}_1} - \frac{\hat{v}}{\hat{H}_2 + \gamma} \frac{\partial \hat{H}_2}{\partial \hat{\beta}_1} \right),$$

$$\hat{s}_{23} = \hat{s}_{32} = \psi \hat{\mu} \left(\frac{1}{\hat{H}_3} \frac{\partial \hat{v}}{\partial \hat{\beta}_3} - \frac{\hat{v}}{\hat{H}_3(\hat{H}_2 + \gamma)} \frac{\partial \hat{H}_2}{\partial \hat{\beta}_3} \right). \quad (1)$$

С учетом введенных допущений уравнения Навье-Стокса и уравнения теплового баланса в безразмерных переменных можно представить в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \widetilde{Eu} \frac{\partial \hat{P}}{\partial \hat{\beta}_1} = \frac{1}{\hat{H}_2 + \gamma} \frac{\partial \hat{H}_2}{\partial \hat{\beta}_1} \hat{v}^2, \\ \&Sh Re \frac{\partial \hat{v}}{\partial \hat{t}} = \frac{1}{\hat{H}_3 (\hat{H}_2 + \gamma)^2} \left(\frac{\partial}{\partial \hat{\beta}_1} (\hat{H}_3 (\hat{H}_2 + \gamma)^2 \hat{s}_{12}) + \psi \frac{\partial}{\partial \hat{\beta}_3} ((\hat{H}_2 + \gamma)^2 \hat{s}_{23}) \right), \\ \widetilde{Eu} \frac{\partial \hat{P}}{\partial \hat{\beta}_3} = \frac{1}{\hat{H}_2 + \gamma} \frac{\partial \hat{H}_2}{\partial \hat{\beta}_3} \hat{v}^2, \\ \&Sh Re \frac{\partial \hat{T}}{\partial \hat{t}} = \frac{1}{Pr} \frac{1}{\hat{H}_3 (\hat{H}_2 + \gamma)} \left(\frac{\partial}{\partial \hat{\beta}_1} \left(\hat{H}_3 (\hat{H}_2 + \gamma) \frac{\partial \hat{T}}{\partial \hat{\beta}_1} \right) + \psi^2 \frac{\partial}{\partial \hat{\beta}_3} \left(\frac{(\hat{H}_2 + \gamma)}{\hat{H}_3} \frac{\partial \hat{T}}{\partial \hat{\beta}_3} \right) \right) + \\ + 2Ec\hat{u} \left(\hat{\xi}_{12}^2 + \hat{\xi}_{23}^2 \right), \end{array} \right. \quad (2)$$

где $\widetilde{Eu} = \frac{P_0}{\rho V_0^2}$ – аналог критерия Эйлера

(далее критерий Эйлера);

$Sh = \frac{r}{t_0 V_0}$ – критерий Струхала;

$Re = \frac{V_0 r}{\eta_0}$ – критерий Рейнольдса;

$Pr = \frac{\mu_0 C_p}{\lambda}$ – критерий Прандтля;

$Ec = \frac{V_0^2}{C_p \Delta T}$ – критерий Эккерта;

$\gamma = \frac{R-r}{2r}$ – геометрический критерий;

$V_0 = \omega R$ – характерная скорость (максимальная) течения жидкости;

t_0 – время инерционного течения жидкости до остановки;

ΔT – изменение температуры жидкости;

η_0 – характерная кинематическая вязкость;

ρ – плотность исследуемой жидкости.

Анализ математической модели и выбор рекомендаций

По первому и третьему уравнению системы (2) можно определить условие однородности поля давлений. Правые части этих уравнений являются пренебрежимо малыми по сравнению с компонентами градиента давления (в левой части уравнений) при условии:

$$\widetilde{Eu} \gg \gamma^{-1}. \quad (3)$$

Условие (3) определяет соотношение аналога критерия Эйлера $\widetilde{Eu}$ с геометрическим параметром γ . Значение геометрического параметра должно удовлетворять условию $\gamma \gg 10^0$. Из (3) можно определить условия для характерной скорости течения V_0 при фиксированных значениях геометрического параметра, характерного давления и плотности жидкости.

Первое слагаемое в правой части четвертого уравнения системы (2) отвечает за перенос тепла от слоя к слою жидкости. Порядок этого слагаемого зависит от критерия Прандтля Pr . Второе слагаемое в правой части четвертого уравнения системы (2) характеризует перенос тепла за счет вынужденной конвекции. Порядок этого слагаемого зависит от критерия Эккерта Ec . Порядок величины левой части четвертого уравнения зависит от критерия Струхала Sh и Рейнольдса Re . Таким образом, добиться однородности температурного поля в канале можно накладыванием условия на эти критерии:

$$ShRe \gg \max(Pr^{-1}, Ec). \quad (4)$$

Выражение (4) определяет условия, при которых слагаемые в правой части четвертого уравнения (2) являются пренебрежимо малыми по сравнению с левой частью уравнения.

Порядок величины числа Рейнольдса определяется из условия (3) при фиксированном значении радиуса тора r и характерной вязкости η_0 . Критерий Прандтля Pr определяется свойствами среды, так, например, для крови изменяется в диапазоне 2.72..3.55 [25]. Число Эккерта Ec зависит от характерной скорости, определяемой по условию (3), а также от величины ΔT , поэтому при оценке его порядка учитывалось условие незначительного перепада температур $[10^{-1}; 10^0]$. Из условия (4) определяется порядок величины характерного

времени t_0 инерционного движения жидкости в рассматриваемом канале.

Таким образом, можно определить условия однородности полей давлений и температур из условий (3), (4). Можно определить значения скорости движения тора до остановки (3) и времени течения жидкости после остановки тора (4), в течение которого необходимо проводить измерения. При этом остальные параметры фиксируются заранее.

Анализируя слагаемые второго уравнения системы (2) с учетом выполнения условий (3), (4), получится упрощенное уравнение в виде:

$$Sh Re \hat{\beta}_1 \frac{\partial \hat{v}}{\partial \hat{t}} = \frac{\partial}{\partial \hat{\beta}_1} \left(\hat{\mu} \hat{\beta}_1 \frac{\partial \hat{v}}{\partial \hat{\beta}_1} \right).$$

Полученное приближенное уравнение Навье-Стокса для течения вязкой жидкости в тороидальном канале может быть использовано в классической постановке для расчета полей скоростей при заданной вязкости, что выполнено в следующем подразделе для получения дополнительной информации относительно характеристик течения. Другой вариант заключается в том что, зная поле скоростей можно вычислить значение вязкости, такой прием лежит в основе известного метода вискозиметрии, реализованного в капиллярных вискозиметрах.

Численное решение уравнения движения для неньютоновской жидкости

Уравнение (5) связывает поле скоростей и поле вязкости. Решая это уравнение относительно функции ско-

рости, можно определить время остановки движения испытуемой жидкости в торе. Таким образом, проведя вычислительный эксперимент можно проверить правильность предположений относительно времени остановки течения при различных начальных скоростях.

Для определения поля скоростей уравнение (5) удобнее представить в размерном виде:

$$\beta_1 \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \beta_1} \left(\eta \beta_1 \frac{\partial v}{\partial \beta_1} \right), \quad (5)$$

где $v=v(\beta_1)$ – осевая компонента скорости;

η – коэффициент кинематической вязкости.

Для рассматриваемого процесса течения в соответствии с концептуальной моделью начальные и граничные условия будут иметь вид:

$$v(0, \beta_1) = V_0, \quad v(t, r) = v_t(t), \quad \partial v(t, 0) / \partial \beta_1 = 0.$$

Вязкость крови является функцией от скорости сдвиговой деформации. В работе [15] представлены результаты измерений динамической вязкости от скорости сдвига. Эти значения можно аппроксимировать, используя модель Освальда:

$$\mu(\xi) = \theta_0 \xi^{\theta_1 - 1}, \quad (6)$$

где θ_0, θ_1 – параметры модели, определяемые в ходе реологических испытаний жидкостей; $\theta_1 < 1$ для псевдопластичных жидкостей, в частности, крови.

Значение плотности не зависит от скорости сдвига, поэтому при фиксированной температуре испытаний она постоянна. С учетом вышесказанного можно определить функцию кинемати-

ческой вязкости от скорости сдвиговой деформации.

Для решения уравнения (5) удобно воспользоваться методом контрольных объемов (МКО), который позволяет использовать небольшое количество расчетных точек, в отличие от других сеточных методов. Дискретизация расчетной области представлена на рис. 1 (б).

Уравнение (5) было проинтегрировано по каждому КО $[\beta_{1_{i-1/2}}, \beta_{1_{i+1/2}}]$, компонента градиента скорости $\frac{\partial v}{\partial \beta_1}$ в правой части уравнения в точках $\beta_{1_{i-1/2}}$ и $\beta_{1_{i+1/2}}$ заменена на соответствующие центральные разности. К левой части уравнения при интегрировании использовалась теорема о среднем, а частная производная по времени заменена правой конечной разностью. В результате получена система линейных алгебраических уравнений для скорости в каждой расчетной точке по координате и времени:

$$\begin{aligned} a_i^k v_{i+1}^{k+1} + b_i^k v_i^{k+1} + c_i^k v_{i-1}^{k+1} &= -d_i v_i^{k-1}, \\ i &= \overline{1, N_r - 1}, \quad k = \overline{1, N_t} \\ v_i^0 &= V_0, \quad v_{N_r}^k = v_t(t), \quad v_0^k = v_1^k, \end{aligned} \quad (7)$$

где $a_i^k = \left(\frac{\beta_{1_i}}{\Delta \beta_1} + \frac{1}{2} \right) \eta(\xi_{i+1/2}^k)$;

$$c_i^k = \left(\frac{\beta_{1_i}}{\Delta \beta_1} - \frac{1}{2} \right) \eta(\xi_{i-1/2}^k); \quad d_i = \frac{\beta_{1_i} \Delta \beta_1}{\Delta t};$$

$b_i^k = -a_i^k - c_i^k - d_i$; $\eta(\xi_{i \pm 1/2}^k)$ – значение функции кинематической вязкости от скорости сдвига на предыдущем шаге по

$$\text{времени, } \xi_{i+1/2}^k = \frac{v_{i+1}^k - v_i^k}{2 \Delta \beta_1}, \quad \xi_{i-1/2}^k = \frac{v_i^k - v_{i-1}^k}{2 \Delta \beta_1}.$$

Подготовка датасета и архитектура нейронной сети для аппроксимации кинематических характеристик течения на основе данных ЛСКВ

В качестве модели аппроксимации скорости сдвиговой деформации и расхода использовалась архитектура СНС

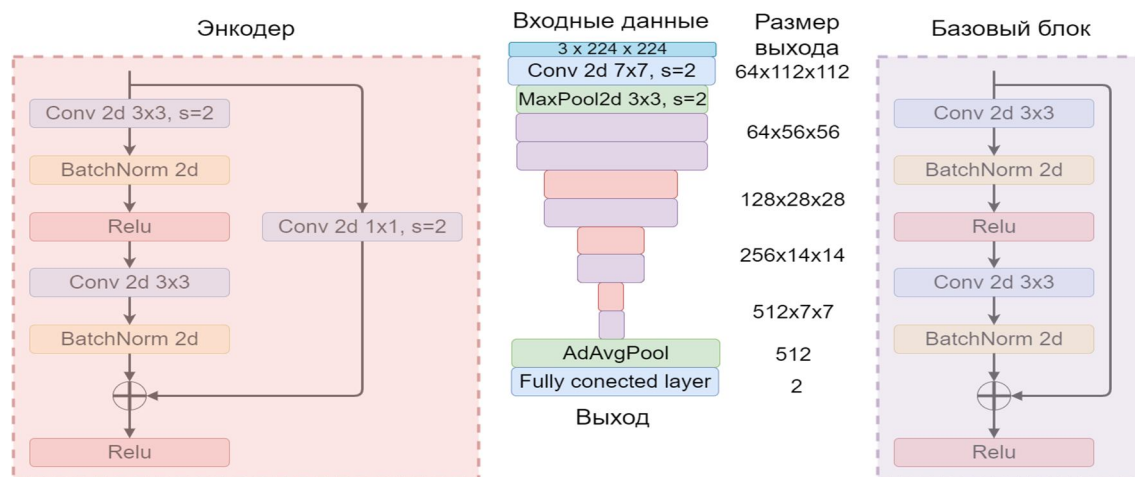


Рис. 2. Архитектура ResNet18

Fig. 2. The architecture of ResNet18

Для обучения СНС размеченная выборка получена на основе двух экспериментов. Первый направлен на получение эталонных данных для модельной жидкости в виде совокупности значений скорости сдвиговой деформации и динамической вязкости. Результаты получены на вискозиметре Brookfield DV-II+Pro с UL шпинделем типа цилиндр-цилиндр. Второй эксперимент направлен на получение данных для обучения и тестирования ИНС в виде совокупности изображений течения жидкости в трубке (рис.3 (а)) и значений скорости сдвиговой деформации на поверхности канала и объемного расхода. Эксперимент проводился в тех же диапазонах скоростей сдвига, что и испытания на вискозиметре Brookfield DV-II+Pro. Необ-

ходимые значения скорости сдвига определяются по объемному расходу. Для прямолинейного течения в цилиндрическом канале распределение поля скоростей определяется аналитически (известное течение Пуазейля [6]):

$$V(r) = -\frac{\Delta P}{4\mu L} (r^2 - r^2),$$

где ΔP – осевой перепад давления;

μ – динамическая вязкость;

L – длина канала;

r – радиус канала.

Интегрируя это уравнение по площади радиального сечения канала можно получить расход. Скорость сдвига определяется по формуле Стокса [18] через поле скоростей. Таким образом, для разметки выборки используется аналитическое решение, определяющее

для жидкости известной вязкости объемный расход и скорость сдвиговой деформации. Достижение тех же условий по скоростям сдвига, что и в первом эксперименте, обеспечивается заданием объемного расхода:

$$Q = \frac{\pi r^3}{2} |\dot{\xi}_r|,$$

где r – радиус трубки;

$|\dot{\xi}_r|$ – скорость сдвига у поверхности трубки.

Полученная выборка была разделена на три части: для обучения, валидации и тестирования. Результаты обучения представлены в следующем разделе.

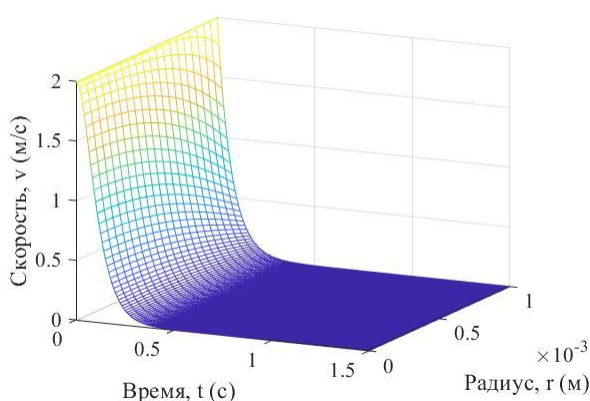
Результаты и их обсуждение

Численное решение уравнения движения для неньютоновской жидкости

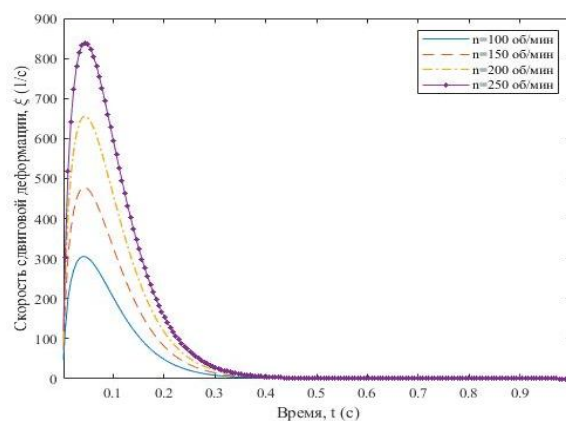
Вычислительный эксперимент на модели (7) проводился при различных значениях максимальной частоты вращения тора. Характерные размеры тора $R=0.095$ м и $r=0.001$ м. Давление в жидкости составляет 0.1 МПа. Значения

максимальной частоты вращения тора получены из условия (3) и соответствуют диапазону $n=50..250$ об/мин. Численное решение получено для крови, которая представляет псевдопластичную жидкость. Кинематическая вязкость $\eta(\xi)$ определяется через постоянную плотность крови при заданной температуре и динамическую вязкость (6) с коэффициентами $\theta_0=12.7e-3$, $\theta_1=0.857$;

На рис. 3 (а) представлен профиль скорости для начальной частоты вращения тора 200 об/мин. На рис. 3 (б) представлены численные решения уравнения (7) в виде графиков зависимости сдвиговой скорости деформации от времени течения крови в канале при различной максимальной частоте вращения тора. С учетом того, что вязкость крови чаще всего измеряют в диапазоне скоростей сдвиговых деформаций от 50 до 600 1/с [11, 15], начальную частоту вращения тора достаточно выбирать из диапазона 100..250 об/мин, что видно из графика на рис. 3 (б).



а)



б)

Рис. 3. Тестирование модели инерционного течения крови в торе: функция скорости от времени и радиальной координаты (а), скорость сдвиговой деформации от времени (б)

Fig. 3. Testing the model of inertial flow in the torus: velocity contour plot of time and radial coordinate (а); shear strain rate versus time (б)

Так же из графиков на рис. 3 (б) видно, что в заданном диапазоне частот вращения тора время течения жидкости (после торможения тора) не зависит от скорости его разгона. При заданных геометрических, статических и термомеханических величинах время течения жидкости составляет около пол секунды. Полученный результат полностью соответствует выводам о времени течения t_0 , полученному из условия (4). Поэтому выбор диапазона частот вращения тора до торможения стоит выбирать только исходя из безразмерных критериев подобия (3).

Подготовка данных и обучение глубокой нейронной сети на основе эксперимента на модельной жидкости

В качестве модельной жидкости выбран раствор интралипида 20% (SMOFlipid, производство Австрия)

разведенный глицерином. Концентрация интралипида 20% в глицерине составила 20%. На рис. 4 представлен результат измерения динамической вязкости для 20 % раствора интралипида 20 % от скорости сдвиговой деформации для пяти параллельных опытов. По представленным результатам измерений видно, что модельная жидкость проявляет псевдопластичные свойства. Проявление этих свойств обусловлено интралипидом в составе раствора, т.к. известно, что глицерин является ньютоновской жидкостью.

Для получения обучающей выборки проводились измерения вязкости для модельной жидкости при различных скоростях сдвига при фиксированной температуре. Измерения проводились на вискозиметре Brookfield DV-II+Pro с UL шпинделем типа цилиндр-цилиндр, используемым для маловязких жидкостей.

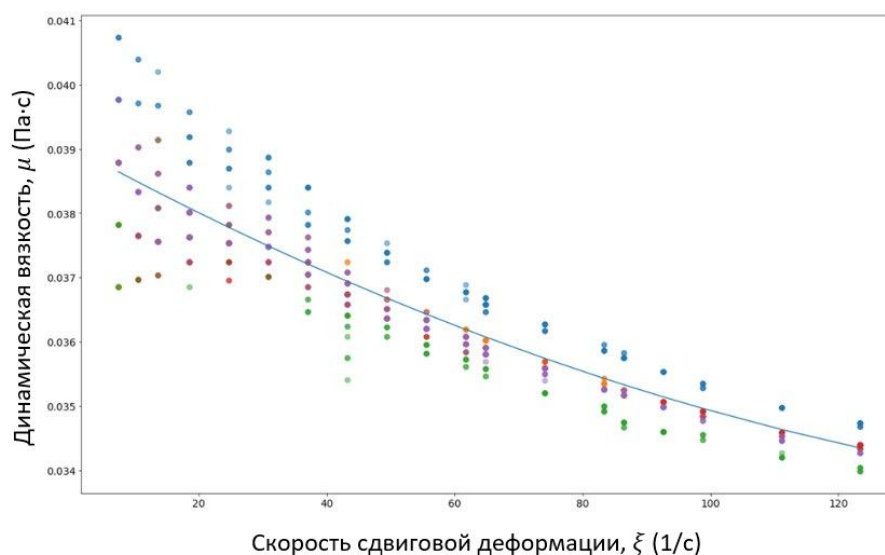


Рис. 4. Зависимость динамической вязкости от скорости сдвиговой деформации для 20 % раствора интралипида 20%

Fig. 4. Relationship between shear rate and dynamic viscosity for 20 % concentration intralipid

Для получения размеченных данных обучающей выборки для жидкости заданной концентрацией с известной вязкостью был проведен дополнительный эксперимент. Исследуемая жидкость прокачивалась через прозрачную трубку диаметра 2 мм с объемным расходом, обеспечивающим заданные значения скорости сдвиговой деформации на поверхности течения. КМОП-камерой с частотой 240 кадров/с фиксировались изображения течения испытуемой жидкости. Таким образом, была получена размеченная выборка в виде совокупности изображений течения и соответствующих скоростей сдвиговых деформаций и объемного расхода. Изображения были предварительно обрабо-

таны с помощью метода лазерной спекл-контрастной визуализации. Величина пространственного спекл-контраста рассчитывается как:

$$K = \frac{\sigma_n}{\langle I_n \rangle}, \quad (8)$$

где n – размер области расчета;

σ_n – стандартное отклонение интенсивности;

$\langle I_n \rangle$ – средняя интенсивность.

На рис. 5 (а) представлены изображения пространственного спекл-контраста для различных значений расхода и скорости деформации. На рис. 5 (б), (в) представлены диаграммы распределения пространственного спекл-контраста при разных значениях скорости сдвиговой деформации и объемного расхода.

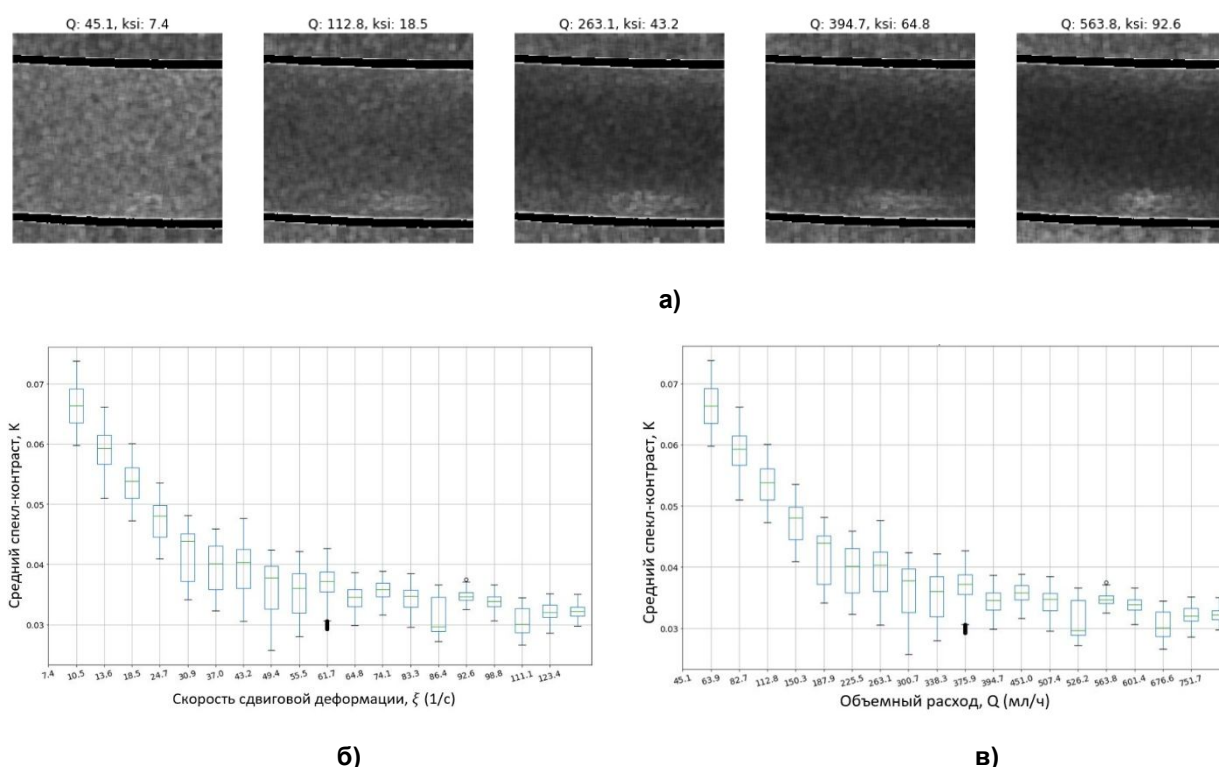


Рис. 5. Изменение пространственного спекл-контраста (а) диаграммы распределения спекл-контраста: при разной скорости сдвиговой деформации (б), разного объемного расхода (в)

Fig. 5. Speckle contrast values (а), speckle contrast distributions: of shear rate (б), flow rate (в)

Корреляционная зависимость значений спекл-контрастов и кинематических характеристик течения обеспечивает возможность построения аппроксиматоров в виде сверточных нейронных сетей для прогноза скорости сдвиговой деформации и объемного расхода.

Для обучения СНС (рис.2) в качестве функции ошибки использовалась средняя квадратическая ошибка модели (MSE). Значения расхода и скорости сдвиговой деформации для обучения были нормированы. Для оценки точности модели использовался коэффициент детерминации R^2 . Для повышения точности построен ансамбль моделей в виде СНС (рис. 2) на 4 фолдах. Причем за основу бралась предобученная СНС из

ранней работы авторов [23], предсказывающая объемный расход. На рис. 6 представлены результаты обучения модели в виде сравнения эталонных и предсказанных значений отклика.

Количественные оценки точности прогноза ансамбля моделей, рассчитанные через метрику R^2 , для обучения и тестирования (рис. 2) представлены в табл. 2.

Коэффициент детерминации на тестовой выборке составляет не менее 96 % для обеих функций (расхода и скорости сдвиговой деформации). Обучение проводилось на исходных изображениях без предварительной обработки и на изображениях спекл-контрастов, рассчитанных по ф. (8).

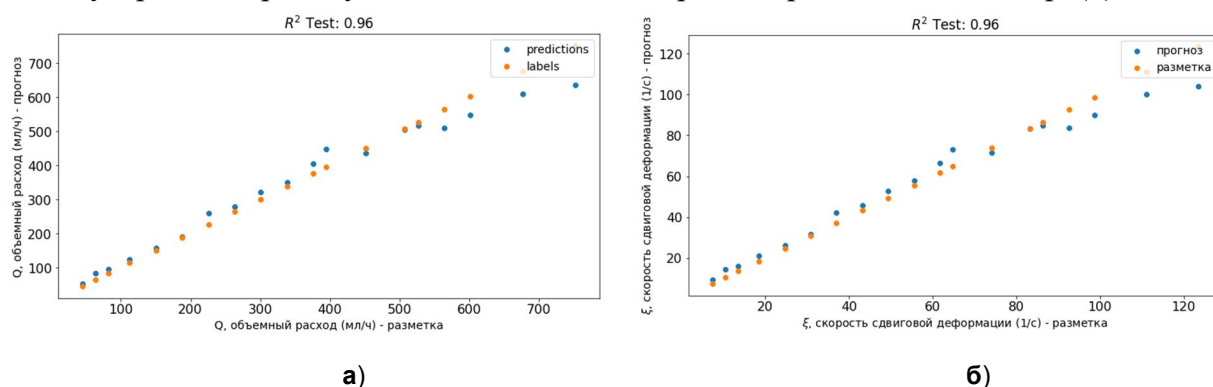


Рис. 6. Сравнение предсказанных и эталонных значений

Fig. 6. Comparison between true and predicted values

Таблица 2. Значения метрик качества

Table 2. Metric values

	Функция ошибки, MSE / Loss function, MSE	Коэффициент детерминации для расхода, R^2 / Determination coefficient for flow rate, R^2	Коэффициент детерминации для скорости сдвига, R^2 / Determination coefficient for share rate, R^2
Обучение / Train	0.0426	0.981	0.980
Тестирование / Test	0.0601	0.964	0.963

Получено, что точность модели, обученной на спекл-контрастных изображениях существенно выше точности модели, обученной на исходных изображениях. Стоит отметить, что полученная модель обучалась только на данных фиксированной концентрации, в связи с чем планируется провести эксперимент для различных концентраций раствора интралипида. Это позволит расширить диапазон значений скорости сдвиговой деформации и увеличить размер выборки.

Выводы

В результате проведенных исследований получены две основные приближенные модели, которые могут быть использованы для обработки результатов эксперимента по измерению вязкости жидкостей на новом инерционном вискозиметре.

Дальнейшая работа направлена на проведение экспериментальных исследований непосредственно на новом вискозиметре. Подразумевается, что испытуемая жидкость закачивается в прозрачную трубку формы тор под некоторым давлением. Тор вращается с

заданной частотой, затем резко тормозится. После чего в канале происходит инерционное течение жидкости. КМОП-камера фиксирует изображения течения жидкости с заданным шагом за время испытания (примерно пол секунды) с частотой 240 кадров/с. Значения скорости сдвиговой деформации на поверхности тора и расход определяются по ансамблю предварительно обученной СНС. Значение кинематической вязкости можно определить численно из приближенного уравнения Навье-Стокса для исследуемого течения жидкости в торе (5). Преимуществами методики являются возможность получения кинематической вязкости от различной скорости сдвига за одно измерение, одно измерение занимает около 0,5 с, требуется малый объем испытуемой жидкости (1,87 мл), обеспечивается условие однородности полей температур и давлений, что повышает точность измерений. В качестве недостатков метода можно отметить требование к испытуемой жидкости обладать способностью отражать когерентное излучение.

Список литературы

1. Xu J., Vilanova G., Gomez H.. Phase-field model of vascular tumor growth: Three-dimensional geometry of the vascular network and integration with imaging data // *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 2020. Vol. 359: 1-19.
2. Semenov A.N., Lugovtsov A.E., Lee K., and et. al. Applying Methods of Diffuse Light Scattering and Optical Trapping for Assessing Blood Rheological Parameters: Erythrocytes Aggregation in Diabetes Mellitus. *Izv. Saratov Univ. (N.S.), Ser. Physics.* Vol. 17. Iss. 2: 85–97 (in Russian). 2017; <http://doi.org/10.18500/1817-3020-2017-17-2-85-97>.
3. Yeow N. , Tabor R., Garnier G. Atomic force microscopy: From red blood cells to immunohematology. *Advances in Colloid and Interface Science.* 2017; Vol. 249: 149–162. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cis.2017.05.011>.

4. Harris M. J., Wirtz D., Wu P. Dissecting cellular mechanics: Implications for aging, cancer, and immunity. *Seminars in Cell & Developmental Biology*. 2018: 1 – 10.
5. Gertz M. A. Acute hyperviscosity: syndromes and management. *Blood*. 2018. Vol. 132. Iss. 13: 1379-1385. <https://doi.org/10.1182/blood-2018-06-846816>.
6. Connes P., Dufour S, Pichon A., Favret F. Editor(s): Bagchi D., Nair S., Chandan K. *Chapter 30 - Blood Rheology, Blood Flow, and Human Health. Nutrition and Enhanced Sports Performance*. Second Edition. Academic Press; 2019: 359-369. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813922-6.00030-8>.
7. Blood Rheology: Key Parameters, Impact on Blood Flow / E. Nader, S. Skinner, M. Romana, R. Fort, N. Lemonne, and etc. // Role in Sickle Cell Disease and Effects of Exercise. *Front. Physiol.* 2019; Vol. 10: 1–14. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.01329>.
8. The role of blood rheology in sickle cell disease / P. Connes, T. Alexy, J. Deterich, M. Romana, M. D. Hardy-Dessources, and etc. // *Blood Rev.* 2016; Vol. 30: 111–118. doi: 10.1016/j.blre.2015.08.005.
9. Middleman S. *The Flow of High Polymers. Continuum and Molecular Rheology*. Interscience Publishers; 1968.
10. *Viscosity of Liquids* / D. Viswanath, T. Ghosh, D. Prasad, N. Dutt, K. Rany // Springer; 2007.
11. Viscometer validation studies for routine and experimental hemorheological measurements / D. Kovacs, K. Totimon, K. Biro, P. Kenyeres, I. Juricskay, and et. al. // *Clin Hemorheol Microcirc.* 2018; Vol. 69(3): 383-392. <https://doi.org/10.3233/CH-170301>.
12. *More solutions to sticky problems. A guide to getting more from your Brookfield Viscometer & Rheometer*. AMETEK Brookfield, Inc; 2017.
13. Development of an improved falling ball viscometer for high-pressure measurements with supercritical CO₂. / B. Calvignac, E. Rodier, J. Letourneau, P. Vitoux, C. Aymonier, and et al. // *J. of Supercritical Fluids*. 2010; 55; 2010: 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2010.07.012>.
14. Cristescu N., Conrad B., Tran-Son-Tay R. A closed form solution for falling cylinder viscometers. *International Journal of Engineering Science*. 2002; 40: 605–620.
15. Measurement of human blood viscosity using Falling Needle Rheometer and the correlation to the Modified Herschel-Bulkley model equation / H. Yamamoto, T. Yabuta, Y. Negi, D. Horikawa, K. Kawamura // *Heliyon*. 2020; Vol. 6: 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04792>
16. Rolling-ball viscometer: Lovis 2000 M/ME. Доступно: <https://www.anton-paar.com/corp-en/products/details/rolling-ball-viscometer-lovis-2000-mme/> (дата обращения 28.03.2022).
17. Theoretical premises of a vibro-inertial method of viscosity measurement / E. Kornaeva, A. Kornaev, L. Savin, A. Galichev, A. Babin // *Vibroengineering Procedia*. 2016. Vol. 8. P. 440 – 445.
18. Hori Y. *Hydrodynamic lubrication*. Tokyo: Yokendo Ltd; 2006.

19. Gertz M. A. Acute hyperviscosity: syndromes and management. *Blood*. 2018. Vol. 132. Iss. 13: 1379-1385. <https://doi.org/10.1182/blood-2018-06-846816>.
20. Goodman J.W. *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications*. Robert and Company Publisher; 2007.
21. Dynamic evaluation of blood flow microcirculation by combined use of the laser Doppler flowmetry and high-speed videocapillaroscopy methods / V. Dremin, I. Kozlov, M. Volkov, N. Margaryants, A Potemkin., and et al. // *J. Biophotonics*. 2019. Vol. 12: e201800317. <https://doi.org/10.1002/jbio.201800317>
22. Daly S. M., Leahy M. J. 'Go with the flow': A review of methods and advancements in blood flow imaging. *J. Biophotonics*. 2013; Vol. 6. No. 3: 217–255. <https://doi.org/10.1002/jbio.201200071>
23. Laser speckle contrast imaging and machine learning in application to physiological fluids flow rate recognition / I.N. Stebakov, E.P. Kornaeва, D.D. Stavtsev, E.V. Potapova, V.V. Dremin // *Vibroengineering procedia*. 2021. Vol.38: 50-55. <https://doi.org/10.21595/vp.2021.22013>.
24. Korn G. A., Korn T. M. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers*. Dover Publications; 2000.
25. Thermal conductivity and human density, thermophysical properties of biotissues [ThermalInfo.ru] URL: <http://thermalinfo.ru/chelovek/teploprovodnost-cheloveka-teplofizicheskie-svoystva-biotkanej> (дата обращения 26.03.2022) (in Rus.).

References

1. Xu J., Vilanova G., Gomez H. Phase-field model of vascular tumor growth: Three-dimensional geometry of the vascular network and integration with imaging data. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 2020, vol. 359: 1-19.
2. Semenov A.N., Lugovtsov A.E., Lee K., and et. al. Applying Methods of Diffuse Light Scattering and Optical Trapping for Assessing Blood Rheological Parameters: Erythrocytes Aggregation in Diabetes Mellitus. *Izv. Saratov Univ. (N.S.), Ser. Physics*, vol. 17. Iss. 2: 85–97 (in Russian). 2017; <http://doi.org/10.18500/1817-3020-2017-17-2-85-97>.
3. Yeow N., Tabor R., Garnier G. Atomic force microscopy: From red blood cells to immunohematology. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2017, vol. 249: 149–162. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cis.2017.05.011>.
4. Harris M. J., Wirtz D., Wu P. Dissecting cellular mechanics: Implications for aging, cancer, and immunity. *Seminars in Cell & Developmental Biology*. 2018: 1 – 10.
5. Gertz M. A. Acute hyperviscosity: syndromes and management. *Blood*. 2018. Vol. 132. Iss. 13: 1379-1385. <https://doi.org/10.1182/blood-2018-06-846816>.
6. Connes P., Dufour S, Pichon A., Favret F. Editor(s): Bagchi D., Nair S., Chandan K. *Chapter 30 - Blood Rheology, Blood Flow, and Human Health. Nutrition and Enhanced Sports Performance*. Second Edition. Academic Press; 2019: 359-369. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813922-6.00030-8>.

7. Nader E., Skinner S., Romana M., Fort R., Lemonne N., and etc. Blood Rheology: Key Parameters, Impact on Blood Flow, Role in Sickle Cell Disease and Effects of Exercise. *Front. Physiol.* 2019, vol. 10: 1–14. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.01329>.
8. Connes P., Alexy T., Detterich J., Romana, M., Hardy-Dessources, M. D., and etc. The role of blood rheology in sickle cell disease. *Blood Rev.* 2016, vol. 30: 111–118. doi: 10.1016/j.blre.2015.08.005.
9. Middleman S. *The Flow of High Polymers. Continuum and Molecular Rheology*. Interscience Publishers; 1968.
10. Viswanath D., Ghosh T., Prasad D., Dutt N., Rany K. *Viscosity of Liquids*. Springer; 2007.
11. Kovacs D., Totimon K., Biro K., Kenyeres P., Juricskay I., and et. al. Viscometer validation studies for routine and experimental hemorheological measurements. *Clin Hemorheol Microcirc.* 2018, vol. 69(3): 383–392. <https://doi.org/10.3233/CH-170301>.
12. *More solutions to sticky problems. A guide to getting more from your Brookfield Viscometer & Rheometer*. AMETEK Brookfield, Inc; 2017.
13. Calvignac B., Rodier E., Letourneau J., Vitoux P., Aymonier C., and et al. Development of an improved falling ball viscometer for high-pressure measurements with supercritical CO₂. *J. of Supercritical Fluids.* 2010; 55; 2010: 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2010.07.012>.
14. Cristescu N., Conrad B., Tran-Son-Tay R. A closed form solution for falling cylinder viscometers. *International Journal of Engineering Science.* 2002; 40: 605–620.
15. Yamamoto H., Yabuta T., Negi Y., Horikawa D., Kawamura K. Measurement of human blood viscosity using Falling Needle Rheometer and the correlation to the Modified Herschel-Bulkley model equation. *Heliyon.* 2020, vol. 6: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04792>
16. Rolling-ball viscometer: Lovis 2000 M/ME. Доступно: <https://www.anton-paar.com/corp-en/products/details/rolling-ball-viscometer-lovis-2000-mme/> (дата обращения 28.03.2022).
17. Kornaeva E., Kornaev A., Savin L., Galichev A., Babin A. Theoretical premises of a vibro-inertial method of viscosity measurement. *Vibroengineering Procedia*, 2016, vol. 8, Pp. 440 – 445.
18. Hori Y. *Hydrodynamic lubrication*. Tokyo: Yokendo Ltd; 2006.
19. Gertz M. A. Acute hyperviscosity: syndromes and management. *Blood.* 2018. Vol. 132. Iss. 13: 1379–1385. <https://doi.org/10.1182/blood-2018-06-846816>.
20. Goodman J.W. *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications*. Robert and Company Publisher; 2007.
21. Dremine V., Kozlov I., Volkov M., Margaryants N., Potemkin A., and et al. Dynamic evaluation of blood flow microcirculation by combined use of the laser Doppler flowmetry and high-speed videocapillaroscopy methods. *J. Biophotonics.* 2019, Vol. 12: e201800317. <https://doi.org/10.1002/jbio.201800317>

22. Daly S. M., Leahy M. J. 'Go with the flow': A review of methods and advancements in blood flow imaging. *J. Biophotonics*. 2013; Vol. 6. No. 3: 217–255. <https://doi.org/10.1002/jbio.201200071>
23. Stebakov I.N., Kornaeva E.P., Stavtsev D.D., Potapova E.V., Dremin V.V. Laser speckle contrast imaging and machine learning in application to physiological fluids flow rate recognition. *Vibroengineering procedia*. 2021, vol.38: 50-55. <https://doi.org/10.21595/vp.2021.22013>.
24. Korn G. A., Korn T. M. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers*. Dover Publications; 2000.
25. Thermal conductivity and human density, thermophysical properties of biotissues [ThermalInfo.ru] URL: <http://thermalinfo.ru/chelovek/teploprovodnost-cheloveka-teplofizicheskie-svoystva-biotkanej> (дата обращения 26.03.2022) (in Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Корнаева Елена Петровна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационных систем и цифровых технологий, Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, г. Орел, Российская Федерация, e-mail: lenoks_box@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0123-4004>

Elena P. Kornaeva, Cand. of Sci. (Phisico-Mathematical), Associate Professor, Information Systems Department, Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russian Federation, e-mail: lenoks_box@mail.ru, ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-0123-4004>

Стебаков Иван Николаевич, аспирант кафедры мехатроники, механики и робототехники, Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, г. Орел, Российская Федерация, e-mail: chester50796@yandex.ru

Ivan N. Stebakov, Post-Graduate Student, Mechatronics, Mechanics and Robotics Department, Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russian Federation, e-mail: chester50796@yandex.ru

Корнаев Алексей Валерьевич, доктор технических наук, профессор кафедры мехатроники, механики и робототехники, Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, г. Орел, Российская Федерация, e-mail: rusakor@inbox.ru

Alexey V. Kornaev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Mechatronics, Mechanics and Robotics Department, Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russian Federation, e-mail: rusakor@inbox.ru

Дрёмин Виктор Владимирович, кандидат технических наук, научный сотрудник научно-технологического центра биомедицинской фотоники, Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, г. Орел, Российская Федерация; Колледж инженерных и физических наук, Астонский университет, Бирмингем, Великобритания, e-mail: dremin_viktor@mail.ru

Viktor V. Dremin, Cand. of Sci. (Engineering), Researcher, Research and Development Center of Biomedical Photonics, Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russian Federation, College of Engineering and Physical Sciences, Aston University, Birmingham, United Kingdom, e-mail: dremin_viktor@mail.ru

Реализация агентно-базированных метакомпьютерных систем и приложений

Н.С. Карамышева¹, Д.С. Свищев¹, К.В. Попов¹, С.А. Зинкин¹ 

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

 e-mail: zsa49@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Создание методики проектирования прототипа метакомпьютерной распределенной вычислительной системы с учетом современного этапа эволюции аппаратного и облачно-сетевого программного обеспечения для предоставления пользователям средства создания приложений, обладающих межпрограммным параллелизмом и возможностью совместной работы компонент.

Методы. Логические модели искусственного интеллекта - концептуальные графы, агентно-базированная технология программирования, виртуализация сетевых ресурсов. Метод проведения натурного эксперимента заключался в том, что при запуске приложения на выполнение в виртуальном агентно-базированном метакомпьютере была использована сетевая инфраструктура с удаленным доступом к лабораторной сети Fast Ethernet через Интернет и затем проводилось измерение временных характеристик.

Результаты. Предложена методика проектирования облачно-сетевых метакомпьютерных систем и приложений, создано прототипное программное обеспечение промежуточного уровня middleware на базе мультиагентной технологии. Поставленная цель достигнута, так как разработанная агентно-базированная среда позволяет реализовывать универсальные управляющие конструкции программирования – переход по одному или нескольким условиям, цикл, последовательность, распараллеливание, для которых введены исполнимые концептуальные спецификации.

Заключение. Предложен подход к реализации распределенного метакомпьютерного приложения в среде компьютерной сети на основе использования предметно-ориентированной мультиагентной системы и концепции агентно-ориентированного программирования на основе концептуальных графов, описывающих обмен сообщениями и обработку данных программными агентами. В агентно-базированной среде эффективно реализуются межузловые взаимодействия по типу пиринговых; возможна организация параллельной обработки данных как несколькими, так и одним агентом. Предлагаемые методы решения задач позволяют оперативно создавать распределенные приложения, работающие в облачно-сетевой среде; время разработки и отладки при этом сокращается примерно на порядок.

Ключевые слова: метакомпьютерные системы; концептуальные графы; мультиагентные системы; технологии виртуализации; сетевые технологии.

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

Для цитирования: Реализация агентно-базированных метакомпьютерных систем и приложений / Н.С. Карамышева, Д.С. Свищев, К.В. Попов, С.А. Зинкин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(1): 148-171. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-148-171>.

Поступила в редакцию 22.12.2021

Подписана в печать 27.01.2022

Опубликована 31.03.2022

Implementation of Agent-Based Metacomputersystems and Applications

Nadezhda S. Karamysheva¹, Danil S. Svishchev¹, Konstantin V. Popov¹,
Sergey A. Zinkin¹ ✉

¹ Penza State University

40 Krasnaya str., Penza 440026, Russian Federation

✉ e-mail: zsa49@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. Creation of a methodology for designing a prototype of a metacomputer distributed computing system, taking into account the current stage of the evolution of hardware and cloud-network software to provide users with the means to create applications with inter-program parallelism and the ability of components to work together.

Methods. Logical models of artificial intelligence, semantic networks and conceptual graphs, agent-based technology, virtualization of network resources. The method of conducting a full-scale experiment was that when the application was launched for execution in a virtual agent-based metacomputer, a network infrastructure was used with remote access to the Fast Ethernet laboratory network via the Internet, and then time characteristics were measured.

Results. A technique for designing cloud-network metacomputer systems and applications is proposed, and prototype middleware software based on multi-agent technology is created. The goal of the study has been achieved, since the developed agent-based environment allows the implementation of universal programming control structures - transition by one or more conditions, cycle, sequence, parallelization, for which executable conceptual specifications have been introduced.

Conclusion. An approach to the implementation of a distributed metacomputer application in a computer network environment based on conceptual graphs describing the exchange of messages and data processing by software agents is proposed. The performance of the application under conditions of extraneous load on the network was demonstrated.

Keywords: metacomputer systems; logical models4 conceptual graphs4 multiagent systems4 virtualization technologies; network technologies; technology integration.

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

For citation: Karamysheva N. S., Svishchev D. S., Popov K. V., Zinkin S. A. Implementation of Agent-Based Metacomputersystems and Applications. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(1): 148-171 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-148-171>.

Received 22.12.2021

Accepted 27.01.2022

Published 31.03.2022

Введение

Достижения в области сетевых и вычислительных технологий позволяют создавать крупномасштабные высокопроизводительные распределенные вычислительные среды. В то же время появляются новые требования к приложениям по использованию разнообразных, географически распределенных ресурсов. Появляются новые классы приложений – грид, облачных, коммунальных, кластерных, требующих обеспечения функциональных возможностей, недоступных на одном компьютере. Большинство крупных компьютерных компаний занимается разработкой распределенных сетевых архитектур компонентно базированных приложений, обеспечивающих параллельную и распределенную обработку информации. В этой связи в классе компонентно-базированных приложений большой интерес представляют агентно-базированные приложения, обеспечивающие при реализации в распределенных вычислительных системах высокий уровень масштабируемости, гибкости, мобильности и надежности.

Проблемы развития Интернета и будущее цифровой экономики рассмотрены в работах [1, 2], где отмечается важное значение развитие международной экономики, управляемой потоками трансграничных данных.

На сайте [3] уточняется понятие “метакомпьютинг”, сделан краткий обзор технологий организации распре-

ленных вычислений в Интернете и отмечается, что современный метакомпьютинг основан на однородном доступе к вычислительным ресурсам большого числа (вплоть до нескольких тысяч) компьютеров в локальных или глобальных сетях. Подобное же мнение поддерживается организаторами и пользователями крупного международного проекта “World Community Grid” [4], где большое внимание уделяется развитию “волонтерского” распределения вычислительных мощностей, принадлежащих различным собственникам. В названии проекта присутствует термин “грид”, хотя термин “метакомпьютинг” более соответствует решаемым задачам. В числе этих задач, как отмечается в источниках [3, 4], задачи ядерной физики, защиты окружающей среды, предсказания погоды, численного моделирования, биологического моделирования, фармацевтики, астрономии, астрофизики, медицины и др.

Агентно-базированная массивно-параллельная система виртуальных машин разработана авторами работ [5, 6]. Система, созданная по технологии мобильных агентов, предназначена для высокопроизводительных вычислений в различных предметных областях.

Агентно-ориентированный язык программирования JADEL для платформы JADE предложен в работе [7]. Этот язык предназначен для упрощения программирования сетевых приложений и

создан на основе мультиагентной технологии.

Технология аглетов – мобильных JAVA-агентов [8] уже долгое время привлекает внимание разработчиков сетевого программного обеспечения. Однако эта технология в настоящее время поддерживается практически только программистами-любителями, так как аглеты (агенты-апплеты) оказались слишком громоздкими для использования в промышленных проектах. Более успешными оказались такие инструменты, как Voyager, Grasshopper, Tryllian, JADE, Trasy, SPRINGS. В этой же работе отмечается, что использование мобильных агентов устраняет недостатки существующей парадигмы “клиент-сервер” за счет снижения сетевой нагрузки и задержек, а также за счет асинхронного выполнения действий. Они также делают систему адаптивной к изменениям, надежной и отказоустойчивой [8].

Подробные обзоры агентно-базированных платформ и фреймворков приведены, например, в работах [9, 10, 11, 12].

На базе программных агентов эффективно реализуются и так называемые сервис-ориентированные архитектуры SOA (англ. SOA – Service-Oriented Architecture), в том числе архитектуры типа “функции как сервис” FaaS (англ. FaaS – Functions as a Service) [13, 14, 15]. В работе [16] предложена новая архитектура агентно-базированной облачной системы AaaS “агент как сервис”

(англ. AaaS – Agent as a Service). В данной архитектуре сервисные функции реализуются мобильными или стационарными агентами. Практический опыт создания объектно-ориентированных, агентно-ориентированных и AI-ориентированных (англ. AI – Artificial Intelligence – искусственный интеллект) параллельных и распределенных приложений, описанный в работах [16, 17, 18, 19], показывает, что при разработке современного программного обеспечения целесообразно использовать формальные методы и средства, в том числе логические методы искусственного интеллекта.

Материалы и методы

Интеграция технологий. В настоящей работе при реализации проекта прототипа метакомпьютера используются подход к описанию системной и функциональной архитектуры распределенных приложений на основе концепции фирмы Sun Microsystems “Сеть – это компьютер” [20], а также концептуальные модели функциональной архитектуры, определенные в работах [21, 22]. Агентно-базированный метакомпьютер создается в результате интеграции по меньшей мере трех технологий, что иллюстрирует рис. 1. К этим технологиям можно добавить и технологию создания грид-систем на основе мобильных агентов [4].

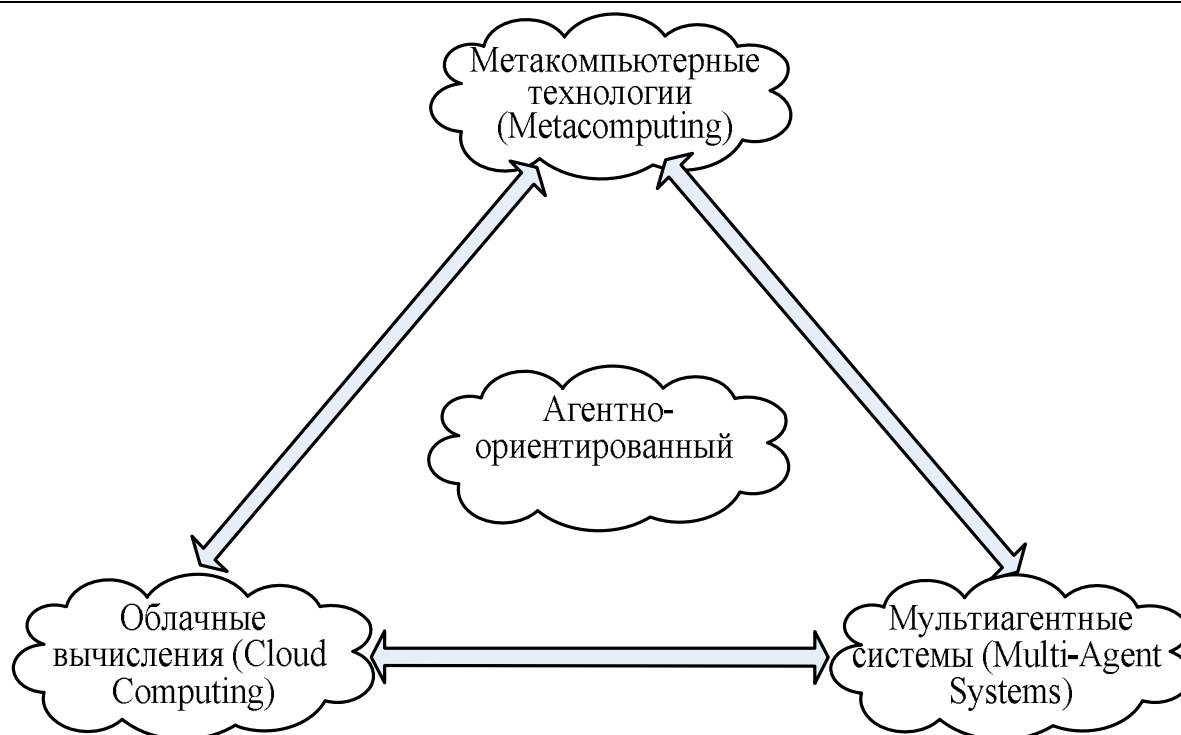


Рис. 1. Интеграция технологий при проектировании агентно-базированного метакomпьютера

Fig. 1. Integration of technologies in the design of an agent-based metacomputer

Программные агенты начали создаваться на современных этапах эволюции программного обеспечения, предоставляя пользователям средства для создания приложений, обладающих межпрограммным параллелизмом и возможностью совместной работы компонент. Программный агент отличается от робота тем, что он действует в киберпространстве, образуемом компьютерной сетью. Для работы в динамичной, изменяющейся среде обычно используется модульная или компонентная, архитектура приложений, нередко использующая модели представления знаний в интеллектуальных системах.

В настоящей работе не учитываются антропоморфные свойства интеллектуальных агентов, хотя в плане развития архитектуры смешанного типа

AaaS-FaaS возможно придать агентам искусственные нейронные сети как дополнительные функции, а также функции машинного обучения MLaaS – Machine Learning as a Service.

Инфраструктура. Инфраструктура для развертывания рассматриваемого в настоящей работе метакomпьютерного приложения – это обычная глобальная или локальная TCP/IP сеть, в среде которой развернута апробированная в международной практике платформа JADE (Java Agent Development Framework) и проект которой разработан и сопровождается компанией Telecom Italia Lab [23, 24]. Размещение виртуальных узлов с агентами и виртуальные каналы связи в метакomпьютерной системе, развернутой в среде TCP/IP сети, показаны на рис. 2.

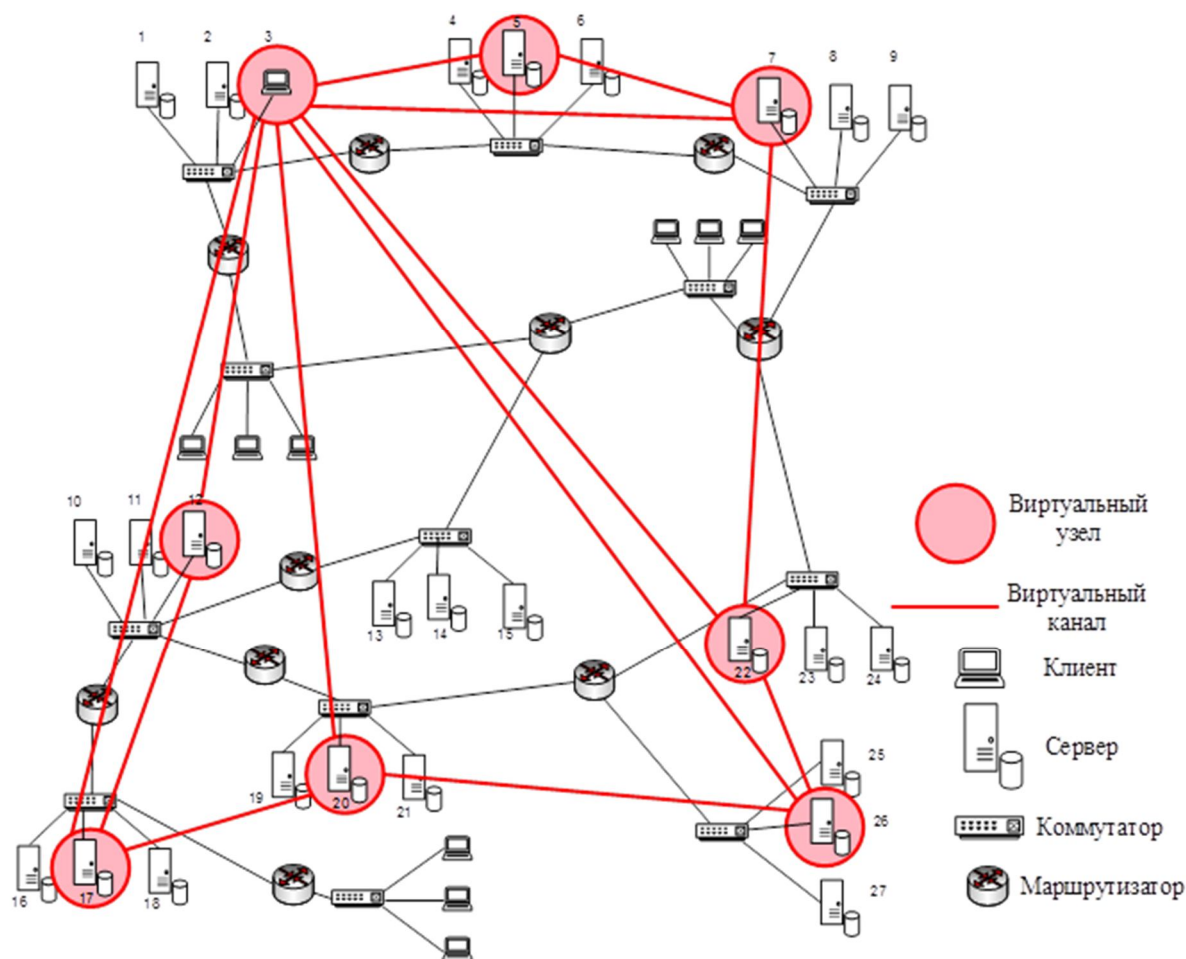


Рис. 2. Виртуальные узлы с агентами и виртуальные каналы связи метакомпьютерной системы, развернутой в среде TCP/IP сети

Fig. 2. Virtual nodes with agents and virtual communication channels of a metacomputer system deployed in a TCP/IP network environment

Концептуальная модель приложения. В качестве примера полнофункционального приложения рассмотрена реализация сценария *A* обработки данных, заданного концептуальным графом на рис. 2 и следующим операторным выражением:

$A = A0/Y0, A1/Y0, A2/Y0 \parallel (A3/Y1;$
 $A4/Y2; A5/Y3), J(A6/Y3) \parallel, A7/Y4, A8/Y4,$
 $S[A9[k/Y4]((k = 1): A10/Y5 \oplus (k = 2):$
 $A11/Y6 \oplus (k = 3): A12/Y7) Or(A13/Y8),$
 $A14/Y8,$

где A_i/Y_j – обозначение агента-оператора A_i , размещенного на узле Y_j ;

$\parallel F \dots J \parallel$ – обозначение операции “Fork-Join” распараллеливания сообщений;

$S \dots \oplus \dots \oplus \dots Or$ – обозначение операции “Switch-Or” выбора одной из нескольких альтернатив по значению некоторого параметра;

$A_i[k/Y_j]$ – эта запись имеет следующий смысл: “выполнение агента-оператора A_i на узле Y_j сопровождается вычислением параметра k ”.

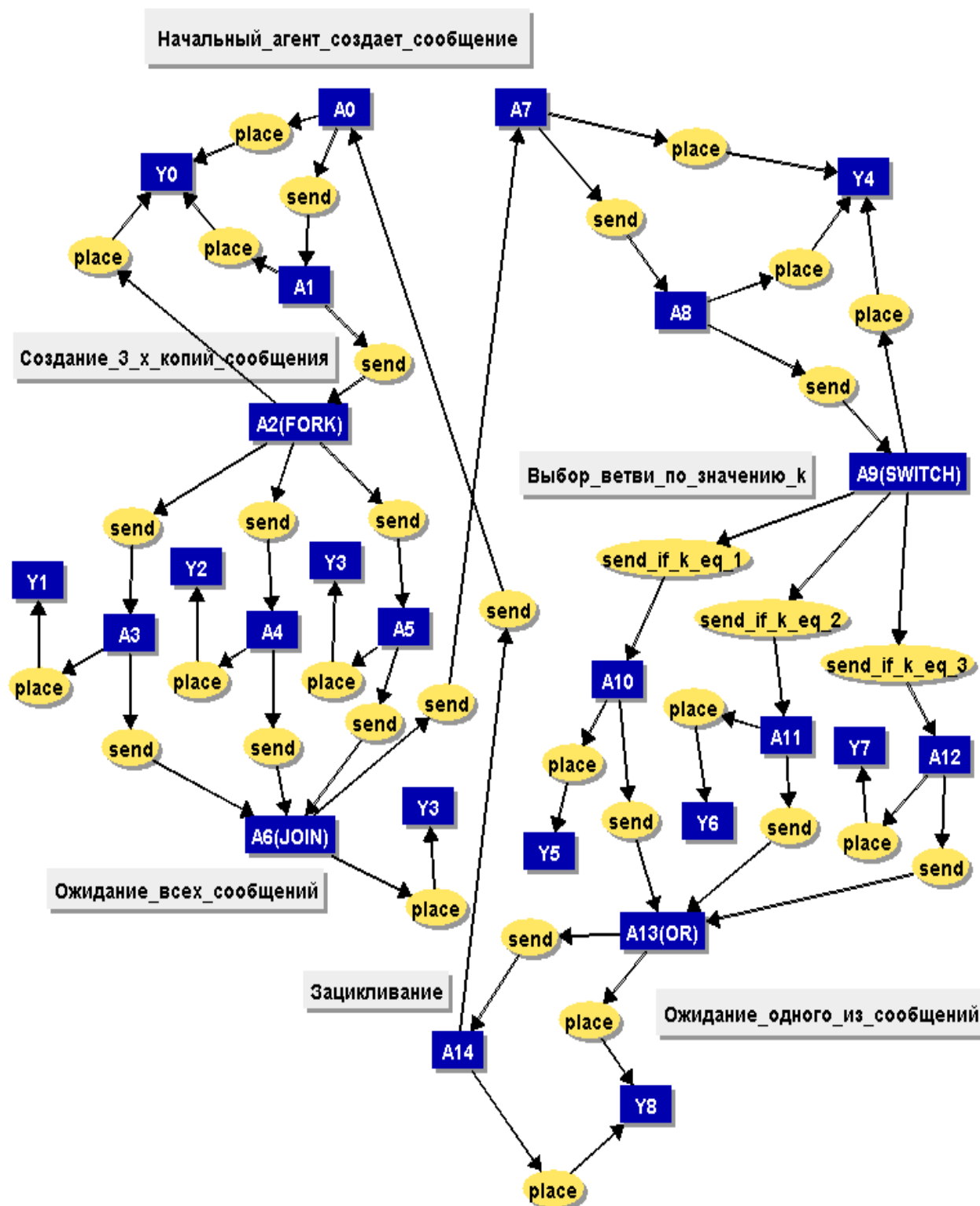


Рис. 3. Концептуальный граф сценария распределенной обработки данных

Fig. 3. Conceptual graph of a distributed data processing scenario

На рис. 4 представлена UML диаграмма, отображающая развертывание агентов, используемых в сценарии рас-

пределенной обработки данных, в мета-компьютере.

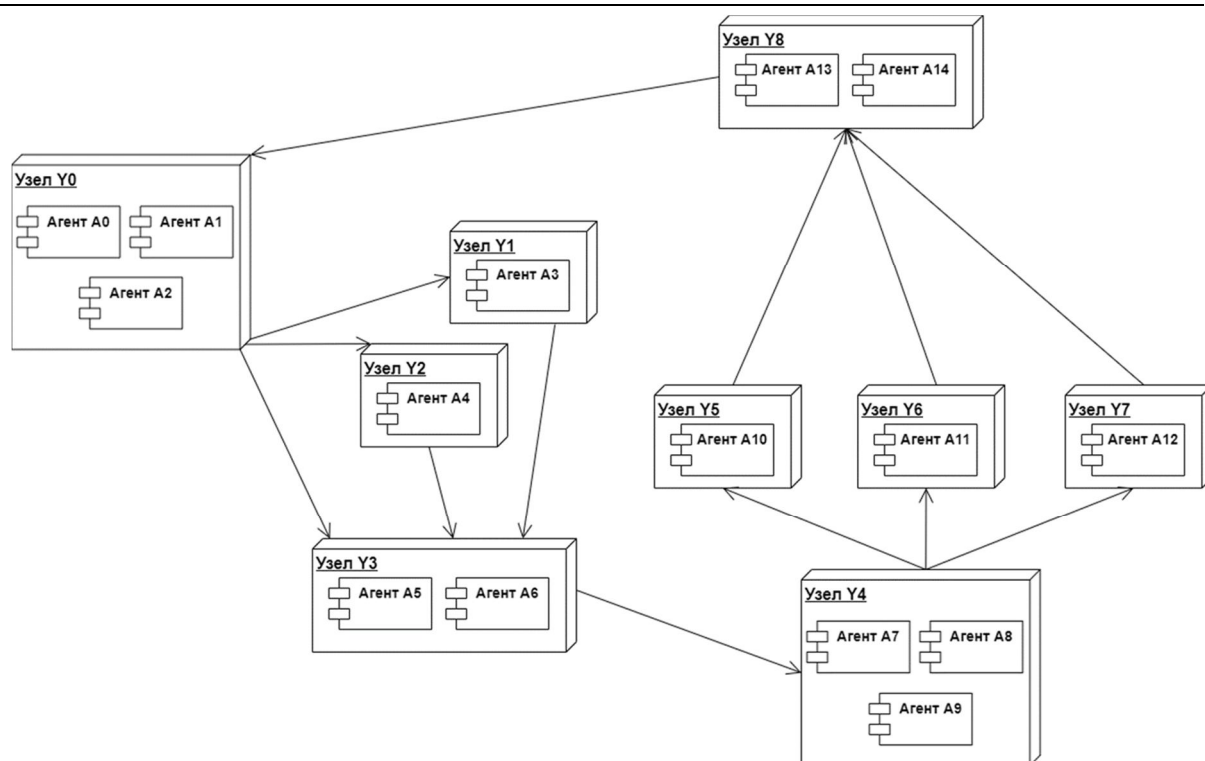


Рис. 4. Диаграмма развертывания метакомпьютерной системы

Fig. 4. Diagram of the deployment of a metacomputer system

Сценарий А “настроен” на выполнение решаемой задачи после того, как будут конкретизированы отношения send передачи сообщений и place размещения агентов на логических узлах сети, о чем на формальном уровне свидетельствует истинность следующего составного высказывания Р, которое основано на фактах, составляющие экстенциональную базу знаний:

$P = \text{place}(a0, y0) \ \& \ \text{place}(a1, y0) \ \& \ \text{send}(a0, a1) \ \& \ \text{place}(a2, y0) \ \& \ \text{send}(a1, a2) \ \& \ \text{place}(a3, y1) \ \& \ \text{place}(a4, y2) \ \& \ \text{place}(a5, y3) \ \& \ \text{send}(a2, a3) \ \& \ \text{send}(a2, a4) \ \& \ \text{send}(a2, a5) \ \& \ \text{place}(a6, y3) \ \& \ \text{send}(a3, a6) \ \& \ \text{send}(a4, a6) \ \& \ \text{send}(a5, a6) \ \& \ \text{place}(a7, y4) \ \& \ \text{send}(a6, a7) \ \& \ \text{place}(a8, y4) \ \& \ \text{send}(a7, a8) \ \& \ \text{place}(a9, y4) \ \&$

$\ \& \ \text{send}(a8, a9) \ \& \ \text{place}(a10, y5) \ \& \ \text{place}(a11, y6) \ \& \ \text{place}(a12, y7) \ \& \ ((k=1) \ \& \ \text{send}(a9, a10) \ \vee \ (k=2) \ \& \ \text{send}(a9, a11) \ \vee \ (k=3) \ \& \ \text{send}(a9, a12)) \ \& \ \text{place}(a13, y8) \ \& \ ((k=1) \ \& \ \text{send}(a10, a13) \ \vee \ (k=2) \ \& \ \text{send}(a11, a13) \ \vee \ (k=3) \ \& \ \text{send}(a12, a13)) \ \& \ \text{place}(a14, y8) \ \& \ \text{send}(a13, a14) \ \& \ \text{send}(a14, a0).$

Мультиагентная технология.

Фрейм-ворк JADE реализует мультиагентную технологию и представляет собой средство для разработки программного обеспечения промежуточного уровня *middleware*, предназначенное для создания многоагентных систем. JADE включает в свой состав среду выполнения, в которой агенты JADE могут реализовывать свой функционал [23, 24].

Поставлена задача разработки кроссплатформенного Java-приложения, обес-

печивающего реализацию некоторого сценария обработки данных и знаний, выполняемого в сети ЭВМ мобильными или стационарными агентами на основе парадигмы передачи сообщений. Программа должна реализовывать распределенный алгоритм обмена сообщениями между агентами и иметь графический пользовательский интерфейс для взаимодействия пользователя с системой и некоторыми агентами.

Общие примерные требования к составу программных средств: язык программирования Java, среда разработки IntelliJ IDEA, фреймворк JADE. Рекомендуется использование технологий

Java: Collection Framework, механизм обработки исключительных ситуаций, Java Stream API, Java Multithreading, сетевое взаимодействие. В рамках данной работы без ограничения общности рассматривается разработка распределенного алгоритма взаимодействия агентов в рамках одного контейнера.

Работа распределенного приложения начинается с инициализации агентов и последующей их регистрации в главном контейнере платформы. Для задания последовательности создания экземпляров агентов должен быть сформирован конфигурационный файл со следующим содержимым:

```
-gui – graphical user interface (графический интерфейс пользователя);
ta:agent.TestAgent;dev1:agent.DeveloperAgent;dev2:agent.DeveloperAgent;
dev3:agent.DeveloperAgent;tsr1:agent.TesterAgent;tsr2:agent.TesterAgent;
tsr3:agent.TesterAgent;do:agent.DevOpsAgent;tsl:agent.TestLeadAgent;
tsm:agent.TestManagerAgent;tsd:agent.TestDirectorAgent;tl:agent.TeamLeadAgent;
pm:agent.ProjectManagerAgent;dm:agent.DeliveryManagerAgent;
td:agent.TechnicalDirectorAgent;cl:agent.ClientAgent.
```

Приведенные далее необходимые элементы описания, которое касается программирования в среде JADE, соответствуют работам [23, 24].

Регистрация агентов. В целях обеспечения динамического поиска агентов каждый созданный экземпляр агента должен быть зарегистрирован в сервисе желтых страниц. При регистрации необходимо указать идентификатор агента AID (Agent Identifier) и его тип. После регистрации агент может выполнять поиск агента-адресата сообщения.

В качестве критериев поиска используются тип опубликованного (зарегистрированного) агента и, возможно, его имя. Каждый агент может обладать совокупностью “поведений”, которые описывают выполняемые агентом действия. Тип каждого поведения определяется функциональностью агента.

После регистрации агент готов к работе. При наличии подготовленного управляющего сообщения текущий агент выполняет поиск агента, которому следует передать это сообщение, то есть

поиск агента-адресата по его типу и, возможно, по имени.

Агент, работающий на платформе JADE, регистрирует свои так называемые “поведения”, то есть сценарии возможного функционирования. Поведения задают последовательность действий агента и реализуются в одном потоке.

Для распределенного алгоритма, представленного на рис. 3, сообщение задано в виде сложного унифицированного объекта, предоставляющего гибкую структуру данных, включающую контент и вспомогательные поля.

Пользовательские интерфейсы агентов. В соответствии со сценарием действий *A* взаимодействия агентов для выполнения распределенного алгоритма начинаются с создания стартового сообщения с помощью пользовательского интерфейса агента A0 (рис. 5).

Интерфейс агента A0 распределенного алгоритма является формой отображения входящих сообщений от агента A14 (при зацикливании) и обеспечивает управление добавлением, удалением, редактированием и отправкой вводимых сообщений. Необходимым условием успешных действий агента A0 является регистрация агента A1 в сервисе желтых страниц, только тогда он будет найден как адресат агентом A0. Use-case диаграмма (UML диаграмма вариантов использования) агента A0 представлена на рис. 6. Используемый в диаграмме термин “логирование” (англ. *logging*) действий агента обозначает его регистрацию с возможностью последующего отслеживания событий, которые происходят при работе распределенного приложения. Use-Case диаграммы для остальных агентов строятся по такому же образцу.

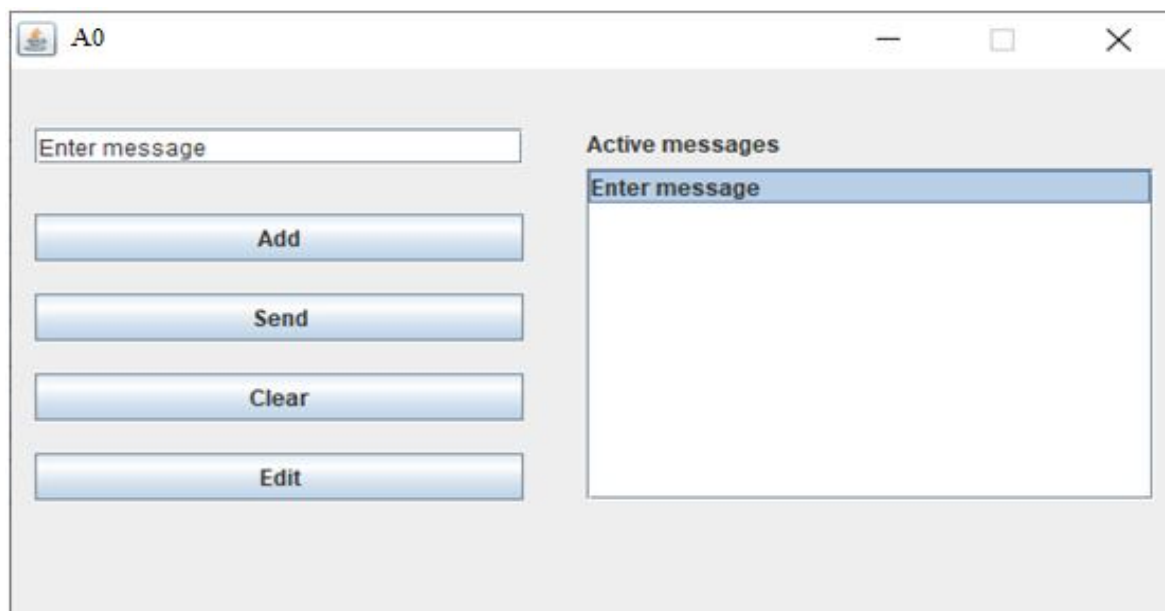


Рис. 5. Интерфейс агента A0

Fig. 5. Interface of the agent A0

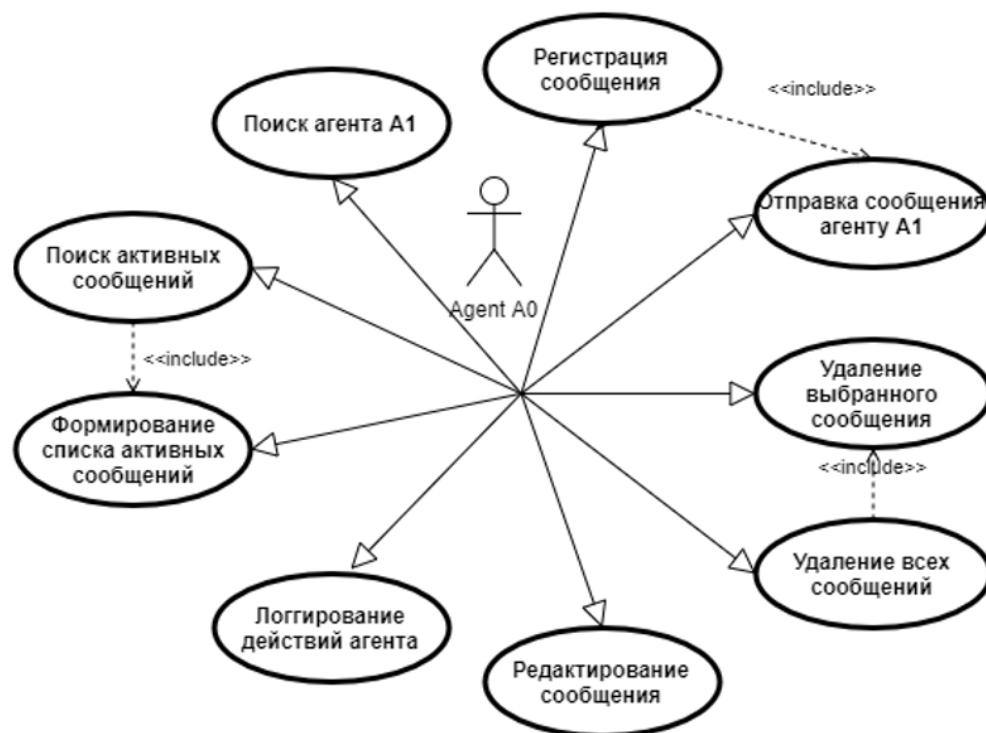


Рис. 6. Use-case диаграмма агента A0

Fig. 6. Use-case diagram of the agent A0

При нажатии кнопки “Send” выбранное сообщение отправляется агенту A1, далее проходит через цепочку агентов A2-A3-A4-A5-A6-A7-A8 и реги-

стрируется в интерфейсе агента A9 (рис. 7), информируя об этом пользователя всплывающим окном (рис. 8).

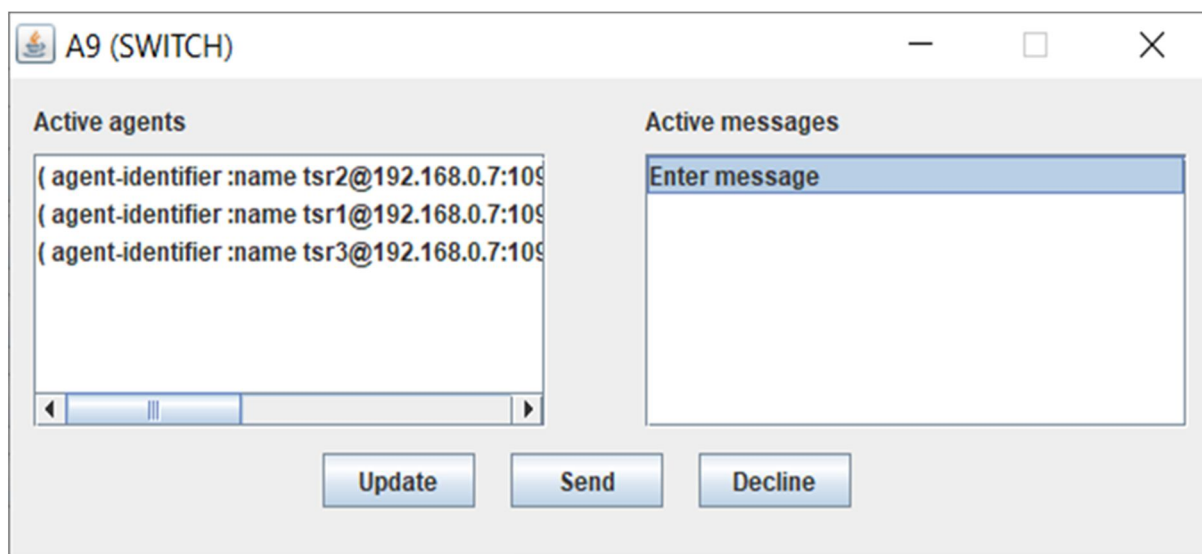


Рис. 7. Интерфейс агента A9

Fig. 7. Interface of the agent A9

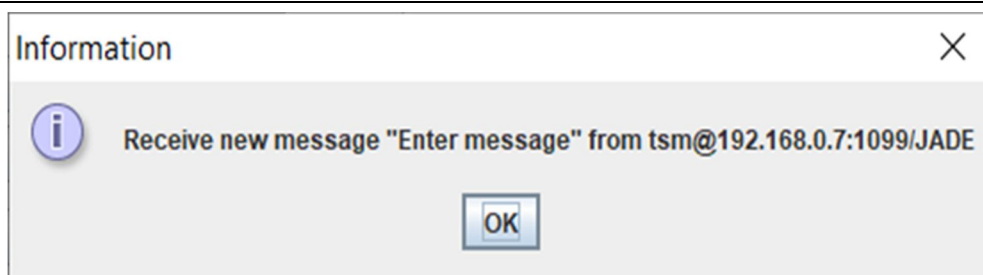


Рис. 8. Информационное окно с сообщением, выдаваемое агентом A9

Fig. 8. Information window with a message issued by the agent A9

Далее регистрируется передача сообщения через следующую цепочку агентов A10-A11-A12-A13, отображаемая в интерфейсе агента A14 (рис. 9), с последующим информированием пользователя при помощи информационного окна (рис. 10).

Взаимодействия агентов. Работа метакомпьютерного приложения начинается с регистрации и инициализации начального агента A0. Последующие

инициализации могут происходить при заиклировании распределенного алгоритма. В этом случае агент A14 должен отправить сообщение агенту A0, запуская новую итерацию распределенного алгоритма и уведомляя агента A0 о появлении передаваемого сообщения. Если же распределенное приложение должно выполняться однократно, то агент A14 завершает работу приложения.

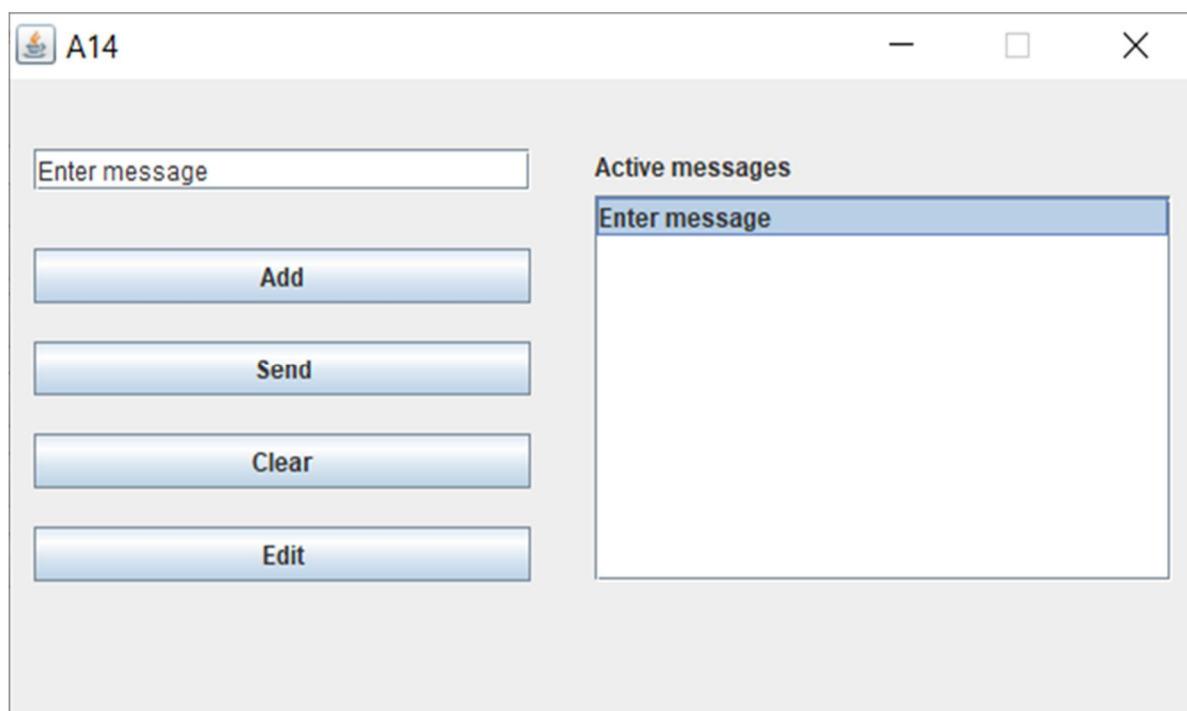


Рис. 9. Интерфейс агента A14

Fig. 9. Interface of the agent A14

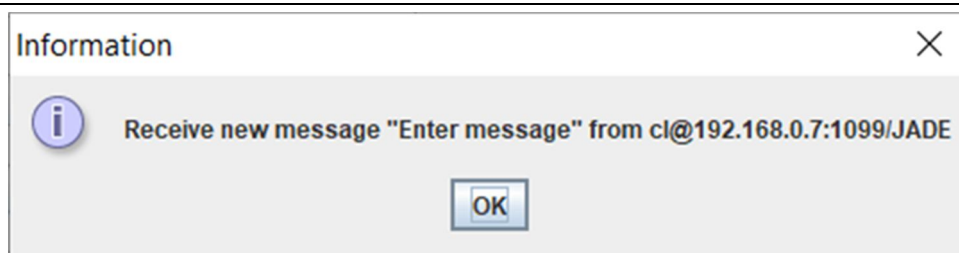


Рис. 10. Информационное окно, выдаваемое агентом A14

Fig. 10. Information window with a message issued by the agent A14

Агент A1, зарегистрировав свое поведение для поиска и обработки сообщений, ожидает входящее сообщение с данными от агента A0. Поиск сообщений осуществляется с помощью встроенного в платформу механизма обмена сообщениями между агентами. При успешном получении сообщения и наличии адресата агент A1 отправляет сообщение с данными агенту A2.

Агент A2 распараллеливает обработку получаемых данных, создавая копии полученных сообщений и рассылая их найденным агентам звена A3-A4-A5 в соответствии с заданным концептуальным графом на рис. 3.

Агенты звена A3-A4-A5 получают сообщения и далее осуществляют их обработку и отправку агенту-сборщику данных A6, который осуществляет реализацию сложных переговоров, ожидая поставки сообщений от всех агентов звена. Только в том случае, когда все сообщения получены, выполняется операция объединения данных и отправка сообщения с данными агенту A7.

Агент A7 ожидает сообщение от агента A6 и при его получении осуществляет его обработку, логирование данных и их передачу следующему

агенту A8. Агент A8 обладает поведением, подобным поведению агента A7, и при получении данных транслирует их агенту A9, который, как и агент A0, обладает пользовательским интерфейсом, позволяющим выбрать активное сообщение и следующего агента из списка.

Агент A9 является переключателем сообщений между агентами, отдавая определенную задачу одному выбранному агенту из группы агентов A10-A11-A12.

В свою очередь, каждый из агентов группы A10-A11-A12 ожидает задание на обработку сообщения, но получить задание может только один из них. Этот агент после получения сообщения запускает процесс логирования полученных данных и их отправку вместе с сообщением агенту A13.

Агент A13, получив сообщение от одного из агентов группы A10-A11-A12, обрабатывает его в сервисе сообщений, описанном в поведении агента, и отправляет конечному агенту A14 распределенного приложения.

Агент A14 отображает в графическом интерфейсе полученные сообщения и позволяет пользователю (в про-

цессе отладки) выбрать сообщение для передачи агенту A0 и запуска распределенного алгоритма на новую итерацию. Агент A0 прослушивает свой “почтовый ящик” и при наличии входящих со-

общений от агента A14 осуществляет запуск распределенного приложения с новыми данными. Use-case диаграмма агента A14 приведена на рис. 11.

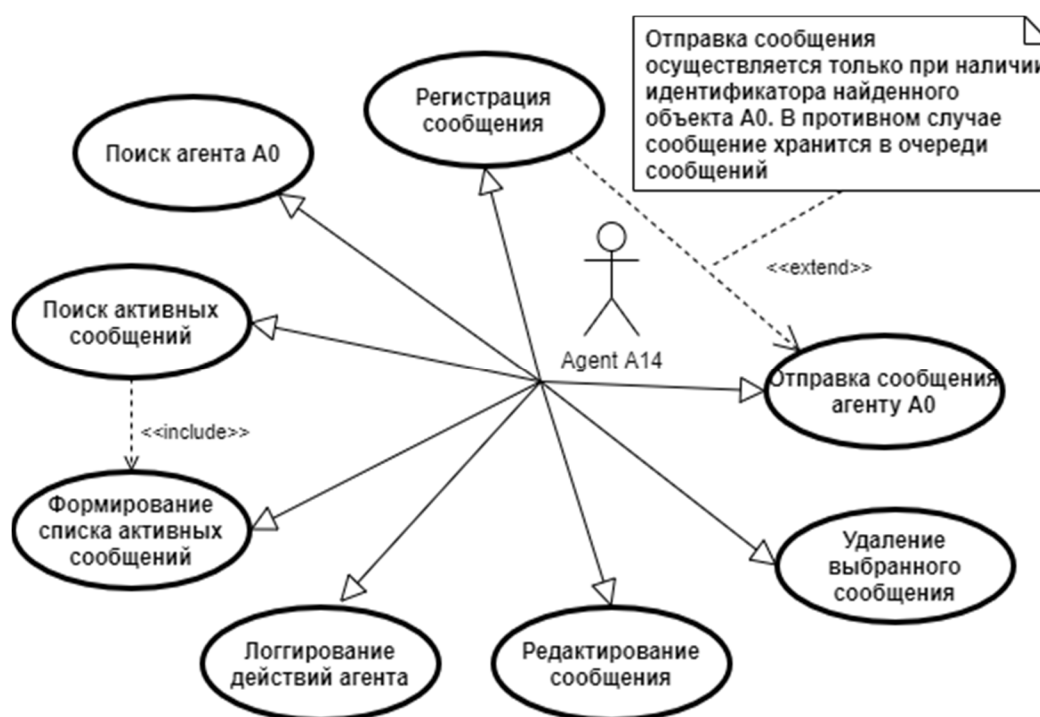


Рис. 11. Use-case диаграмма агента A14

Fig. 11. Use-case diagram of the agent A14

Описанное метакомпьютерное приложение способно обрабатывать данные, передаваемые совместно с управляющими сообщениями, в режиме “конвейерной параллельности”, то есть приложение способно принимать на обработку следующее сообщение с данными, не дожидаясь, пока будет обработано предыдущее сообщение. Для предотвращения тупиковых ситуаций предусмотрена проверка занятости каждого агента обработкой текущего сообщения.

При запуске приложения помимо создания и регистрации агентов произ-

водится инициализация пользовательского интерфейса (рис. 12), а именно административного GUI и выбранных для проверки работы приложения окон агентов A0, A9, A14.

Административный пользовательский интерфейс работает под управлением агента RMA (англ. Remote Management Agent); необходимы также утилиты Dummy agent и Sniffer agent, предназначенные для организации очередей и просмотра потока сообщений между агентами, как и предписано описаниями платформы JADE [23, 24].

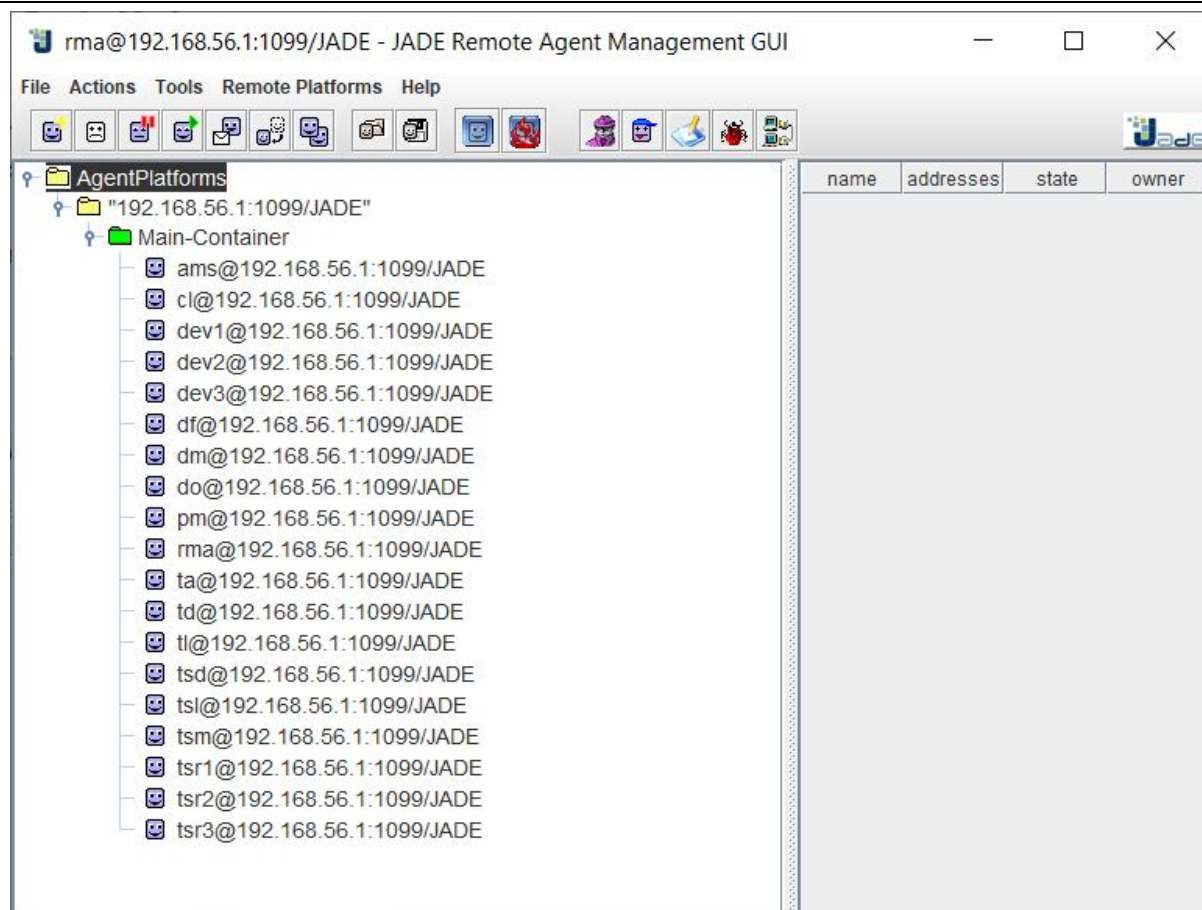


Рис. 12. Административный пользовательский интерфейс

Fig. 12. Administrative user interface

Результаты и их обсуждение

Главной целью создания агентно-базированной метакомпьютерной системы АБ МКС (*англ.* AB MCS – agent-based metacomputer system) являлась реализация концепции “Сеть – это компьютер”. Указанная цель достигнута, так как разработанная агентно-базированная среда позволяет реализовывать универсальные управляющие конструкции программирования – переход по одному или нескольким условиям, цикл, последовательность, распараллеливание, для которых введены исполнимые концептуальные спецификации.

Отличительной особенностью разработки является ее кардинальное отличие от различного рода пиринговых и клиент-серверных приложений и систем. Как и многие распределенные приложения, разработанное программное обеспечение АБ МКС работает эффективно при обработке больших объемах данных и при малом числе межузловых передач сообщений с данными между узлами. С другой стороны, необходимость создания АБ МКС может быть обусловлена территориальным размещением источников информации, местонахождение которых нецелесообразно изменять.

В процессе проведения экспериментов с агентно-базированным метакомпьютером АБ МКС была использована сетевая инфраструктура с удаленным доступом к лабораторной сети Fast Ethernet через Интернет.

Во-первых, были произведены эксперименты с АБ МКС на локальной сети Fast Ethernet, результаты которых приведены на рис. 13. Эксперименты состояли в следующем. Первый агент – управляющий, размещенный на управляющем узле, передавал свою копию с именем А0 по локальной сети и далее выполнялось приложение, концептуальный граф которого был ранее представлен на рис. 3, а сценарий действий описан выражением А. Агенты сценария на компьютеры локальной сети загружались последовательно, при помощи агента А0. Время загрузки одного агента 4 мс. “Теоретическое” время $T_{обр.}$ обработки сценария А принимало одно из двух значений – 3200 мс и 1600 мс (это время задавалось путем подбора времени выполнения операторов сценария). Все приложение в целом размещалось на N узлах локальной сети ($N = 1, 2, 4, 8, 16$).

На рис. 13 словом “Эксп. 1” обозначено экспериментальное среднее время с учетом служебного трафика (во внеучебном времени, передавались только управляющие пакеты локальной сети и, следовательно, посторонний для приложения уровень трафика был небольшим); словом “Эксп. 2” – экспериментальное среднее время с учетом

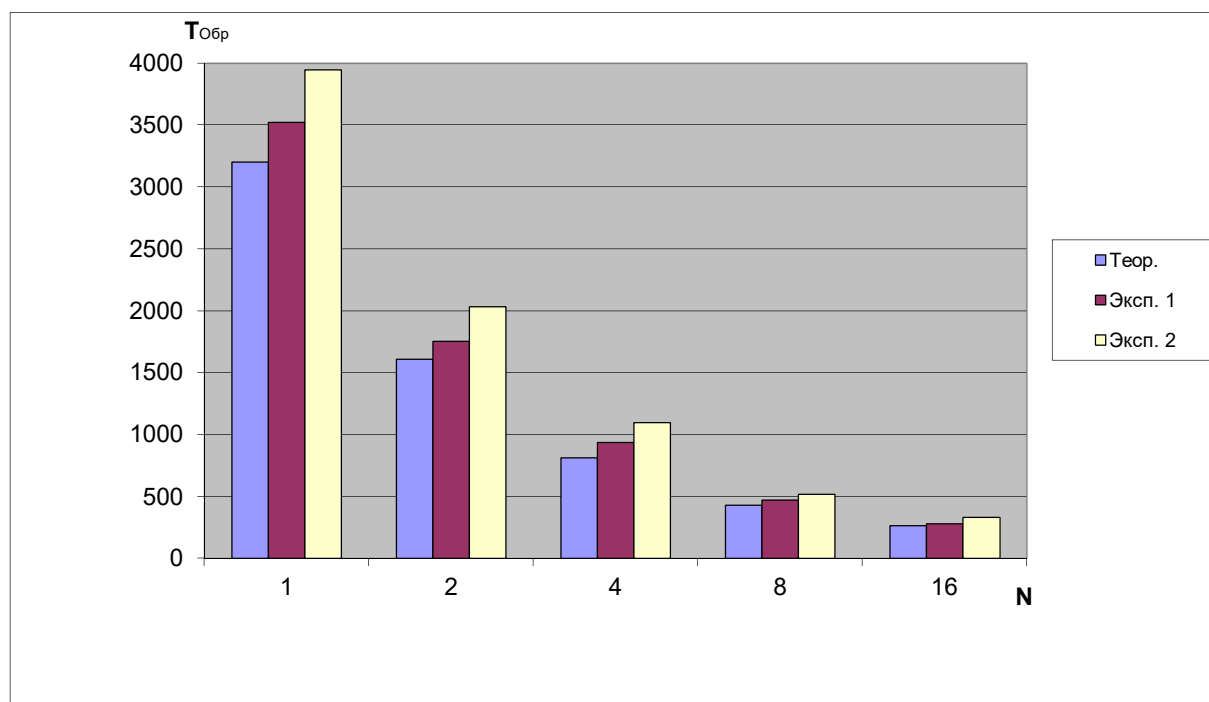
постороннего трафика повышенного уровня в локальной сети (в учебное время).

На рис. 14 представлены результаты экспериментов по передаче управляющих сообщений и копии агента с управляющего узла в Пензе на управляющий узел локальной сети в Москве через Интернет. Каждый агент загружал свою копию с одного компьютера в Пензе на другой волонтерский компьютер сети в Москве и копия затем возвращала обратно подтверждающее сообщение. На рис. 14 представлены зависимости среднего времени t одного «оборота» мобильного агента от номера эксперимента, при котором агент многократно (100 раз) запускался на удаленные узлы сети. Рисунки соответствуют четырем экспериментам, проведенным в различное время “будних” суток: рис. 14, а – утро, с 8 часов; рис. 14, б – обед, с 13 часов; рис. 14, в – вечер, с 19 часов; рис. 14, г – ночь, с 2 часов. Среднее время доставки копии управляющего агента составило 50-60 мс и в отдельные моменты времени изменялось скачками в связи с неравномерной загрузкой сети Интернет; тем не менее, все запланированные передачи агента состоялись и метакомпьютерное приложение получало задания на обработку условных данных по сценарию А.

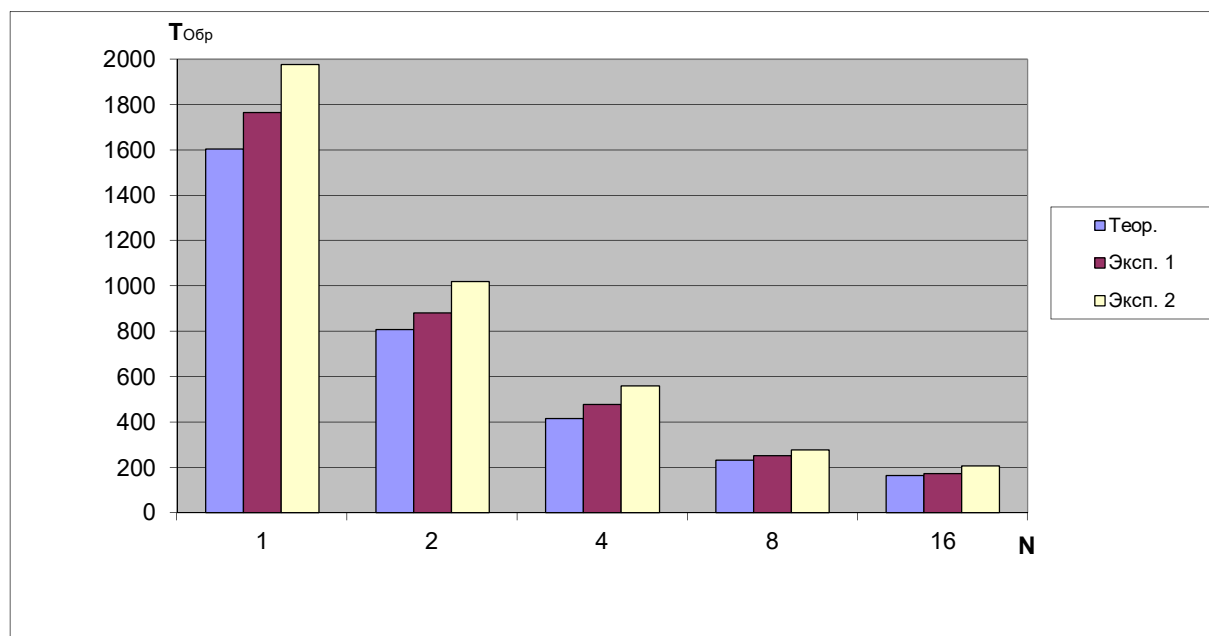
Главной целью проведенного эксперимента было доказательство работоспособности метакомпьютерного приложения в реальной сетевой среде. Эксперименты показали устойчивую рабо-

ту АБ МКС как в условиях постороннего трафика локальной сети, так и при использовании сети Интернет на неко-

тором ее участке с высоким уровнем постороннего для решаемой задачи трафика.



а) $T_{\text{Теор.}} = 3200$ мс, $T' = 4$ мс



б) $T_{\text{Теор.}} = 1600$ мс, $T' = 4$ мс

Рис. 13. Время решения задачи по сценарию А в локальной сети Fast Ethernet, 100 Мб ит/с, АБ МКС на платформе "JADE"

Fig. 13. Job execution time according to scenario A in the local network Fast Ethernet, 100 Mbps, AB MCS on the platform JADE

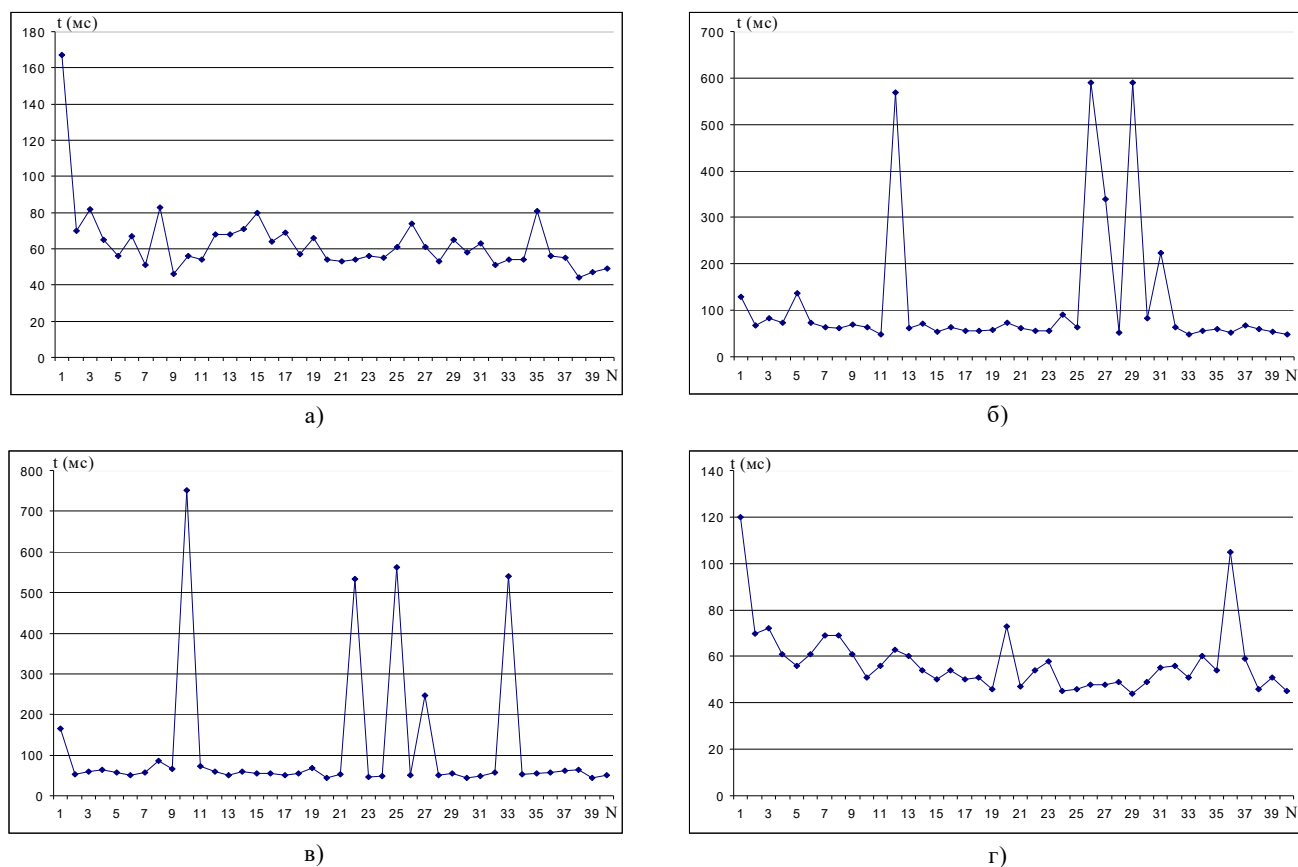


Рис. 14. Сеть Интернет, время передачи копии агента с квитированием на участке Пенза-Москва

Fig. 14. Average transfer time of an agent A0 with confirmation of its receipt on the Internet section Penza-Moscow

Сравнение показателей работы приложения по сценарию А с каким-либо прототипом не проводилось, поскольку почти все реальные метакомпьютерные и подобные им приложения в настоящее время ориентированы на обработку массовых данных в режиме “клиенты-сервер” или “мастер-слуги” и анализ производительности таких систем тривиален.

Выводы

В работе предложен подход к реализации распределенного метакомпьютерного приложения в среде компьютерной

сети на основе комплексного использования предметно-ориентированной мультиагентной системы и концепции агентно-ориентированного программирования в соответствии с заданным концептуальным графом, описывающим обмен сообщениями и обработку данных программными агентами. Использована динамично развивающаяся открытая мультиагентная платформа JADE, обеспечивающая широкий спектр функциональных возможностей при работе с агентами. Эта платформа является эффективной средой разработки и управления агентными приложениями в раз-

личных предметных областях, в том числе в области метакомпьютинга. В агентно-базированной среде эффективно реализуются межузловые взаимодействия по типу пиринговых; возможна организация параллельной обработки данных одним или многими агентами. Предлагаемые методы решения задач позволяют оперативно создавать

распределенные приложения, работающие в облачно-сетевой среде; время разработки и отладки при этом сокращается примерно на порядок. Проведенные эксперименты с базовой конфигурацией удаленного метакомпьютера показали работоспособность предложенной технологии создания распределенных агентно-базированных приложений.

Список литературы

1. Cohen-almagor R. The Future of the Internet. Academia Letters, 2021. P. 1-5. <https://doi.org/10.20935/AL1962>.
2. Digital economy report 2021. Cross-border data flows and development: for whom the data flow. Geneva, United Nations, 2021. 238 p.
3. Что такое метакомпьютинг (краткий обзор технологий организации распределенных вычислений в Интернете). URL: <https://parallel.ru/computers/reviews/meta-computing.html>. [Электронный ресурс]. Вид с экрана. Метод доступа свободный.
4. World Community Grid: Request for Proposal (RFP). 2020. P. 1–4. URL: <https://www.worldcommunitygrid.org/bg/rfp.pdf>. [Electronic resource]. Blank from the screen.
5. A New Massively Parallel And Distributed Virtual Machine Model Using Mobile Agents / M. Youssfi, O. Bouattane, J. Bakkoury, M. Bensalah // Conference: IEEE Conference: 4th International Conference on Multimedia Computing and Systems April 14-16, 2014 Marrakech - MOROCCO MSTI Mediterranean Space of Technology and Innovation. Morocco Chapter. April 14-16, 2014. P. 407-414. Marrakech, Morocco. <https://doi.org/10.1109/ICMCS.2014.6911306>.
6. Youssfi M., Bouattane O., Bensalah M. A Parallel Computational Model Based on Mobile Agents for High Performance Computing // Contemporary Engineering Sciences, 2015. Vol. 8, No. 15. P. 677-698. <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2015.55153>.
7. Agent-oriented model-driven development for JADE with the JADEL programming language / F. Bergenti, E. Iotti, S. Monica, A. Poggi // Comput. Lang. Syst. Struct. 2017. Vol. 50. P. 142–158. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93581-2_9.
8. Development of Mobile Agents With Aglets (A Java Based Tool) / M. Yadav, P. Sethi, D. Juneja, N. Chauhan // International Journal of Innovations & Advancement in Computer Science (IJIACS), Vol. 4, Special Issue, May 2015. P. 245-251.
9. Kravari K., Bassiliades N. A Survey of Agent Platforms // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. 2015. Vol. 18 (1), No. 11. P. 1-18.

10. Cynthia N., Gregory M. Tools of the Trade: A Survey of Various Agent Based Modeling Platforms // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 2009. Vol. 12, № 2. URL: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/2/2.html>. [Electronic resource]. Blank from the screen.
11. Survey: Agent-based Software Technology Under the Eyes of Cyber Security, Security Controls, Attacks and Challenges / B. Alluhaybi, M. S. Alrahal, A. Alzhrani, V. A. Thayanathan // *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, King Abdulaziz University (KAU), Jeddah, Saudi Arabia. 2019. Vol. 10, No. 8. P. 211-230.
12. Silva L., Meneguzzi F., Logan B. BDI Agent Architectures: A Survey // *Proceedings of the Twenty-Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence. Survey track*. – 2020. P. 4914-4921. DOI: <https://doi.org/10.24963/ijcai.2020/684>.
13. Faastlane: Accelerating Function-as-a-Service Workflows / S. Kotni, A. Nayak, V. Ganapathy, A. Basu // *Proceedings of the 2021 USENIX Annual Technical Conference*. July 14–16. 2021. P. 957-971.
14. Faas orchestration of parallel workloads / D. Barcelona-Pons, P. Garcia-Lopez, A. Ruiz, A. Gomez-Gomez, G. Paris, M. Sanchez-Artigas // *Proceedings of the 5th International Workshop on Serverless Computing*. 2019. P. 25-30. <https://doi.org/10.1145/3366623.3368137>.
15. On the FaaS Track: Building stateful distributed applications with serverless architectures / D. Barcelona-Pons, M. Sanchez-Artigas, G. Paris, P. Sutra, P. Garcia-Lopez // *ACM Middleware Conference*. 2019. P. 41-54. <https://doi.org/10.1145/3361525.3361535>.
16. Волчихин В. И., Зинкин С. А., Карамышева Н. С. Организация функционирования облачно-сетевых распределенных вычислительных систем с архитектурой «агенты как сервисы» // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2019. № 4. С. 27–50. <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2019-4-3>.
17. Разработка сетевых агентно-базированных приложений на основе метакомпьютерной технологии / В. И. Волчихин, Н. С. Карамышева, А. В. Горынина, С. А. Зинкин // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2021. № 4. С. 3–25. <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2021-4-1>.
18. Synthesis of the Functional Architecture of Agent-based Computing Systems when Using Conceptual Models of Artificial Intelligence / S. A. Zinkin, V. I. Volchihin, N. S. Karamysheva, M. S. Jaafar // *2021 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology, EMCTECH 2021. Proceedings, Austria, Vienna, 2021*. P. 1-6. <https://doi.org/10.1109/EMCTECH53459.2021.9619174>.
19. Dynamic Topology Transformation of Cloud-Network Computer Systems: Conceptual Level / S. A. Zinkin, V. I. Volchihin, N. S. Karamysheva, M. S. Jaafar // *2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology*,

ЕМСТЕCH 2020. Proceedings, Austria, Vienna, 2020. P. 1-10. <https://doi.org/10.1109/ЕМСТЕCH49634.2020.9261554>.

20. Зинкин С. А., Джафар М. С. Развитие информационно-коммуникационных инфраструктур распределенных вычислительных систем на основе концепции «Сеть – это компьютер» // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22. №4 (79). С. 75-93.

21. Зинкин С. А., Джафар М. С., Карамышева Н. С. Организация функционирования распределенных вычислительных систем с переменной архитектурой в виде облачного сервиса, формируемого по запросу клиента (реализация изменяемой системной архитектуры) // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего *плюс*. 2018. Т. 7. № 4 (44). С. 54-60.

22. Зинкин С. А., Джафар М. С., Карамышева Н. С. Организация функционирования распределенных вычислительных систем с переменной архитектурой в виде облачного сервиса, формируемого по запросу клиента (концептуальные графы распределенных алгоритмов) // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего *плюс*. 2018. Т. 7. № 4 (44). С. 136-146.

23. Bellifemine F. L., Caire G., Greenwood D. Developing multi-agent systems with JADE. Wiley, 2007. 300 p.

24. Java Agent Development Environment (JADE). URL: <http://jade.tilab.com/>. [Electronic resource]. Blank from the screen.

References

1. Cohen-almagor R. The Future of the Internet. Academia Letters, 2021. P. 1-5. <https://doi.org/10.20935/AL1962>.

2. Digital economy report 2021. Cross-border data flows and development: for whom the data flow. Geneva, United Nations, 2021. 238 p.

3. Chto takoe metakomp'yuting (kratkii obzor tekhnologii organizatsii graspredelennykh vychislenii v Internetе) [What is metacomputing (a brief overview of distributed computing technologies on the Internet)]. URL: <https://parallel.ru/computers/reviews/metacomputing.html>. [Elektronnyi resurs]. Vid s ekrana. Metod dostupa svobodnyi.

4. World Community Grid: Request for Proposal (RFP). 2020, pp. 1–4. URL: <https://www.worldcommunitygrid.org/bg/rfp.pdf>. [Electronic resource]. Blank from the screen.

5. Youssfi M., Bouattane O., Bakkoury J., Bensalah M. A New Massively Parallel And Distributed Virtual Machine Model Using Mobile Agents. *Conference: IEEE Conference: 4th International Conference on Multimedia Computing and Systems April 14-16, 2014 Marrakech - MOROCCO MSTI Mediterranean Space of Technology and Innovation*. Morocco

Chapter. April 14-16, 2014. pp. 407-414. Marrakech, Morocco. <https://doi.org/10.1109/ICMCS.2014.6911306>.

6. Youssfi M., Bouattane O., Bensalah M. A Parallel Computational Model Based on Mobile Agents for High Performance Computing. *Contemporary Engineering Sciences*, 2015, vol. 8, no. 15, pp. 677-698. <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2015.55153>.

7. Bergenti F., Iotti E., Monica S., Poggi A. Agent-oriented model-driven development for JADE with the JADEL programming language. *Comput. Lang. Syst. Struct.*, 2017, vol. 50, pp. 142–158. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93581-2_9.

8. Yadav M., Sethi P., Juneja D., Chauhan N. Development of Mobile Agents With Agents (A Java Based Tool). *International Journal of Innovations & Advancement in Computer Science (IJACS)*, may 2015, vol. 4, Special Issue, pp. 245-251.

9. Kravari K., Bassiliades N. A Survey of Agent Platforms. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2015, vol. 18 (1), no. 11, pp. 1-18.

10. Cynthia N., Gregory M. Tools of the Trade: A Survey of Various Agent Based Modeling Platforms. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2009, vol. 12, no. 2. URL: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/2/2.html>. [Electronic resource]. Blank from the screen.

11. Alluhaybil B., Alrahhal M. S., Alzhrani A., Thayananthan V. A Survey: Agent-based Software Technology Under the Eyes of Cyber Security, Security Controls, Attacks and Challenges. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, King Abdulaziz University (KAU), Jeddah, Saudi Arabia, 2019, vol. 10, no. 8. P. 211-230.

12. Silva L., Meneguzzi F., Logan B. BDI Agent Architectures: A Survey. *Proceedings of the Twenty-Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence. Survey track*, 2020, pp. 4914-4921. <https://doi.org/10.24963/ijcai.2020/684>.

13. Kotni S., Nayak A., Ganapathy V., Basu A. Faastlane: Accelerating Function-as-a-Service Workflows. *Proceedings of the 2021 USENIX Annual Technical Conference*. July 14–16, 2021, pp. 957-971.

14. Barcelona-Pons D., Garcia-Lopez P., Ruiz A., Gomez-Gomez A., Paris G., Sanchez-Artigas M. Faas orchestration of parallel workloads. *Proceedings of the 5th International Workshop on Serverless Computing*, 2019, pp. 25-30. <https://doi.org/10.1145/3366623.3368137>.

15. Barcelona-Pons D., Sanchez-Artigas M., Paris G., Sutra P., Garcia-Lopez P. On the FaaS Track: Building stateful distributed applications with serverless architectures. *ACM Middleware Conference*, 2019, pp. 41-54. <https://doi.org/10.1145/3361525.3361535>.

16. Volchikhin V. I., Zinkin S. A., Karamysheva N. S. Organizatsiya funktsionirovaniya oblachno-setevykh raspredelennykh vychislitel'nykh sistem s arkhitekturoi «agenty kak servisy» [Organization of functioning of cloud-network distributed computing systems

with the architecture "agents as services"]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya vyshev uchebnykh zavedeniy. Volga region. Technical sciences*, 2019. no. 4, pp. 27–50. <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2019-4-3>

17. Volchikhin V. I., Karamysheva N. S., Gorynina A. V., Zinkin S. A. Razrabotka setevykh agentno-bazirovannykh prilozhenii na osnove metakomp'yuternoï tekhnologii [Development of network agent-based applications based on metacomputer technology]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki = Izvestia of higher educational institutions. Volga region. Technical Sciences*. 2021, no. 4, pp. 3–25. <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2021-4-1>.

18. Zinkin S. A., Volchihin V. I., Karamysheva N. S., Jaafar M. S. Synthesis of the Functional Architecture of Agent-based Computing Systems when Using Conceptual Models of Artificial Intelligence. *2021 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology, EMCTECH 2021. Proceedings*, Austria, Vienna, 2021, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/EMCTECH53459.2021.9619174>.

19. Zinkin S. A., Volchihin V. I., Karamysheva N. S., Jaafar M. S. Dynamic Topology Transformation of Cloud-Network Computer Systems: Conceptual Level. *2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology, EMCTECH 2020. Proceedings*, Austria, Vienna, 2020, pp. 1-10. <https://doi.org/10.1109/EMCTECH49634.2020.9261554>.

20. Zinkin S. A., Dzhafer M. S. Razvitiye informatsionno-kommunikatsionnykh infrastruktur raspredelennykh vychislitel'nykh sistem na osnove kontseptsii «Set' – eto komp'yuter» [Development of information and communication infrastructure of distributed computing systems based on the concept "Network is a computer"]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2018, vol. 22, no. (79), pp. 75-93.

21. Zinkin S. A., Dzhafer M. S., Karamysheva N. S. Organizatsiya funktsionirovaniya raspredelennykh vychislitel'nykh sistem s peremennoi arkhitekturoi v vide oblachnogo servisa, formiruемого po zaprosu klienta (realizatsiya izmenyaemoi sistemnoi arkhitektury) [Organization of the functioning of distributed computing systems with variable architecture in the form of a cloud service formed at the request of the client (implementation of a changeable system architecture)]. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus = XXI century: the results of the past and the problems of the present plus*, 2018, vol. 7, no. 4 (44), pp. 54-60.

22. Zinkin S. A., Dzhafer M. S., Karamysheva N. S. Organizatsiya funktsionirovaniya raspredelennykh vychislitel'nykh sistem s peremennoi arkhitekturoi v vide oblachnogo servisa, formiruемого po zaprosu klienta (kontseptual'nye grafy raspredelennykh algoritmov) [Organization of functioning of distributed computing systems with variable architecture in the form of a cloud service formed at the request of the client (conceptual graphs of distrib-

uted algorithms]. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus = XXI century: results of the past and problems of the present plus*. 2018, vol. 7, no. 4 (44), pp. 136-146.

23. Bellifemine F. L., Caire G., Greenwood D. Developing multi-agent systems with JADE. Wiley, 2007, 300 p.

24. Java Agent Development Environment (JADE). URL: <http://jade.tilab.com/>. Blank from the screen.

Информация об авторах / Information about the Authors

Карамышева Надежда Сергеевна, кандидат технических наук, доцент, Пензенский государственный университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: karamyshevans@yandex.ru

Nadezhda S. Karamysheva, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Penza State University, Penza, Russian Federation, e-mail: karamyshevans@yandex.ru

Свищев Данил Сергеевич, магистрант, Пензенский государственный университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: vt@pnzgu.ru

Danil S. Svishchev, Master Student, Penza State University, Penza, Russian Federation, e-mail: vt@pnzgu.ru

Попов Константин Владимирович, кандидат технических наук, доцент, Пензенский государственный университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: vt@pnzgu.ru

Konstantin V. Popov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Penza State University, Penza, Russian Federation, e-mail: vt@pnzgu.ru

Зинкин Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор, Пензенский государственный университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: zsa49@yandex.ru

Sergey A. Zinkin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Penza State University, Penza, Russian Federation, e-mail: zsa49@yandex.ru

К сведению авторов

1. К публикации в журнале «Известия Юго-Западного государственного университета» принимаются актуальные материалы, содержащие новые результаты научных и практических исследований, соответствующие профилю журнала, не опубликованные ранее и не переданные в редакции других журналов.

2. Авторы статей должны представить в редакцию журнала:

- статью, оформленную в соответствии с правилами оформления статей, представляемых для публикации в журнале;

- разрешение на опубликование в открытой печати статьи от учреждения, в котором выполнена работа.

- сведения об авторах (фамилия, имя отчество, место работы, должность, ученая степень, звание, почтовый адрес, телефон, e-mail);

- лицензионный договор.

3. Бумажный вариант статьи подписывается всеми авторами.

4. Редакция не принимает к рассмотрению рукописи, оформленные не по правилам.

5. Публикация бесплатная.

6. Основной текст рукописи статьи (кроме аннотации и ключевых слов) набирают в текстовом редакторе MS WORD шрифтом «Times New Roman» размером 14 пт с одинарным интервалом, выравнивание по ширине. Поля с левой стороны листа, сверху и снизу – 2,5 см, с правой стороны – 2 см. Абзацный отступ – 1,5 см.

7. Схема построения публикации: УДК (индекс по универсальной десятичной классификации), фамилия и инициалы автора(ов) с указанием ученой степени, звания, места работы (полностью), электронного адреса (телефона), название (строчные), аннотация и ключевые слова, текст с рисунками и таблицами, список литературы. Авторы, название, аннотация и ключевые слова, список литературы приводятся на русском и английском языках.

Перед основным текстом печатается аннотация (200-250 слов), отражающая краткое содержание статьи.

8. При формировании текста не допускается применение стилей, а также внесение изменения в шаблон или создание собственного шаблона. Слова внутри абзаца следует разделять одним пробелом; набирать текст без принудительных переносов; не допускаются разрядки слов.

9. Для набора формул и переменных следует использовать редактор формул MathType версии 5.2 и выше с размерами: обычный – 12 пт; крупный индекс 7 пт, мелкий индекс – 5 пт; крупный символ – 18 пт; мелкий символ – 12 пт.

Необходимо учитывать, что **полоса набора – 75 мм**. Если формула имеет больший размер, ее необходимо упростить или разбить на несколько строк. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**

Все русские и греческие буквы (Ω , η , β , μ , ω , ν и др.) в формулах должны быть набраны прямым шрифтом. Обозначения тригонометрических функций ($\sin$, $\cos$, $\tg$ и т.д.) – прямым шрифтом. Латинские буквы – прямым шрифтом.

Статья должна содержать лишь самые необходимые формулы, от промежуточных выкладок желательно отказаться.

10. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

11. Рисунки и таблицы располагаются по тексту. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Иллюстрации, встраиваемые в текст, должны быть выполнены в одном из стандартных форматов (TIFF, JPEG, PNG) с разрешением не ниже 300 dpi и публикуются в черно-белом (градации серого) варианте. Качество рисунков должно обеспечивать возможность их полиграфического воспроизведения без дополнительной обработки. **Рисунки, выполненные в MS Word, недопустимы.**

Рисунки встраиваются в текст через опцию «Вставка-Рисунок-Из файла» с обтеканием «В тексте» с выравниванием по центру страницы без абзацного отступа. Иные технологии вставки и обтекания **не допускаются.**

12. **Список литературы к статье 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>.