

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия
Юго-Западного
государственного
университета

Научный журнал

Том 28 № 3 / 2024



Proceedings
of the Southwest
State University

Scientific Journal

Vol. 28 № 3 / 2024



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

Научный рецензируемый журнал

Основан в 1997 г.

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

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

В журнале публикуются оригинальные работы, соответствующие тематике издания.

Публикация статей в журнале для авторов бесплатна.

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

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

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

Машиностроение и машиноведение: 2.5.4; 2.5.5; 2.5.8.

Строительство: 2.1.1; 2.1.3; 2.1.9.

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Черный Сергей Григорьевич, канд. техн. наук, доцент, Керченский государственный морской технологический университет (г. Керчь, Россия);

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

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Емельянов Сергей Геннадьевич (председатель), д-р техн. наук, профессор, чл.-кор. Российской академии архитектуры и строительных наук, Юго-Западный государственный университет» (г. Курск, Россия)

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

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

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 (Россия);

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

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

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

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

Адрес учредителя, издателя и редакции:

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

Телефон: +7(4712) 22-25-26,

Факс: +7(4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (ПИ №ФС77-85895 от 04.09.2023).

ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

Префикс DOI:10.21869

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

© Юго-Западный государственный университет, 2024



Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License

Типография:

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

Подписка и распространение:
журнал распространяется
по подписке.

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

Периодичность: четыре выпуска в год

Свободная цена

Оригинал-макет подготовлен Е.В. Мельник

Подписано в печать 30.09.2024.

Дата выхода в свет 11.12.2024. Формат 60х84/8.

Бумага офсетная. Усл.печ.л. 30,8.

Тираж 1000 экз. Заказ 50.

16+

Proceedings of the Southwest State University



Peer-reviewed scientific journal

Published since 1997

Before 2011

“Proceedings of the Kursk State Technical University”

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

The journal publishes scientific articles in the above mentioned areas.

All papers are published free of charge.

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

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

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

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

Construction: 2.1.1; 2.1.3; 2.1.9.

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

EDITOR-IN-CHIEF

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

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITORIAL COUNCIL

Sergei G. Emelianov, Chairman, Dr. of Sci. (Engineering),
Correspondent Member of the Russian Academy
of Architecture and Construction Sciences, Southwest State
University (Kursk, Russia)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Founder and Publisher:

“Southwest State University”

Official address of the Founder, Publisher and Editorial Office:

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

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

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

E-mail: rio_kursk@mail.ru

The Journal is officially registered by:

The Federal Supervising Authority in the Field of Communication,
Information Technology and Mass media
(ПИ №ФС77-85895 от 04.09.2023).

ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

DOI Prefix: 10.21869

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

Printing office:

Printing Center

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, 2024



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

Singed to print 30.09.2024.
Release date 11.12.2024. Format 60x84/8.
Offset paper. Printer's sheets 30,8.
Circulation 1000 copies. Order 50.

16+

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Оригинальные статьи

Оценка параметров контактного взаимодействия и изнашивания деталей с цилиндрическими поверхностями трения	10
---	----

Горленко А.О., Агеев Е. В., Шевцов М.Ю.

Исследование влияния угла наклона приемной поверхности на величину смещения единичного наплавленного слоя при аддитивном формообразовании электрической дугой в среде защитного газа	25
--	----

Куц В. В., Гречухин А. Н., Привалов А. С.

СТРОИТЕЛЬСТВО

Оригинальные статьи

Тепловые аккумуляторы фазового перехода на основе парафина	36
--	----

Милёхин М. И., Умеренков Е. В.

Методика выбора энергоэффективных теплоизоляционных материалов с помощью среды визуального программирования Dynamo	50
--	----

Чакин Е. Ю., Гамаюнова О. С.

Защитное покрытие строительных конструкций от криогенного воздействия на основе цементных плит	69
--	----

Гравит М. В., Недвига Е. С.

Расчет складчатых панелей из текстильно-армированного бетона по методу предельных усилий	82
--	----

Донцова А. Е., Столяров О. Н.

Static analysis of stay cables under the varying chord strength of the cable failure inspection in cable-stayed bridges	100
---	-----

Ahmed Ramadan Ahmed Ahmed, Ermoshin N. A.

Исследование аэродинамических параметров воздухораспределителей при взаимодействии круглых несоосных струй	119
--	-----

Зайцев О.Н., Семичева Н.Е., Бурцев А.П., Зайцева Е.О.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Оригинальные статьи

Когнитивная пиринговая инфраструктура для организации коллективной работы над проектами на основе agile-методологии	131
---	-----

Карамышева Н.С., Александров В.С., Кирюткин И.А., Зинкин С.А.

Математическое моделирование работы технологической линии многофункциональной установки подготовки топливного газа (МУПГ) для совершенствования ее безаварийного функционирования	164
---	-----

Березняк В. Н., Бажанов А.Г.

Алгоритмизация ведения боевых действий по тушению пожаров в инфекционных отделениях медицинских учреждений	184
<i>Денисов А.Н., Садыков И.И., Данилов М.М., Кляузов А.Ю., Шевцов М.В. , Мареев М.А.</i>	
Совершенствование математических методов обеспечения безопасности на основе анализа видеоряда в реальном времени	201
<i>Абрамов М.В., Аверченков А. В.</i>	
Разработка метода локализации в замкнутой и насыщенной объектами среде	214
<i>Мостаков Н. А., Захарова А. А.</i>	
Преимущества применения вариационных интеграторов на группах Ли в задачах моделирования динамики механических систем	228
<i>Моисеев И. С., Жиленков А. А.</i>	
Обработка вычислительной системой зашумленных конструктивных входных данных	245
<i>Локтионов А. П., Ватулин Э. И.</i>	
К сведению авторов	265

CONTENT

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original articles

Evaluation of the parameters of contact interaction and wear of parts with cylindrical friction surfaces	10
---	-----------

Gorlenko A. O., Ageev E. V., Shevtsov M. Yu.

Investigation of the effect of the angle of inclination of the receiving surface on the displacement of a single deposited layer during additive shaping by an electric arc in a protective gas medium	25
---	-----------

Kuts V. V., Grechukhin A. N., Privalov A. S.

CONSTRUCTION

Original articles

Thermal accumulators of phase change based on paraffin	36
---	-----------

Milekhin M. I., Umerenkov E. V.

Methodology for selecting energy-efficient thermal insulation materials using the Dynamo visual programming environment	50
--	-----------

Chakin E. Y., Gamayunova O. S.

Protective coating of steel structures from cryogenic effects based on cement slabs	69
--	-----------

Gravit M. V., Nedviga E. S.

Ultimate limit-state design of textile-reinforced concrete folded floor panels	82
---	-----------

Dontsova A. E., Stolyarov O. N.

Static analysis of stay cables under the varying chord strength of the cable failure inspection in cable-stayed bridges	100
--	------------

Ahmed Ramadan Ahmed, Ermoshin N. A.

Study of aerodynamic parameters of air distributors during interaction of round non-coaxial jets	119
---	------------

Zaitsev O.N., Semicheva N.E., Burtsev A.P., Zaitseva E.O.

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Original articles

Cognitive peering infrastructure for the organization teamwork on projects based on agile methodology	131
--	------------

Karamysheva N. S., Alexandrov V. S., Kiryutkin I. A., Zinkin S. A.

Mathematical modelling of the process line of a multifunctional fuel gas preparation unit (MGPU) to improve its accident-free operation	164
--	------------

Bereznyak V. N., Bazhanov A. G.

Algorithmization of combat operations to extinguish fires in infectious diseases departments of medical institutions	184
<i>Denisov A. N., Sadykov I. I., Danilov M. M., Klyauzov A Yu., Shevtsov M. V., Mareev M. A.</i>	
Improvement of mathematical methods for ensuring security based on real-time video sequence analysis	201
<i>Abramov M. V., Averchenkov A. V.</i>	
Development of a method for localizing objects in a closed and saturated environment.....	214
<i>Mostakov N. A., Zakharova A. A.</i>	
Advantages of application of variational integrators on Lie groups in problems of modeling the dynamics of mechanical systems	228
<i>Moiseev I. S., Zhilenkov A. A.</i>	
Measuring-polynomial processing of input data of a computer system	245
<i>Loktionov A. P., Vatutin E. I.</i>	
Information of the authors	265

УДК 621.762

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-10-24>



Оценка параметров контактного взаимодействия и изнашивания деталей с цилиндрическими поверхностями трения

А.О. Горленко ¹, Е. В. Агеев ²✉, М.Ю. Шевцов ¹

¹ Брянский государственный университет
бул. 50 лет Октября, д. 7, г. Брянск 241035, Российская Федерация

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

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Резюме

Целью представляемой работы являлась оценка различных факторов, влияющих на процесс изнашивания деталей с цилиндрическими поверхностями трения, которая позволит смоделировать их контактное взаимодействие с учетом параметров шероховатости и физико-механических свойств поверхностного слоя.

Методы. Моделирование процесса контактного взаимодействия цилиндрических поверхностей выполнено при рассмотрении скользящего контакта двух цилиндрических поверхностей, представляемого в виде контакта гладкой упругой втулки и вала с приведенными (эквивалентными) значениями параметров шероховатости. При моделировании учитываются упругие деформации сопряженных тел, а также упругопластические деформации микронеровностей. При моделировании геометрического контакта рассматривается некоторый участок цилиндрической поверхности, расположенный вдоль образующей в сечении цилиндра плоскостью, проходящей через его ось. Данный участок цилиндрической поверхности рассматривается как элементарная площадка общей геометрической площади контакта цилиндрических поверхностей и представляет собой участок цилиндрической поверхности, ширина которого определяется длиной большей оси эллипса в основании эллиптического параболоида при моделировании шероховатой поверхности.

Результаты. На основе моделирования контактного взаимодействия цилиндрических поверхностей установлены основные факторы, влияющие на процесс их изнашивания, такие как: фактическая площадь контакта; величина сближения контактирующих поверхностей; фактическое давление; интенсивность изнашивания сопрягаемых цилиндрических поверхностей. Предложена кинетическая модель изнашивания, учитывающая параметры шероховатости и физико-механических свойств поверхностного слоя.

Заключение. На основе предложенной модели изнашивания деталей с цилиндрическими поверхностями трения, учитывающей параметры шероховатости и физико-механических свойств поверхностного слоя, стало возможным обеспечивать требуемую интенсивность изнашивания цилиндрических поверхностей трения.

Ключевые слова: контактное взаимодействие; качество поверхностного слоя; трение; изнашивание; износостойкость; модель изнашивания.

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

Для цитирования: Горленко А.О., Агеев Е. В., Шевцов М. Ю. Оценка параметров контактного взаимодействия и изнашивания деталей с цилиндрическими поверхностями трения // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №3. С. 10-24. [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2024-28-3-10-24](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-10-24).

Поступила в редакцию 18.06.2024

Подписана в печать 23.07.2024

Опубликована 30.09.2024

Evaluation of the parameters of contact interaction and wear of parts with cylindrical friction surfaces

Alexandr O. Gorlenko ¹, Evgeny V. Ageev ² ✉, Mikhail Yu. Shevtsov ¹

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

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

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Abstract

The purpose of the presented research work was to evaluate various factors affecting the wear process of parts with cylindrical friction surfaces, which will allow to simulate their contact interaction taking into account the parameters of roughness and physico-mechanical properties of the surface layer.

Methods. Modeling of the process of contact interaction of cylindrical surfaces is performed by considering the sliding contact of two cylindrical surfaces, represented as the contact of a smooth elastic sleeve and a shaft with the given (equivalent) values of roughness parameters. The modeling takes into account elastic deformations of conjugate bodies, as well as elastic-plastic deformations of micro-dimensions. When modeling a geometric contact, a certain section of the cylindrical surface is considered, located along the plane forming in the section of the cylinder passing through its axis. This section of the cylindrical surface is considered as an elementary area of the total geometric contact area of cylindrical surfaces and is a section of a cylindrical surface, the width of which is determined by the length of the larger axis of the ellipse at the base of the elliptical paraboloid when modeling a rough surface.

Results. Based on the modeling of the contact interaction of cylindrical surfaces, the main factors influencing the process of their wear are established, such as: the actual contact area; the amount of convergence of the contacting surfaces; the actual pressure; the intensity of wear of the mating cylindrical surfaces. A kinetic wear model is proposed that takes into account the parameters of the roughness and physico-mechanical properties of the surface layer.

Conclusion. Based on the proposed model of wear of parts with cylindrical friction surfaces, taking into account the parameters of roughness and physico-mechanical properties of the surface layer, it became possible to provide the required intensity of wear of cylindrical friction surfaces.

Keywords: contact interaction; surface layer quality; friction; wear; wear resistance; wear model.

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

For citation: Gorlenko A. O., Ageev E. V., Shevtsov M. Yu. Evaluation of the parameters of contact interaction and wear of parts with cylindrical friction surfaces. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(3): 10-24 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-10-24>.

Received 18.06.2024

Accepted 23.07.2024

Published 30.09.2024

Введение

В настоящее время основные теории трения и изнашивания охватывают в основном только молекулярные (адгезионные) и механические (деформационные) составляющие процесса и не учитывают параметры качества обработки сопряженных поверхностей трения [1-5].

Подавляющее большинство моделей контактного взаимодействия разработано трибологами в большей степени для номинально плоских поверхностей и в меньшей степени ими изучен контакт цилиндрических поверхностей. Недостатком известных методик расчета является то, что параметры качества поверхностного слоя учитываются не в полной мере, а контакт цилиндрических сводится к контакту номинально плоских поверхностей. В то же время, на сегодняшний день остается не изученным подход, позволяющий моделировать контакт цилиндрических поверхностей с учетом параметров шероховатости и физико-механических свойств поверхностного слоя [6-10].

Для устранения имеющего место пробела для контакта цилиндрических поверхностей трения типа «вал – втулка» предлагается модель контактного взаимодействия, рассматривающая фактическую площадь контакта цилиндрических поверхностей трения с учетом

физико-механических свойств поверхностного слоя.

Целью настоящей работы являлось изучение подхода к оценке параметров контактного взаимодействия и изнашивания деталей с цилиндрическими поверхностями трения, позволяющего моделировать контакт цилиндрических поверхностей с учетом параметров шероховатости и физико-механических свойств поверхностного слоя.

Материалы и методы

Моделирование процесса контактного взаимодействия контактного взаимодействия и изнашивания деталей с цилиндрическими поверхностями трения рассмотрено на примере скользящего контакта двух цилиндрических поверхностей, представляемого в виде контакта гладкой упругой втулки и вала с приведенными (эквивалентными) значениями параметров шероховатости. При этом учитываются упругие деформации сопряженных тел, а также упругопластические деформации микронеровностей.

При моделировании геометрического контакта рассматривается некоторый участок цилиндрической поверхности, расположенный вдоль образующей в сечении цилиндра плоскостью, проходящей через его ось. Данная элементарная площадка является лишь не-

которой частью общей геометрической площади контакта цилиндрических поверхностей и представляет собой участок цилиндрической поверхности, ширина которого определяется длиной большей оси эллипса в основании эллиптического параболоида при моделировании шероховатой поверхности [11-15].

Результаты и их обсуждение

Допуская, что на всей поверхности трения цилиндрической поверхности контактное взаимодействие происходит аналогично рассматриваемому участку, необходимо ввести масштабный коэффициент, определяющий его размеры.

$$K_o = \pi D / (2\sqrt{qR_{max}}), \quad (1)$$

где D – диаметр вала; q – один из параметров, определяющих форму поверхности эллиптического параболоида; R_{max} – максимальная высота профиля шероховатости.

На участках геометрической площади контакта цилиндрической поверхности моделируется шероховатая поверхность, модель которой представляет собой набор деформируемых под нагрузкой эллиптических параболоидов 2-го порядка, вершины которых имеют определенный закон распределения (рис. 1).

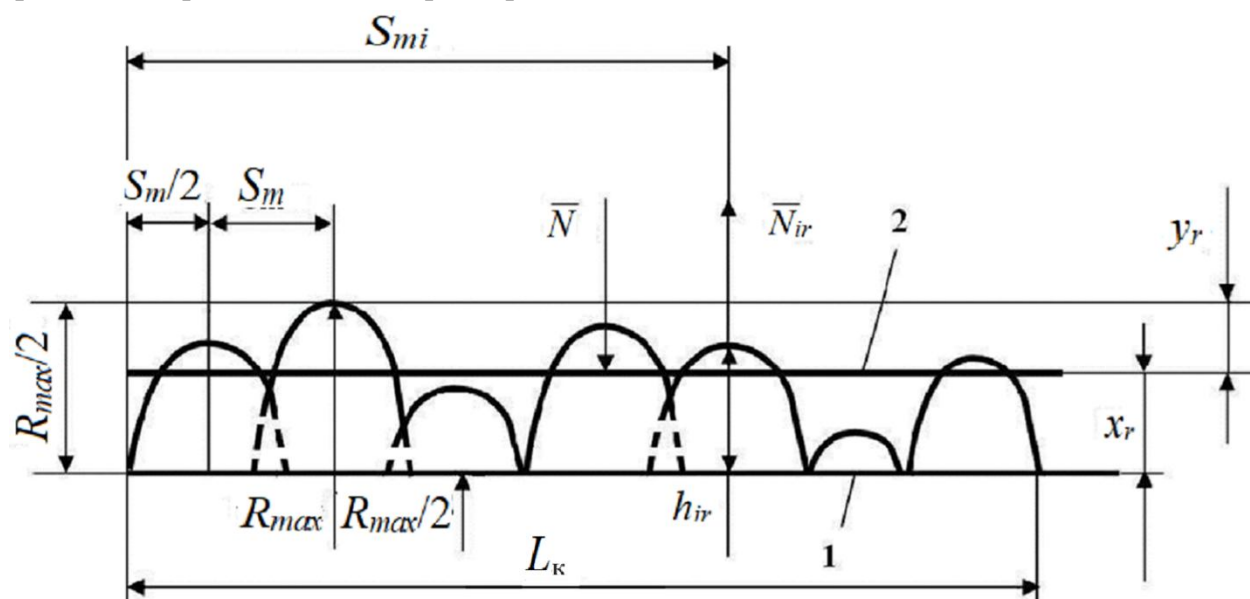


Рис. 1. Схема моделирования контакта цилиндрических поверхностей (расчетная): **1,2** – соответственно поверхности вала и втулки; L_k – длина площадки контакта; y_r – сближение контактирующих поверхностей; x_r – уровень сечения модели поверхности; h_{ir} – высота i -го выступа модели шероховатой поверхности; S_m – средний шаг неровностей профиля шероховатости по средней линии; N_{ir} – реакция i -го выступа; N – внешняя приложенная сила

Fig. 1. The scheme of modeling the contact of cylindrical surfaces (calculated): **1,2** – respectively, the surfaces of the shaft and sleeve; L_k – the length of the contact area; y_r – the convergence of the contacting surfaces; x_r – the cross-section level of the surface model; h_{ir} – the height of the i -th projection of the rough surface model; S_m – the average step of roughness profile irregularities along the median line; N_{ir} – reaction i -of the protrusion; N – the external applied force

Для этой модели сечения, получаемые от пересечения профиля шероховатости плоскостью, перпендикулярной средней плоскости, будут параболоидами 2-го порядка, а плоскостью, параллельной средней плоскости – эллипсами (рис. 2).

Учитывая [16-20], площадь сечения i -го параболоида на уровне x_r определится выражением

$$P_{ir} = z\pi p_r^2 (h_{ir} - x_r) / h_{ir}, \quad (2)$$

где z – коэффициент, учитывающий соотношение длин осей эллиптических параболоидов.

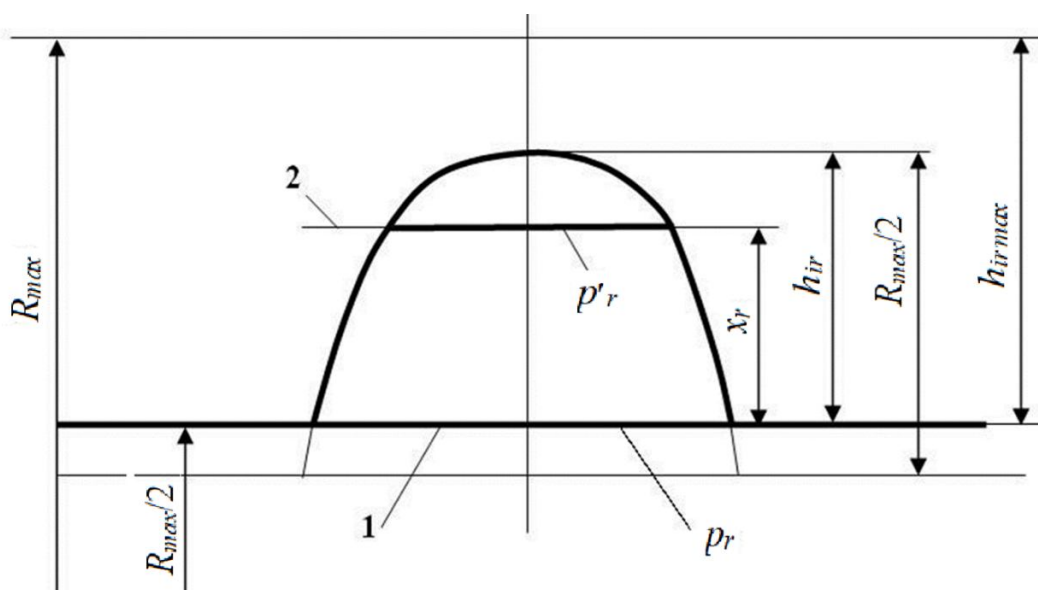


Рис. 2. Форма выступов модели шероховатой поверхности: **1, 2** – контактирующие поверхности трения; p_r, p'_r – соответственно длины поперечных осей эллипсов на уровне средней плоскости и уровне сечения x_r

Fig. 2. The shape of the protrusions of the rough surface model: **1, 2** – contacting friction surfaces; p_r, p'_r – respectively the lengths of the transverse axes of the ellipses at the level of the middle plane and the cross-section level x_r

Закон и параметры распределения высот выступов параболоидов находятся, исходя из условия равенства относительных опорных площадей профиля реальной поверхности и модели. Представим функцию плотности распределения высот выступов в виде экспоненциальной функции

$$(h_r) = \lambda e^{-\lambda(h_r - R_{max}/2)}, \quad (3)$$

где λ – параметр распределения.

Учитывая изменение значений высот выступов шероховатости (рис. 2, 3)

$h_{ir} \in [R_{max}/2; R_{max}]$, будем иметь

$$f(h_r) = \begin{cases} \lambda \exp(-\lambda[h_r - R_{max}/2]), & R_{max}/2 \leq h_r \leq R_{max} \\ 0, & h_r < R_{max}/2, h_r > R_{max}. \end{cases}$$

$$\begin{aligned} R_{max}/2 \leq h_r \leq R_{max} \\ h_r < R_{max}/2, h_r > R_{max}. \end{aligned} \quad (4)$$

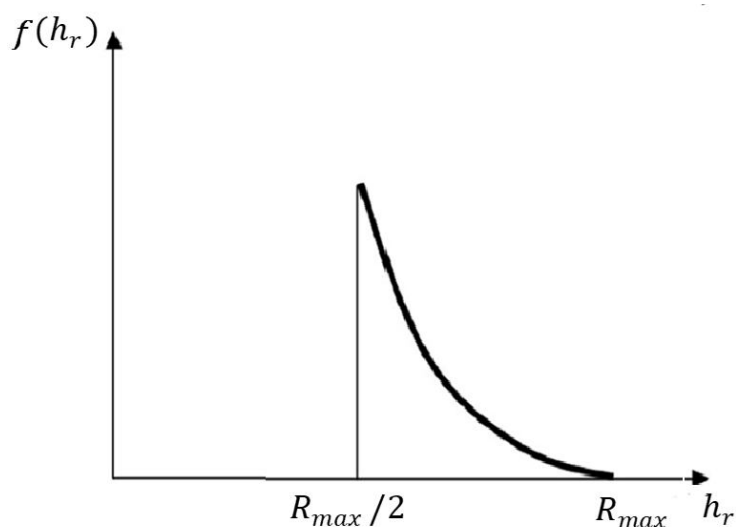


Рис. 3. Функция плотности распределения высот выступов модели

Fig. 3. The density function of the distribution of the heights of the protrusions of the model

Тогда функция (закон) распределения высот выступов (рис. 4) будет иметь вид

$$F(h_r) = \int (h_r) dh_r, \quad (5)$$

а с учетом (3) и пределов изменения значений h_r

$$F(h_r) = \begin{cases} 0; & h_r \leq R_{max}/2 \\ 1 - \exp(-\lambda[h_r - R_{max}/2]); & R_{max}/2 \leq h_r \leq R_{max} \\ 1; & h_r > R_{max}. \end{cases} \quad (6)$$

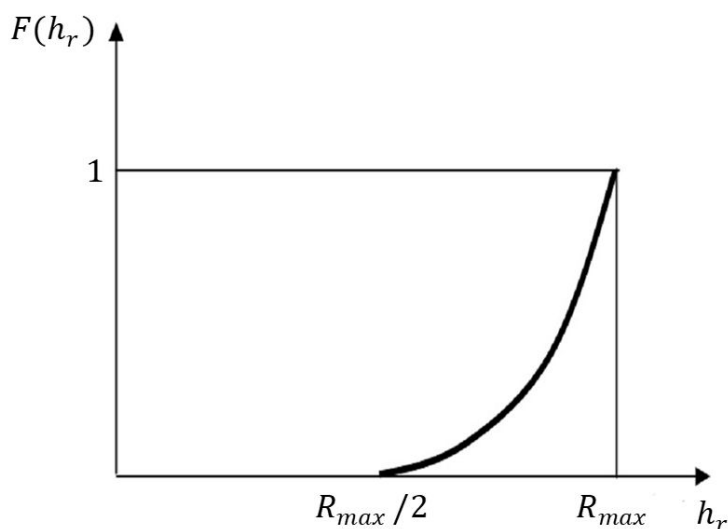


Рис. 4. Функция (закон) распределения высот выступов модели

Fig. 4. The function (law) of the distribution of the heights of the protrusions of the model

Значения высот выступов будут определяться в результате решения уравнения $F(\xi) = h$, где h – случайная величина, равномерно распределенная на отрезке $[0; 1]$, который является областью изменения функции $F(h_r)$.

Случайная величина ξ имеет плотность распределения, аналогичную $f(h_r)$. Тогда

$$\eta = 1 - \exp(-\lambda[\xi - R_{\max}/2]). \quad (7)$$

Из (7) найдем

$$\xi = R_{\max}(0,5 - \ln(1 - \eta)/\lambda). \quad (8)$$

С учетом (6) и (8) высоты выступов распределяются следующим образом:

$$h_{ir} = \begin{cases} R_{\max}/2; \\ R_{\max}(0,5 - \ln(1 - \eta)/\lambda); \\ R_{\max}; \end{cases}$$

$$\eta = 0$$

$$0 < \eta < \exp(-\lambda R_{\max}/2)$$

$$\exp(-\lambda R_{\max}/2) \leq \eta \leq 1. \quad (9)$$

Параметр распределения l , непосредственно влияющий на характер кривой $f(h_r)$, находится, исходя из равенства относительных опорных площадей профиля реальной поверхности $t_p(x_r)$ и модели $\tilde{P}_r(x_r)$ на уровне сечения x_r , при решении уравнения

$$Z \int_{R_{\max}/2}^{R_{\max}} \left[\tilde{P}_r(x_r) - t_p(x_r) \right]^2 dx_r. \quad (10)$$

После интегрирования (10) будем иметь значение l , определяемое из кубического уравнения

$$0,024\lambda^3 + \frac{0,6b(2^{v+2}-1)}{(v+2)2^{v+2}} + \frac{b(1-2^{v+2})}{(v+2)2^{v+2}} + \frac{1,38b(2^{v+2}-1)}{(v+2)2^{v+2}} = 0, \quad (11)$$

решаемого с помощью приближенных методов на ЭВМ.

Площадь сечения i -го параболоида для участков фактической площади контакта с учетом упругих деформаций выступов

$$P_{ir} = \pi p_r^2 (h_{ir} - x_r - y_{уп.r}) / h_{ir}, \quad (12)$$

где величина упругих деформаций

$$y_{уп.r} = (1 - \mu^2) c k \sigma_T P_{ir} / (\pi E). \quad (13)$$

Реакция каждого выступа

$$N_{ir} = c k \sigma_T P_{ir} (1 + f^2)^{0,5}, \quad (14)$$

где f – коэффициент трения.

Фактическая площадь на рассматриваемом участке контакта определится как сумма площадей сечений i -х параболоидов, вступивших в контакт.

$$P_r = \sum P_{ir}. \quad (15)$$

Выступ модели считается вступившим в контакт, если выполняется условие

$$h_{ir} > x_r + y_{уп.r}. \quad (16)$$

Параметры, характеризующие контактное взаимодействие цилиндрических поверхностей трения, рассчитываются путем проведения с помощью ЭВМ статистических испытаний на модели процесса контактного взаимодействия на основе реализации следующего алгоритма (рис. 5):

1. Ввод всех исходных данных для двух поверхностей, необходимых для расчета:

– геометрические параметры сопряженных деталей (длина контакта и диаметр цилиндрических поверхностей);

– параметры качества поверхностных слоев вала и втулки (R_{max} , R_a , S_m , t_m , b , v , E , μ , c , σ_T , k и др.);

– требуемые эксплуатационные характеристики пары трения (нагрузка, скорость скольжения и др.).

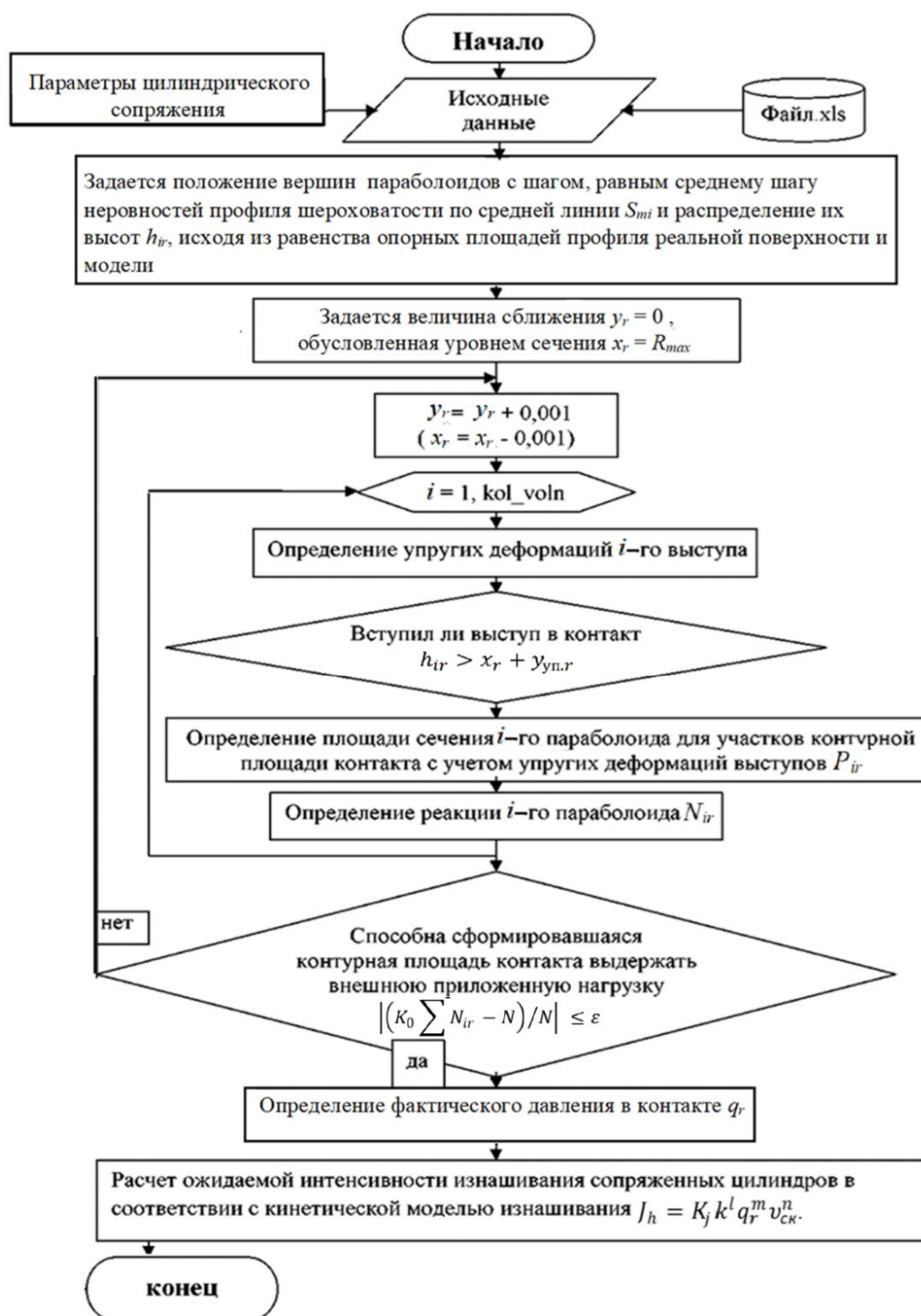


Рис. 5. Блок-схема разработанной программы

Fig. 5. Flowchart of the developed program

2. Определение фактической площади контакта на рассматриваемом участке. Задается положение вершин параболоидов с шагом, равным среднему шагу неровностей профиля шероховатости по средней линии S_{mi} и распределение их высот h_{ir} , исходя из равенства опорных площадей профиля реальной поверхности и модели.

Задается некоторая величина сближения y_r , обусловленная уровнем сечения $x_r \in [R_{max}/2; R_{max}]$, (см. рис. 2), и оценивается выполнение неравенства

$$|(K_o \Sigma N_{ir} - N)/N| \leq \varepsilon, \quad (17)$$

где N – внешняя приложенная сила; ε – погрешность.

Выполнение неравенства (17) свидетельствует о том, что найдена величина сближения, при которой сформировавшаяся фактическая площадь контакта способна выдержать внешнюю приложенную нагрузку.

3. Определение фактического давления в контакте.

Фактическое давление в контакте определяется с учетом сформировавшейся фактической площади контакта, способной выдержать внешнюю приложенную нагрузку, и выражения (15)

$$q_r = N/(P_r K_o). \quad (18)$$

4. Расчет ожидаемой интенсивности изнашивания сопряженных цилиндрических поверхностей трения в соответствии с моделью изнашивания.

В качестве модели изнашивания цилиндрических поверхностей трения

предлагается кинетическая модель [16–20], представляемая в виде

$$J_h = K_j q_r^l v_{ск}^m k^n, \quad (19)$$

где J_h – интенсивность изнашивания; K_j – коэффициент изнашивания; q_r – фактическое давление в контакте; $v_{ск}$ – скорость относительного скольжения цилиндрических поверхностей трения; k – коэффициент упрочнения поверхностного слоя; l , m и n – коэффициенты модели.

Выражение (19) является моделью изнашивания трущихся цилиндрических поверхностей деталей триботехнических систем, учитывающей параметры качества поверхностного слоя и условия трения.

Скорость относительного скольжения цилиндрических поверхностей трения $v = (\pi D n)/1000$.

Коэффициент упрочнения поверхностного слоя $k = HV/HV_{исх}$.

Значения фактического давления в контакте определяются из расчетов на модели контактного взаимодействия (выражение (18)).

Таким образом, учитывая (19), представляется возможным обеспечивать требуемую интенсивность изнашивания цилиндрических поверхностей трения путем управляемого технологического воздействия, а также требуемые параметры качества поверхностного слоя сопряженных деталей, в частности параметры шероховатости и коэффициент упрочнения.

В этом плане широкими возможностями обладает технология формирова-

ния износостойкого модифицированного поверхностного слоя, имплантированием материалов на основе карбида вольфрама с последующим электрохимическим упрочнением (ИКЭМО.)

При реализации технологии ИКЭМО методами математико-статистического моделирования и регрессионного анализа установлены значения коэффициентов K_j , l , m и n в модели изнашивания (19), которая с учетом этих значений принимает вид

$$J_h = 2,10 \cdot 10^{-10} \cdot q_r^{0,15} \cdot v_{ск}^{0,08} \cdot k^{-0,42}. \quad (20)$$

При этом значения параметров качества поверхностного слоя образцов, изготовленных из стали 45 ($HV_{исх} = 220$), варьировались в следующих пределах:

$$R_a = 1,61 \dots 2,59 \text{ мкм};$$

$$R_{max} = 8,16 \dots 14,18 \text{ мкм};$$

$$S_m = 122 \dots 171 \text{ мкм}; t_m = 57 \dots 62\%.$$

Условия трения образцов: давление на рабочей поверхности q – по плану эксперимента; скорость трения v – по плану эксперимента; вид первоначального контакта – пластический насыщенный; вид смазки – граничная; вид смазывания – окунанием; ведущий вид изнашивания – усталостное; смазочный материал – масло индустриальное И – 50А ГОСТ 20799 – 88; материал индентора – твердый сплав ВК8 [6, 7, 8].

Исходные данные для множественного регрессионного анализа представлены в табл. 1. Осуществлялся план эксперимента типа 2^3 .

Технологическими факторами при обработке образцов при реализации технологии ИКЭМО являлись:

- давление в контакте индентора с образцом $x_1(q_r)$, МПа: «–» – 10, «+» – 20;
- скорость скольжения $x_2(v_{ск})$, м/мин (м/с): «–» – 31,4 (0,52), «+» – 62,8 (1,05);
- коэффициент упрочнения поверхностного $x_3(k)$: «–» – 2,2, «+» – 3,5.

Таблица 1. Исходные данные для множественного регрессионного анализа

Table 1. Initial data for multiple regression analysis

№ опыта / Experience number	Технологические режимы ИКЭМО / Technological modes of ICMO			Интенсивность изнашивания $J_h \times 10^{-10}$ / The intensity of wear $J_h \times 10^{-10}$
	$x_1(q_r)$	$x_2(v_{ск})$	$x_3(k)$	
1	–	–	–	2,22
2	+	–	–	3,41
3	–	+	–	3,30
4	+	+	–	3,62
5	–	–	+	2,44
6	+	–	+	2,79
7	–	+	+	2,57
8	+	+	+	2,86

На рис. 6. приведены графики зависимостей: $J_h=f(q_r)$; $J_h=f(v_{ск})$; $J_h=f(k)$ при очередном варьировании одной из переменных q_r , $v_{ск}$, k в уравнении регрессии (20). Диапазоны изменения переменных соответствуют верхнему и нижнему уровням входных факторов. При изменении одной из переменных значения двух других являются средними из диапазона их изменений: $q_{гср} = 15$ МПа; $v_{ск.ср} = 47,1$ м/мин; $k = 2,85$.

По результатам теоретических исследований разработано программное обеспечение для расчета контактного взаимодействия и изнашивания цилиндрических поверхностей. Код программы написан на языке «Object Pascal» в среде программирования «LAZARUS». В нем содержатся формализованные алгоритмы, соответствующие используемым моделям. Для последующего анализа по желанию пользователя исходные данные и результаты расчетов можно экспортировать в электронную

книгу «Excel» в виде таблицы. Программа, для удобства ее использования, имеет визуальный интерфейс, удобный и понятный для пользователя.

Выводы

На основе моделирования контактного взаимодействия цилиндрических поверхностей установлены основные факторы, влияющие на процесс их изнашивания, такие как: фактическая площадь контакта; величина сближения контактирующих поверхностей; фактическое давление; интенсивность изнашивания сопрягаемых цилиндрических поверхностей. Предложена кинетическая модель изнашивания, учитывающая параметры шероховатости и физико-механических свойств поверхностного слоя. С использованием полученной модели стало возможным обеспечивать требуемую интенсивность изнашивания цилиндрических поверхностей трения.

Список литературы

1. Попов О.Н., Винокуров Г.Г. Применение теории марковских цепей для моделирования изнашивания поверхности трения порошковых материалов // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. 2017. № 5 (61). С. 67-77.
2. Винокуров Г.Г., Старостин Е.Г., Попов О.Н. Использование теории марковских цепей для описания изнашивания порошковых покрытий при трении скольжения // Вестник машиностроения. 2018. № 2. С. 35-40.
3. Пальчикова Г.С., Кривцов А.Н., Москалюк Д.Д. Анализ теории трения и изнашивания полимерных материалов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2019. Т. 7, № 1 (44). С. 279-282.
4. Применение теорий тепловой динамики и моделирования трения и изнашивания твердых тел при проектировании тормозов авиаколес / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Бра-

ун, В.Д., Кожемякина Ю.Г. Сверчков, А.И Бакин., А.В. Суворов, С.С. Коконин // Трение и износ. 2005. Т. 26, № 3. С. 261-268.

5. Применение теорий тепловой динамики и моделирования трения и изнашивания твердых тел при проектировании тяжело нагруженных тормозов транспортных машин / А.В. Чичинадзе, В.Д. Кожемякина, А.В. Суворов, С.С. Коконин // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2009. № 5. С. 31-37.

6. Инженерия поверхности деталей / колл. авт.; под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.

7. Горленко А.О., Шевцов М.Ю., Агеева Е.В. Формирование в поверхности трения деталей машин градиентных износостойких структур с помощью комбинированной электромеханической обработки // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 5. С. 24 – 35. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-5-24-35>.

8. Справочник технолога / А.Г. Суслов, В.Ф. Безъязычный, Б.М. Базров, А.П. Бабичев, П.Ю. Бочкарев, А.О. Горленко [и др.]; под общ. ред. А.Г. Суслова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. С. 391 – 398.

9. Горленко А.О. Повышение качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей электромеханической обработкой // Научные технологии в машиностроении. 2019. № 1(91). С. 8 – 16.

10. Дегтярев Н.М., Пастухов А.Г. Механическая обработка крестовин карданных шарниров, упрочненных электромеханической обработкой // Агротехника и энергообеспечение. 2014. № 1 (1). С. 339-343.

11. Шец С.П., Горленко А.О., Болдырев Д.А. Изнашивание стальных пар трения на уровне фактического пятна контакта // Сталь. 2022. № 2. С. 27 – 32.

12. Фундаментальные основы технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения / А.Г. Суслов, В.П. Федоров, О.А. Горленко, В.Б. Ильицкий, А.В. Тотай, А.В. Хандожко, А.О. Горленко [и др.]; под ред. А.Г. Суслова. М.: ООО «Издательство «Инновационное машиностроение», 2022. С. 19 – 97; 241 – 268; 338 – 349; 517 – 533.

13. Yanqing Tan, Lianhong Zhang, Yahui Hu. A Wear Model of Plane Sliding Pairs Based on Fatigue Contact Analysis of Asperities // Tribology Transactions. 2015. № 58. P.148-157.

14. Ashby M.F., J Abulawi., Kong H.S. Temperature maps for frictional heating in dry sliding // Tribology transactions, 1991. Vol.34, ser. 4. P. 577-587.

15. Shets S. P., Gorlenko A. O., Boldyrev D. A.. Wear of Steel Friction Pair at the Level of the Real Contact Area // Steel in Translation. 2022. Vol. 52, № 2. P. 245 – 250.

16. Gorlenko A.O., Boldyrev D. A.. Maintenance of Wear Resistance of Steel by a Directed Technological Impact // Steel in Translation. 2022. Vol. 52, № 5. P. 519 – 522.

17. Определение основных закономерностей процесса получения порошков методом электроэрозионного диспергирования / Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, А.С. Чернов, Г.С. Маслов, Е.И. Паршина // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. № 1 (46). С. 85-90.

18. Перспективные стали для кожухов доменных агрегатов / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, С.Н. Кутепов, О.В. Кузовлева, Е. В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 7, № 2(23). С. 6-15.

19. Исследование противоизносных свойств пластичного смазочного композиционного материала, содержащего дисперсные частицы слоистого модификатора трения / В.В. Медведева, А.Д. Бреки, Н.А. Крылов, М.А. Скотникова, Ю.А. Фадин, С.Е. Александров, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов, А.Н. Сергеев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 1 (64). С. 75-82.

20. Триботехнические свойства пластичных смазочных композиционных материалов с наполнителями из дисперсных частиц меди и цинка / В.В. Медведева, А.Д. Бреки, Н.А. Крылов, С.Е. Александров, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Н.Н. Сергеев, Е.В. Агеев, А.Н. Сергеев, Д.В. Малий, Д.А. Провоторов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 2 (65). С. 109-119.

References

1. Popov O.N., Vinokurov G.G. Application of the theory of Markov chains for modeling the wear of the friction surface of powder materials. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova = Bulletin of the Northeastern Federal University named after M.K. Ammosov*. 2017; (5): 67-77 (In Russ.).

2. Vinokurov G.G., Starostin E.G., Popov O.N. Using the theory of Markov chains to describe the wear of powder coatings under sliding friction. *Vestnik mashinostroeniy = Bulletin of Mechanical Engineering*. 2018; (2): 35-40 (In Russ.).

3. Palchikova G.S., Krivtsov A.N., Moskalyuk D.D. Analysis of the theory of friction and wear of polymer materials. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika = Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*. 2019; 7(1): 279-282 (In Russ.).

4. Chichinadze A.V., Brown E.D., Kozhemyakina V.D., Sverchkov Yu.G., Bakin A.I., Suvorov A.V., Kokonin S.S. Application of theories of thermal dynamics and modeling of friction and wear of solids in the design of brakes of aircraft wheels]. *Trenie i iznos = Friction and wear*. 2005; 26(3): 261-268 (In Russ.).

5. Chichinadze A.V., Kozhemyakina V.D., Suvorov A.V., Kokonin S.S. Application of theories of thermal dynamics and modeling of friction and wear of solids in the design of

heavily loaded brakes of transport vehicles. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmax* = *Friction and lubrication in machines and mechanisms*. 2009; (5): 31-37 (In Russ.).

6. Surface engineering of parts. Suslov A.G. (ed.). Moscow: Mechanical Engineering; 2008. 320 p. (In Russ.).

7. Gorlenko O. A., Shevtsov M. Yu., Ageeva E. V. The Formation of the Friction Surface of Machine Parts of Wear Resistant Gradient Structures by Means of Combined Electromechanical Processing. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*, 2018; 22(5): 24-35 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-5-24-35>.

8. Suslov A.G., Bezyagny V.F., Bazrov B.M., Babichev A.P., Bochkarev P.Yu., Gorlenko A.O., et al. Handbook of technologist. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2019. P. 391-398 (In Russ.).

9. Gorlenko A.O. Improving the quality of the surface layer and the operational properties of parts by electromechanical processing. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* = *High-tech technologies in mechanical engineering*. 2019; 1: 8-16 (In Russ.).

10. Degtyarev N.M., Pastukhov A.G. Mechanical processing of the crosspieces of car-dan joints reinforced with electromechanical treatment. *Agrotekhnika i energoobespechenie* = *Agrotechnics and energy supply*. 2014; (1): 339-343 (In Russ.).

11. Shets S.P., Gorlenko A.O., Boldyrev D.A. Wear of steel friction pairs at the level of the actual contact spot]. *Stal* = *Steel*, 2022. (2): 27-32 (In Russ.).

12. Suslov A.G., Fedorov V.P., Gorlenko O.A., Ilyitsky V.B., Totai A.V., Khandozhko A.V., Gorlenko A.O. et al. Fundamental principles of technological support and reliability improvement of machine-building products. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie. 2022. P. 19 – 97; 241 – 268; 338 – 349; 517 – 533 (In Russ.).

13. Yanqing Tan, Lianhong Zhang, Yahui Hu. A Wear Model of Plane Sliding Pairs Based on Fatigue Contact Analysis of Asperities. *Tribology Transactions*. 2015; (58): 148-157.

14. Ashby M.F., Abulawi J., Kong H.S. Temperature maps for frictional heating in dry sliding. *Tribology transactions*. 1991; 34 (4): 577-587.

15. Shets S. P., Gorlenko A. O., Boldyrev D. A. Wear of Steel Friction Pair at the Level of the Real Contact Area. *Steel in Translation*. 2022; 52(2): 245-250.

16. Gorlenko A.O., Boldyrev D. A. Maintenance of Wear Resistance of Steel by a Directed Technological Impact. *Steel in Translation*. 2022; 52(5): 519 – 522.

17. Ageev E.V., Ageeva E.V., Chernov A.S., Maslov G.S., Parshina E.I. Determination of the main regularities of the process of obtaining powders by the method of electroerosive dispersion. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2013; (1): 85-90 (In Russ.).

18. Sergeev N.N., Gvozdev A.E., Sergeev A.N., Tikhonova I.V., Kutepov S.N., Kuzovleva O.V., Ageev E. V. Promising steels for blast furnace housings. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo*

gosudarstvennogo universiteta. *Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2017; 7(2): 6-15 (In Russ.).

19. Medvedeva V.V., Breki A.D., Krylov N.A., Skotnikova M.A., Fadin Yu.A., Alexandrov S.E., Gvozdev A.E., Starikov N.E., Provotorov D.A., Sergeev A.N., Ageev E.V. Investigation of anti-wear properties of a plastic lubricating composite material containing dispersed particles of a layered friction modifier. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2016; (1): 75-82 (In Russ.).

20. Medvedeva V.V., Breki A.D., Krylov N.A., Alexandrov S.E., Gvozdev A.E., Starikov N.E., Sergeev N.N., Ageev E.V., Sergeev A.N., Maliy D.V., Provotorov D.A. Tribotechnical properties of plastic lubricating composite materials with fillers from dispersed particles of copper and zinc. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2016; (2): 109-119 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Горленко Александр Олегович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы», Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0807-9537>, e-mail: bugi12@bk.ru

Alexander O. Gorlenko, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Land Transport and Technological Complexes Department, Bryansk State Technical University, Bryansk, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0807-9537>, e-mail: bugi12@bk.ru

Агеев Евгений Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8491-2829>, e-mail: ageev_ev@mail.ru

Evgeny V. Ageev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Materials Technology and Transport Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8491-2829>, e-mail: ageev_ev@mail.ru

Шевцов Михаил Юрьевич, аспирант кафедры «Трубопроводные транспортные системы», Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5457-6342>, e-mail: mih09mmo@yandex.ru

Mikhail Yu. Shevtsov, Post-Graduate Student, Pipeline Transport Systems Department, Bryansk State Technical University, Bryansk, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5457-6342>, e-mail: mih09mmo@yandex.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 621.791.927.5

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-25-35>

Исследование влияния угла наклона приемной поверхности на величину смещения единичного наплавленного слоя при аддитивном формообразовании электрической дугой в среде защитного газа

В. В. Куц¹, А. Н. Гречухин¹ ✉, А. С. Привалов¹

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

✉ e-mail: agrechuhin@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Исследование посвящено изучению влияния угла наклона приемной поверхности на участках с выпуклым и вогнутым профилем на изменение величины смещения единичного наплавленного слоя при аддитивном формообразовании электрической дугой в среде защитного газа. Проведены экспериментальные исследования по формообразованию на приёмные поверхности с различным углом наклона. На основании полученных электродуговой наплавкой в среде защитного газа образцов, определены величины смещения единичных наплавленных слоёв. Для оценки влияния угла наклона приёмной поверхности на смещение единичного наплавленного слоя при аддитивном формообразовании электрической дугой в защитной среде, выполнен однофакторный дисперсионный анализ.

Методы: организации и планирования эксперимента, математической обработки результатов эксперимента, однофакторного дисперсионного анализа.

Результаты. В результате проведения дисперсионного анализа выявлено, что угол наклона приёмной поверхности при аддитивном формообразовании изделий оказывает влияние на смещение единичного наплавленного слоя на участках с выпуклым и вогнутым профилем, является значимым параметром при аддитивном формообразовании электрической дугой в среде защитного газа. В частности установлено, что критерий значимости для угла наклона составляет $p < 0,01$. В свою очередь, для выпуклой поверхности составляет $p < 0,03$, для вогнутой поверхности составляет $p < 0,004$. Анализ результатов исследования показал, что угол наклона приёмной поверхности оказывает большее значение на величину смещения единичного наплавленного слоя на участках приемной поверхности с вогнутым профилем.

Заключение. Определено, что угол наклона приемной поверхности значительно влияет на изменение величины смещения единичного наплавленного слоя при аддитивном формообразовании электрической дугой в сфере защитного газа. Угол наклона приемной поверхности на участках приемной поверхности с выпуклым и вогнутым профилем является значимым и его следует учитывать при проектировании технологических процессов аддитивного формообразования изделий электрической дугой в защитной среде.

Ключевые слова: аддитивные технологии; формообразование; выпуклая поверхность; вогнутая поверхность; погрешность.

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

© Куц В. В., Гречухин А. Н., Привалов А. С., 2024

Для цитирования: Куц В. В., Гречухин А. Н., Привалов А. С. Исследование влияния угла наклона приемной поверхности на величину смещения единичного наплавляемого слоя при аддитивном формообразовании электрической дугой в среде защитного газа // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №3. С. 25-35. [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2024-28-3-25-35](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-25-35).

Поступила в редакцию 15.05.2024

Подписана в печать 02.07.2024

Опубликована 30.09.2024

Investigation of the effect of the angle of inclination of the receiving surface on the displacement of a single deposited layer during additive shaping by an electric arc in a protective gas medium

Vadim V. Kuts ¹, Aleksandr N. Grechukhin ¹ ✉, Aleksandr S. Privalov ¹

¹ Southwest State University

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

✉ e-mail: agrechuhin@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The study is devoted to the study of the influence of the angle of inclination of the receiving surface with a convex and concave profile on the change in the displacement of a single deposited layer during additive shaping by an electric arc in a protective gas medium. Experimental studies on shaping on receiving surfaces with different angles of inclination have been carried out. Based on the samples obtained by electric arc welding in a protective gas medium, the displacement values of the individual deposited layers are determined. Since the angle of inclination of the receiving surface can affect the displacement of a single deposited layer during additive shaping by an electric arc in a protective environment, a one-factor dispersion analysis was performed.

Methods. Methods of organization and planning of the experiment, mathematical processing of experimental results, single-factor analysis of variance.

Results. As a result of the dispersion analysis, it was revealed that the angle of inclination of the receiving surface during additive shaping of products affects the displacement of a single deposited layer and is a significant parameter during additive shaping by an electric arc in a protective gas environment. In particular, it was found that the significance criterion for the slope angle is $p < 0.01$. In turn, for a convex surface it is $p < 0.03$, for a concave surface it is $p < 0.004$. Comparing the results, it can be seen that the criterion is more significant for a concave surface.

Conclusion. It is determined that the angle of inclination of the receiving surface significantly affects the change in the displacement of a single deposited layer during additive shaping by an electric arc in the sphere of protective gas. Therefore, the angle of inclination of the receiving surface with a convex and concave profile is significant and should be taken into account when designing technological processes for additive shaping of products by an electric arc in a protective environment.

Keywords: additive technologies; shaping; convex surface; concave surface; error.

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

For citation: Kuts V. V., Grechukhin A. N., Privalov A. S. Investigation of the effect of the angle of inclination of the receiving surface on the displacement of a single deposited layer during additive shaping by an electric arc in a protective gas medium. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(3): 25-35 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-25-35>.

Received 15.05.2024

Accepted 02.07.2024

Published 30.09.2024

Введение

Наличие возможности применения технологий аддитивного формообразования обеспечивает различные отрасли производства, включая машиностроительные, целым рядом преимуществ [1-5], среди которых отдельно можно выделить снижение финансовых затрат, в том числе, за счёт исключения из технологического процесса отдельных трудоёмких операций¹.

Одной из наиболее производительных технологий является аддитивное формообразование металлических изделий электрической дугой в среде защитного газа. В основе технологии лежит процесс наплавки расплавленной металлической проволоки посредством электрической дуги в защитных средах. Данная технология послойного формообразования обладает привлекательностью для промышленных предприятий [6-8].

Следует отметить, что электродуговое аддитивное формообразование в среде защитного газа имеет и свои недостатки, сопровождающие наплавку электрической дугой, такие как возможность непроплава, перегрева, возникновения трещин, деформирования изделия, которые могут возникать при неправильном выборе режима наплавки. Тем

не менее, стоит отметить перспективность данного способа аддитивного формообразования [9-14].

Одним из недостатков способов аддитивного формообразования изделий электрической дугой является высокая погрешность формообразования изделий [15-20]. Вопросы обеспечения точности при аддитивном формообразовании электрической дугой в среде защитного газа являются не достаточно изученными. Интерес представляет изучение влияния угла наклона приёмной поверхности на величину смещения единичного наплавляемого слоя.

Для изучения влияния угла наклона на величину смещения была разработана схема аддитивного формообразования (рис. 1).

Материалы и методы

Для проведения исследования были применены методы организации и планирования эксперимента, математической обработки результатов эксперимента, однофакторного дисперсионного анализа.

Результаты и их обсуждение

В соответствии со схемой аддитивного формообразования (см. рис. 1), было произведено наплавление на приёмные поверхности с различным углом наклона.

План проведения эксперимента представлен в табл. 1.

Формообразование осуществлялось на экспериментальном стенде (рис. 2).

¹ Сапрыкин А.А. Повышение производительности процесса селективного лазерного спекания при изготовлении прототипов: дис.... канд. техн. наук. Юрга, 2006.

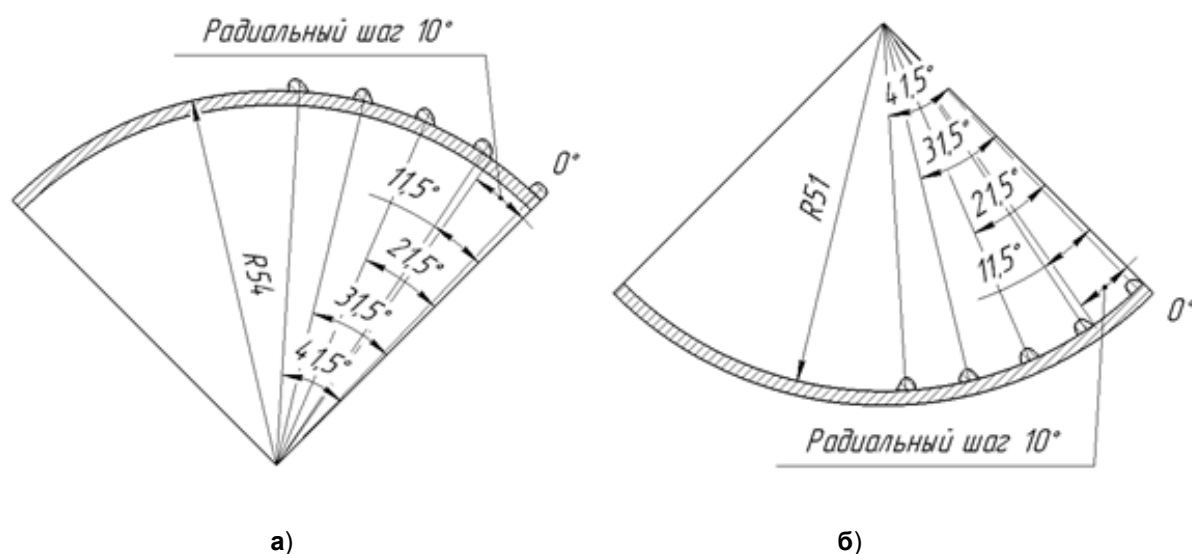


Рис. 1. Схемы аддитивного формообразования на приёмных поверхностях с различным углом наклона: **а** – на выпуклой поверхности; **б** – на вогнутой поверхности

Fig. 1. Schemes of additive shaping on receiving surfaces with different angles of inclination: **a** – on a convex surface; **b** – on a concave surface

Таблица 1. План проведения экспериментов и параметры наплавления

Table 1. Experimental plan and deposition parameters

Параметры наплавления / Deposition parameters		№ п/п эксперимента / N/a of the experiment									
		1		2		3		4		5	
Приёмная поверхность		Выпуклая	Вогнутая	Выпуклая	Вогнутая	Выпуклая	Вогнутая	Выпуклая	Вогнутая	Выпуклая	Вогнутая
Угол наклона приёмной поверхности, °		0		11,5		21,5		31,5		41,5	
Режим наплавления	Давление подачи газа, МПа	0,25									
	Скорость перемещения сварочной горелки, мм/мин	224									
	Скорость подачи проволоки, мм/мин	4000									
	Напряжение на дуге, В	19,5									
Присадочный материал	Марка стали	СВ-09Г2С									
	Диаметр, мм	0,8									



Рис. 2. Экспериментальный стенд для аддитивного формообразования

Fig. 2. Experimental stand for additive shaping

Стенд состоит из двух основных составляющих: строительной платформы (стола) и экструдера (электродуговой горелки). Они перемещаются один относительно другого за счёт линейных приводов и управляются через контроллер, образуя мехатронную систему. Через горелку, к закреплённой на столе стенда приёмной поверхности подаётся

проволока, и от инвертора (модель Кедр MIG-160GDM) через токопровод к ней подводится ток. Так как проволока одновременно выступает строительным материалом и электродом, посредством предусмотренной в горелке камеры, в зону наплавления при помощи электромагнитного клапана, так же подаётся защитный газ из баллона с газовой смесью. Подача проволоки с закреплённой в верхней части стенда катушки осуществляется подающим прижимным механизмом экструдера МК8 3D-принтера.

Наплавление единичных слоёв производилось в следующем порядке:

- пять образцов единичного слоя на выпуклой поверхности;
- пять образцов единичного слоя на вогнутой поверхности.

Образцы единичных наплавляемых слоев, полученные технологией аддитивного формообразования на приёмных поверхностях с различным углом наклона, представлены на рис. 3.



а)



б)

Рис. 3. Образцы единичных наплавляемых слоев: **а** – на выпуклой поверхности; **б** – на вогнутой поверхности

Fig. 3. Samples of single deposited layers: **a** – on a convex surface; **b** – on a concave surface

Для исследования влияния угла наклона приемной поверхности на величину смещения единичного наплавляемого слоя, были подготовлены образцы (рис. 4).



Рис. 4. Образцы единичных наплавляемых слоёв: **а** – на выпуклой поверхности; **б** – на вогнутой поверхности

Fig. 4. Samples of single deposited layers: **a** – on a convex surface; **b** – on a concave surface

Определение величины смещения единичного наплавленного слоя производилось с помощью микроскопа Бринелля на каждом из образцов (рис. 5).

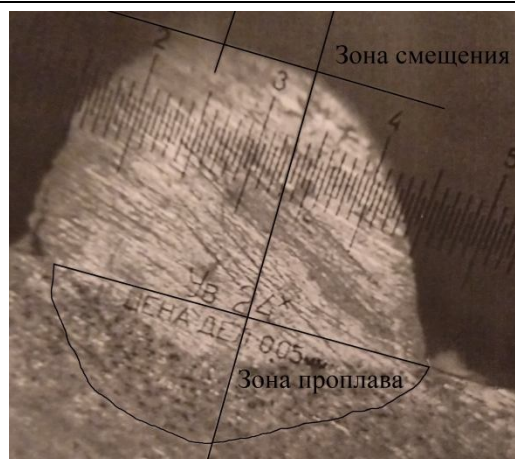


Рис. 5. Сечение единичного наплавляемого слоя под микроскопом

Fig. 5. Cross section of a single deposited layer under a microscope

Найдена и очерчена середина зоны проплава, проведён перпендикуляр к границам зоны проплава по высоте максимальной точки наплавленного слоя. Проведён перпендикуляр, соединяющий середину зоны проплава и самую высокую точку наплавленного слоя. Расстояние от перпендикуляра до середины зоны проплавления является контролируемым параметром, выраженным величиной смещения.

Результаты проведённых измерений представлены в табл. 2.

Таблица 2. Сводная таблица результатов измерений

Table 2. Summary table of measurement results

№ п/п	Выпуклая поверхность / Concave surface						№ п/п	Вогнутая поверхность / Concave surface					
	Угол наклона, ° / Angle of inclination	Величина смещения, мм / The displacement value, mm						Угол наклона, ° / Angle of inclination	Величина смещения, мм / The displacement value, mm				
1	0	0,25	0,3	0,25	0,2	0,15	1	0	0,3	0,3	0,25	0,3	0,35
2	11,5	0,4	0,25	0,2	0,3	0,2	2	11,5	0,25	0,2	0,25	0,2	0,2
3	21,5	0,55	0,3	0,2	0,4	0,15	3	21,5	0,125	0,2	0,2	0,25	0,25
4	31,5	0,6	0,25	0,45	0,4	0,5	4	31,5	0,2	0,3	0,275	0,2	0,25
5	41,5	0,3	0,45	0,7	0,3	0,5	5	41,5	0,325	0,25	0,3	0,25	0,35

На основе полученных результатов был проведен однофакторный дисперсионный анализ влияния угла наклона

приёмной поверхности на величину смещения единичного наплавленного слоя в программе STATISTICA (рис. 6).

Эффект	Одномерный критерий значимости для Величины смещения Сигма-ограниченная параметризация Декомпозиция гипотезы				
	SS	Степени свободы	MS	F	p
Св. член	2,924100	1	2,924100	182,1869	0,000000
Угол смещения	0,197400	4	0,049350	3,0748	0,039843
Ошибка	0,321000	20	0,016050		

а)

Эффект	Одномерный критерий значимости для Величины смещения Сигма-ограниченная параметризация Декомпозиция гипотезы				
	SS	Степени свободы	MS	F	p
Св. член	1,600225	1	1,600225	927,6667	0,000000
Угол смещения	0,037150	4	0,009288	5,3841	0,004143
Ошибка	0,034500	20	0,001725		

б)

Рис. 6. Результаты дисперсионного анализа: **а** – на выпуклой поверхности; **б** – на вогнутой поверхности

Fig. 6. The results of the analysis of variance: **a** – on a convex surface; **b** – on a concave surface

В результате проведенного анализа (см. рис. 6) установлено, что критерий значимости для угла наклона составляет $p < 0,01$. В свою очередь, критерий значимости для угла наклона на выпуклой поверхности составляет $p < 0,03$, угол наклона на вогнутой поверхности составляет $p < 0,004$. Анализ результатов исследования показал, что угол наклона приёмной поверхности оказывает большее значение на величину смещения единичного наплавленного слоя на участках приемной поверхности с вогнутым профилем. Полученные резуль-

таты свидетельствуют о том, что угол наклона является значимым фактором и влияет на величину смещения единичного наплавленного слоя.

Выводы

Было определено, что угол наклона приемной поверхности значительно влияет на изменение величины смещения единичного наплавленного слоя при аддитивном формообразовании электрической дугой в сфере защитного газа. Это подтверждается результатами однофакторного дисперсионного анализа.

Поэтому угол наклона приемной поверхности с выпуклым и вогнутым профилем является значимым и его следует учитывать при проектировании техноло-

гических процессов аддитивного формования изделий электрической дугой в защитной среде.

Список литературы

1. Burns M. Automated Fabrication: Improving Productivity in Manufacturing. Englewood Cliffs, N.J., USA:PTR Prentice Hall, 1993. 369 p.
2. Improving the quality of additive methods for forming the surfaces of odd-shaped parts with the application of parallel kinematics mechanisms / V.V. Kuts, M.S. Razumov, A.N. Grechukhin, N.A. Bychkova // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11, № 24. P. 11832-11835.
3. Куц В. В., Меркулов В.С., Гречухин А. Н. Исследование процесса аддитивного формирования легкоплавких материалов с использованием твердотельного маломощного лазера // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020. Т. 24, № 4. С. 8-17. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-8-17>.
4. Optimum part deposition orientation in stereolithography / S.K. Singhal, A.P. Pandey, P.M. Pandey, A.K. Nagpal // Computer-Aided Design & Applications. 2005. Vol. 2, no. 1–4. P. 319–328.
5. Технология изготовления деталей в автоматизированном производстве / А.М. Рудской, В.В. Куц, М.С. Разумов, А.Н. Гречухин, А.А. Горохов. Курск, 2019.
6. Гречухин А.Н., Куц В.В., Щербаков П.С. Выявление влияния пространственной ориентации наплаваемых слоев, а также коэффициента их перекрытия на погрешность формы поверхности при аддитивном формообразовании электрической дугой // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17, № 6. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.17.6.017>.
7. Куц В.В., Гречухин А.Н., Разумов М.С. Пути снижения погрешности аддитивных методов формообразования // Вестник МГТУ "Станкин". 2019. № 1 (48). С. 21-25.
8. Расширение технологических возможностей методов аддитивного формообразования с применением механизмов параллельно-последовательной структуры / А.Н. Гречухин, В.В. Куц, А.В. Олещицкий, М.С. Разумов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23, № 6. С. 34-44. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-34-44>.
9. Hong S. Byun, Kwan H. Lee. Optimal part orientation of rapid prototyping using a genetic algorithm // Computers & Industrial Engineering. 2004. P. 426–431.
10. Hur J., Lee K. The development of a CAD environment to determine the preferred build-up direction for layered manufacturing // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 1998. № 14. P. 247–254.

11. Kim J.Y., Lee K., Park J.C. Determination of optimal part orientation in stereolithographic rapid prototyping // Technical Report, Department of Mechanical Design and Production Engineering. Seoul: Seoul National University, 1994.
12. Determining fabrication orientations for rapid prototyping with stereolithography apparatus / P.T. Lan, S.Y. Chou, L.L. Chent, D. Gemmill // Computer-Aided Design. 1997. Vol. 29, № 1. P. 53– 62.
13. Improving the accuracy of additive forming methods Innovation, quality and service in engineering and technology / A.N. Grechukhin, V.V. Kuts, M.S. Razumov, et al. 2018. P. 128-131.
14. Гречухин А.Н., Куц В.В., Разумов М.С. Управление пространственной ориентацией узлов робота в процессе адитивного формообразования изделий // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14, №4. С. 122-129.
15. Гречухин А.Н., Куц В.В., Разумов М.С. Экспериментальное определение параметров поперечного сечения единичного слоя при аддитивном формообразовании изделий // Известия Тульского государственного университета. Техническое науки. 2018. Вып. 10. С. 264-270.
16. Grechukhin A.N., Anikutin I.S., Byshkin A.S. Management of space orientation of the end effector of generation of geometry system fiveaxis manufacturing machinery for additive generation of geometry // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 7. P. 128-136. <https://doi.org/10.1051/matec-conf/201822601004>.
17. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. Ways to reduce the error of additive methods of forming // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 7. P. 142-150. <https://doi.org/10.1051/matec-conf/201822601002>.
18. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Oleshitskiy A.V. Development and Research of Technological Equipment that Implements Dynamic Control of Process of Additive Fabrication of Parts of Complex Spatial Shapes Based on Mechanisms with a Hybrid Layout // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 709(3). 033112. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/3/033112>.
19. Investigation of the process of additive formation of fusible materials using a low-power solid-state laser/ V.V. Kuts, V.S. Merkulov, A.N. Grechukhin, A.S. Privalov// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. 1029(1). 012010. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1029/1/012010>.
20. Куц В.В., Гречухин А.Н., Олешицкий А.В., Привалов А.С., Щербаков П.С. Алгоритм деления объемной модели на криволинейные слои для 3D-печати // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2021. № 5 (349). С. 39-45.

References

1. Burns M. Automated Fabrication: Improving Productivity in Manufacturing. Englewood Cliffs, N.J., USA:PTR Prentice Hall, 1993. 369 p.

2. Kuts V.V., Razumov M.S., Grechukhin A.N., Bychkova N.A. Improving the quality of additive methods for forming the surfaces of odd-shaped parts with the application of parallel kinematics mechanisms. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016; 11(24): 11832-11835.
3. Kutz V.V., Merkulov V.S., Grechukhin A.N. Investigation of the process of additive formation of low-melting materials using a low-power solid-state laser. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2020; 24(4): 8-17 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-8-17>.
4. Singhal S.K., Pandey A.P., Pandey P.M., Nagpal A.K. Optimum part deposition orientation in stereolithography. *Computer-Aided Design & Applications*. 2005; 2 (1–4): 319–328.
5. Rudskoy A.M., Kutz V.V., Razumov M.S., Grechukhin A.N., Gorokhov A.A. The technology of manufacturing parts in automated production. Kursk, 2019 (In Russ.).
6. Grechukhin A.N., Kutz V.V., Shcherbakov P.S. Identification of the influence of the spatial orientation of the deposited layers, as well as their overlap coefficient on the error of the surface shape during additive shaping by an electric arc. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2021; 17 (6). <https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.17.6.017>.
7. Kutz V.V., Grechukhin A.N., Razumov M.S. Ways to reduce the error of additive shaping methods]. *Vestnik MGTU "Stankin" = Bulletin of the Moscow State Technical University "Stankin"*. 2019; (1): 21-25 (In Russ.).
8. Grechukhin A.N., Kutz V.V., Oleshitsky A.V., Razumov M.S. Expansion of technological capabilities of additive shaping methods using parallel-sequential structure mechanisms. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019; 23(6): 34-44 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-34-44>.
9. Hong S. Byun, Kwan H. Lee. Optimal part orientation of rapid prototyping using a genetic algorithm. *Computers & Industrial Engineering*. 2004; 426–431.
10. Hur J., Lee K. The development of a CAD environment to determine the preferred build-up direction for layered manufacturing. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*. 1998; (14): 247–254.
11. Kim J.Y., Lee K., Park J.C. Determination of optimal part orientation in stereolithographic rapid prototyping. Technical Report, Department of Mechanical Design and Production Engineering. Seoul: Seoul National University; 1994.
12. Lan P.T., Chou S.Y., Chent L.L., Gemmill D. Determining fabrication orientations for rapid prototyping with stereolithography apparatus. *Computer-Aided Design*. 1997; 29 (1): 53– 62.
13. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S., et al. Improving the accuracy of additive forming methods Innovation, quality and service in engineering and technology. 2018: 128-131.
14. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. Control of spatial orientation of robot units in the process of additive forming of products. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2018; 14 (4): 122-129 (In Russ.).

15. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. Experimental determination of the cross-section parameters of a single layer in the additive forming products. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskoe nauki = Proceeding of Tula State University. Technical Science*. 2019; (10): 264-270 (In Russ.).

16. Grechukhin A.N., Anikutin I.S., Byshkin A.S. Management of space orientation of the end effector of generation of geometry system fiveaxis manufacturing machinery for additive generation of geometry. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 7: 128-136. <https://doi.org/10.1051/matec-conf/201822601004>

17. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. Ways to reduce the error of additive methods of forming – 2018. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 7: 142-150. <https://doi.org/10.1051/matec-conf/201822601002>.

18. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Oleshitskiy A.V. Development and Research of Technological Equipment that Implements Dynamic Control of Process of Additive Fabrication of Parts of Complex Spatial Shapes Based on Mechanisms with a Hybrid Layout. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 709(3): 033112. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/3/033112>.

19. Kuts V.V., Merkulov V.S., Grechukhin A.N., Privalov A.S. Investigation of the process of additive formation of fusible materials using a low-power solid-state laser. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1029(1): 012010. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1029/1/012010>.

20. Kutz V.V., Grechukhin A.N., Oleshitsky A.V., Privalov A.S., Shcherbakov P.S. Algorithm division of a volumetric model into curved layers for 3D- printing. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii = Fundamental and applied problems of engineering and technology*. 2021; (5): 39-45 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Куц Вадим Васильевич, доктор технических наук, доцент, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Vadim V. Kuts, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Гречухин Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: agrechuhin@mail.ru

Aleksandr N. Grechukhin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: agrechuhin@mail.ru

Привалов Александр Сергеевич, магистрант кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: priwalovalexander@mail.ru

Aleksandr S. Privalov, Master Student, Department of Engineering Technologies and equipment, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: priwalovalexander@mail.ru

УДК 697.7

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-36-49>



Тепловые аккумуляторы фазового перехода на основе парафина

М. И. Милёхин¹ ✉, Е. В. Умеренков¹

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

✉ e-mail: melehin.mim@gmail.com

Резюме

Цель исследования. В связи с растущим спросом на энергосберегающие технологии во всем мире и в Российской Федерации интересными для исследования являются накопители тепловой энергии. Известны различные способы аккумулировать тепловую энергию, один из них при помощи тепловых аккумуляторов на фазовом переходе. Данные устройства будут являться целью исследования для дальнейшего развития.

Методы. Одним из наиболее эффективных теплоаккумулирующих веществ фазового перехода является парафин. В процессе обзора научной литературы были определены три основных направления для применения тепловых аккумуляторов фазового перехода: системы отопления и горячего водоснабжения от традиционных источников энергии, системы отопления и горячего водоснабжения от возобновляемых источников энергии, предпусковая подготовка двигателей внутреннего сгорания. Бескорпусный аккумулятор теплоты с фазовым переходом можно применять для аккумулирования низкопотенциального тепла в обратном трубопроводе системы отопления, другой тип аккумулятора будет эффективен при зарядке от солнечного источника энергии. Для предварительного подогрева двигателя внутреннего сгорания в авто-мобиле, перед его пуском, так же можно применять тепловой аккумулятор.

Результаты. Проведенный обзор и аналитическое исследование имеющихся тепловых аккумуляторов фазового перехода показали, что имеющиеся тепловые аккумуляторы фазового перехода на основе парафина можно усовершенствовать, пробуя различные конфигурации расположения, способы уменьшения объема и массы их конструкции, применяя полимерные материалы для подачи теплоносителя.

Заключение. Дальнейшее всестороннее изучение аккумуляторов тепла фазового перехода позволит находить эффективные способы его применения в системах индивидуального отопления и горячего водоснабжения, а также в двигателях внутреннего сгорания, искать новые направления их применения, что и будет целью дальнейших исследований.

Ключевые слова: тепловые аккумуляторы; фазовый переход; теплоаккумулирующий материал; тепловая энергия; альтернативная энергия.

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

© Милёхин М. И., Умеренков Е. В., 2024

Для цитирования: Милёхин М. И., Умеренков Е. В. Тепловые аккумуляторы фазового перехода на основе парафина // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №3. С. 36-49. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-36-49>.

Поступила в редакцию 28.04.2024

Подписана в печать 20.06.2024

Опубликована 30.09.2024

Thermal accumulators of phase change based on paraffin

Mikhail I. Milekhin ¹ ✉, Evgenii V. Umerenkov ¹

¹ Southwest State University

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

✉ e-mail: melehin.mim@gmail.com

Abstract

Purpose of research. Due to the growing demand for energy-saving technologies around the world and in the Russian Federation, thermal energy storage devices are interesting for research. There are various ways to accumulate thermal energy, one of them is using thermal accumulators at a phase transition. These devices will be the target of research for further development.

Methods. One of the most effective heat-storing substances of phase transition is paraffin. In the process of reviewing the scientific literature, three main areas for the use of thermal accumulators of phase transition were identified: heating and hot water supply systems from traditional energy sources, heating and hot water supply systems from renewable energy sources, pre-start preparation internal combustion engines. An unpackaged heat accumulator with a phase change can be used to accumulate low-grade heat in the return pipeline of a heating system; another type of accumulator will be effective when charged from a solar energy source. To preheat the internal combustion engine in a car before starting it, you can also use a heat accumulator.

Results. The review and analytical study of existing phase change heat accumulators showed that existing phase change heat accumulators based on paraffin can be improved by trying different arrangement configurations, using polymer materials to supply coolant, and looking for ways to reduce the volume and weight of their design.

Conclusion. Further comprehensive study of phase transition heat accumulators will make it possible to find effective ways to use it in individual heating and hot water supply systems, as well as in internal combustion engines. Look for new directions for their application, which will be the goal of further research.

Key words: thermal accumulators; phase transition; heat-storing material; thermal energy; alternative energy.

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

For citation: Milekhin M. M., E Umerenkov. V. Thermal accumulators of phase change based on paraffin. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(3): 36-49 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-36-49>.

Received 28.04.2024

Accepted 20.06.2024

Published 30.09.2024

Введение

Важное значение в будущем развитии мировой энергетики играют инновационные технологии. Новая энерге-

тика формируется на основе возобновляемых источников энергии, распределенной генерации, а также развития

энергосберегающих и энергоэффективных технологий, внедрение которых со временем приведет к утрате доминирования традиционных видов энергетики, основанных на сжигании углеводородов, относятся возобновляемые источники энергии и аккумуляторы энергии, предполагающие увеличить энергоэффективность в жилых, коммерческих и административных помещениях [1].

В Стратегии развития энергетического сектора Российской Федерации заявлено структурно и качественно новое развитие энергетического сектора страны, которое предусматривает рост доли потребления более высококачественной и экологически чистой по всему циклу производства энергетической продукции¹.

Солнечные и ветровые источники энергии зависимы от климатических изменений природы, а потому имеют перерывы в работе. Аккумуляирование тепловой энергии позволяет потребителям не зависеть от непостоянства работы и покрывать пиковые нагрузки энергосистемы², снизить потребность и оптимизировать объемы потребления тепловой энергии. Активное использование тепловых аккумуляторов для снижения низкого теплового потенциала отработавшего теплоносителя существенно по-

высит энергетический эффект. Поэтому целесообразно использовать тепловые аккумуляторы как в системах теплоснабжения, так и в автономных системах отопления, аккумулируя низко потенциальное тепло

В настоящее время есть технологии, которые позволяют тепловую энергию аккумулятировать от нескольких часов до нескольких месяцев. Технология резервирования тепловой энергии солнца аккумуляторами тепла на основе расплавов солей применяется в солнечных электростанциях башенного типа, но они подвержены нарушению исходной структуры. Существуют также технологии хранения тепла в паровых аккумуляторах, в горячей вулканической породе, бетоне, гальке, технологии сплава на границе растворимости [2]. Распространенным способом накопления излишек энергии от возобновляемых источников энергии, хотя они дорогие, не экологичные, имеют короткий срок службы, является использование свинцово-кислотных аккумуляторных батарей. Жидкостные теплоаккумуляторы имеют большие габариты и высокие тепловые потери.

Перспективным и экономически целесообразным направлением является разработка новых энергосберегающих тепловых аккумуляторов, с применением фазопереходных теплоаккумулирующих материалов [3-4]. В фазопереходных тепловых аккумуляторах применяют материалы с изменяющимся фазовым состоянием в диапазоне температур эксплуатации системы. Такие

¹ Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года, утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р.

² Щеклеин С.Е., Попов А.И., Проников И.А. Патент 2537661 С1 РФ. Аккумулятор тепловой энергии периодического действия; заявл. 16.09.2013; опубл. 10.01.2015, Бюл. № 1.

аккумуляторы немного сложнее, но накапливают на единицу объема намного больше энергии, чем емкостные аккумуляторы тепла с жидкими телами. Зарядка и разрядки в них происходит в очень узком диапазоне температур [5], что тоже является преимуществом [6].

По объективным причинам интерес для аккумуляции тепловой энергии представляют органические соединения, которые имеют большое распространение. Выбор нефтяного парафина в качестве теплоаккумулирующего материала для фазопереходного аккумулятора тепла [7] выгоден по ряду причин: большая теплота фазового перехода, долговечен и стабилен при циклическом изменении агрегатного состояния, доступен и производится в больших объемах, не коррозионно активен, температура фазового перехода приближена к температурам систем теплоснабжения [8]. Рыночная стоимость разных марок парафина экономически обоснованна для выбора к использованию в качестве теплоаккумулирующего материала для проектирования фазопереходного аккумулятора тепла.

Материалы и методы

Обзор имеющихся разработок, а также патентов и изобретений по конструкции и применению тепловых аккумуляторов показывает перспективность их применения в ближайшем будущем. На данный момент вызывают интерес тепловые аккумуляторы с фазовым

переходом на основе парафина. Существуют различные разработки конструкций и модели режимов зарядки и разрядки тепловых аккумуляторов, которые можно применять в различных сферах. Исходя из проведенного обзора, можно выделить три основных направления применения тепловых аккумуляторов данного типа. Это: системы отопления и горячего водоснабжения от традиционных источников энергии, системы отопления и горячего водоснабжения от возобновляемых источников энергии, предпусковая подготовка двигателей внутреннего сгорания.

Бескорпусный аккумулятор теплоты с фазовым переходом, включающий входную и выходную сборные камеры-коллекторы и теплоаккумулирующие ячейки в виде теплообменных трубок, окруженных слоем теплоаккумулирующего материала, отличающийся тем, что каждая теплоаккумулирующая ячейка имеет теплоизолированный снаружи индивидуальный корпус с внутренним радиусом, равным расчетному радиусу ячейки [9]. Принципиальное устройство аккумулятора предлагаемой конструкции показано на рис. 1 [9].

Бескорпусный аккумулятор тепла состоит из теплоаккумулирующих ячеек 1, нижней подающей 2 и верхней принимающей 3 сборных камер-коллекторов и соответственно нижней 4 и верхней 5 трубных досок.

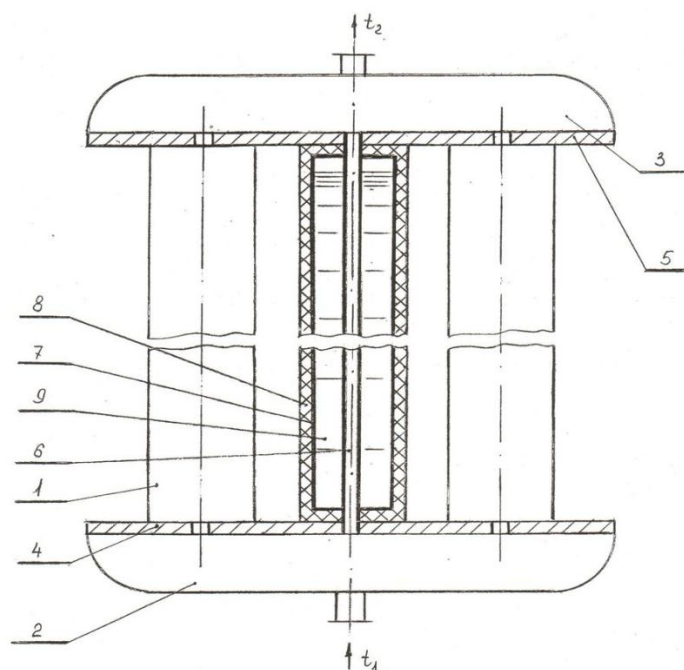


Рис.1. Конструкция бескорпусного аккумулятора теплоты с теплоаккумулирующими ячейками

Fig.1. Design of a frameless heat accumulator with heat-storing cells

В свою очередь, каждая из теплоаккумулирующих ячеек состоит из теплообменной трубки 6, нижний и верхний концевики которой закреплены (ввальцованы) в трубные доски 4 и 5, и корпуса 7 с тепловой изоляцией 8; пространство между трубкой 6 и корпусом 7 заполнено теплоаккумулирующим материалом 9. Нагретый в источнике теплоноситель подают во входную сборную камеру-коллектор 2, где он распределяется по теплообменным трубкам 6 теплоаккумулирующих ячеек 1, а затем поступает в верхнюю камеру 3, из которой возвращается к источнику теплоты; при этом происходит нагрев и плавление теплоаккумулирующего материала 9, находящегося между трубкой 6 и корпусом теплоаккумулирующей ячейки 7, сокращение потерь тепла в окружающую среду которым, обеспечивается за

счет тепловой изоляции 8. По истечении расчетного времени расплавления теплоаккумулирующего материала в ячейках начинается процесс разрядки теплового аккумулятора на фазовом переходе, в результате которого происходит нагрев теплопоглощающей среды [9].

Теплопоглощающую среду подают во входную камеру 2, попадая из которой в трубки 6, она нагревается и через выходной коллектор 3 поступает в систему теплопотребления, например горячего водоснабжения. При этом происходит охлаждение и затвердевание теплоаккумулирующего материала 9 в каждой ячейке 1 таким образом, что выходная температура теплопоглощающей среды (после камеры 3) остается не ниже требуемой в течение желаемого времени разрядки.

Аккумулятор теплоты с фазовым переходом, заряжающийся от солнечной энергии, изображен на рис. 2-5, где 1 – корпус цилиндрический; 2 – фазопереходный теплоаккумулирующий материал на основе парафина – (ФТАМ); 3 – трубки; 4 – дно корпуса, нагревающегося от солнечного излучения; 5 – промежуточная крышка; 6 – отверстия для прохода трубок; 7 – отверстия крышки и корпуса для крепления; 8 – болты крепежные; 9 – камера для теплоаккумулирующего материала; 10 – крышка теплового аккумулятора; 11, 12 – входная и выходная труба для теплоносителя; 13 – электронагревательные элементы; 14 – резьбовая обойма; 15 – перемычки крепления резьбовой обоймы с электронагревательным элементом к вертикальной трубке¹.

Данный тепловой аккумулятор работает следующим образом. Заряжается он от солнечной энергии, отраженной зеркалами, направленными на дно корпуса теплового аккумулятора 4. Происходит теплообмен от корпуса 4 к вертикальным трубкам 3 и вследствие нагрева теплоаккумулирующий материал 2 плавится. Расплавленный теплоаккумулирующий материал (парафин) расширяется и избытки его наполняют камеру 9 закрытой герметичной крышкой 10. Дополнительно тепловой аккумулятор фа-

зового перехода может заряжаться от электронагревательного элемента 13, который установлен в вертикальных трубках 3 внутри теплоаккумулирующего материала. Теплоноситель может нагреваться одновременно с зарядкой теплового аккумулятора, поступая снизу через входную трубу 11 и покидая корпус теплового аккумулятора через выходную трубу 12. Разряжается тепловой аккумулятор, когда теплоаккумулирующее вещество 2 отдает тепло теплоносителю через вертикальные трубки 3 и кристаллизуется в процессе фазового перехода по всему объему корпуса 1. Таким образом, кожухи вертикальных трубок 3 с теплоаккумулирующим материалом 2 и расположенных в них электронагревательных элементах 13, являются теплообменниками¹.

Чтобы произвести пуск двигателя внутреннего сгорания (ДВС) при температуре воздуха ниже нуля градуса по Цельсию, его нужно подготовить, предварительно прогрев. Для этой цели вызывает интерес тепловой аккумулятор фазового перехода, состоящий из корпуса в тепловой изоляции с разборной крышкой, в которую через отверстия запрессованы впускной и выпускной трубопроводы, капсулы собранные из коаксиально расположенных цилиндров с теплоаккумулирующим материалом (ТАМ), изменяющим свое состояние в определенном температурном режиме, и имеющие зазоры для протекания теплоносителя.

¹ Пат. РФ 2 547680 С1, F24Н 7/00. Аккумулятор теплоты с фазопереходным материалом. Автор: Бабаев Баба Джабраилович(RU), Заявка: 2013152593/06, 26.11.2013, Опубликовано: 10.04.2015 Бюл. № 10.

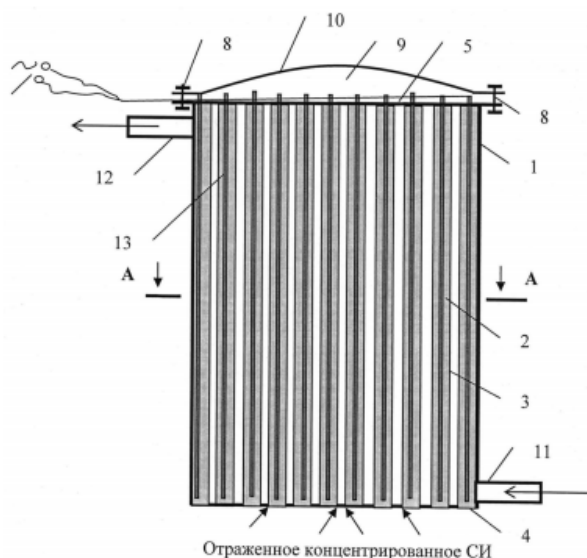


Рис. 2. Продольный разрез аккумулятора тепла от солнечной энергии

Fig. 2. Longitudinal section of a solar heat accumulator

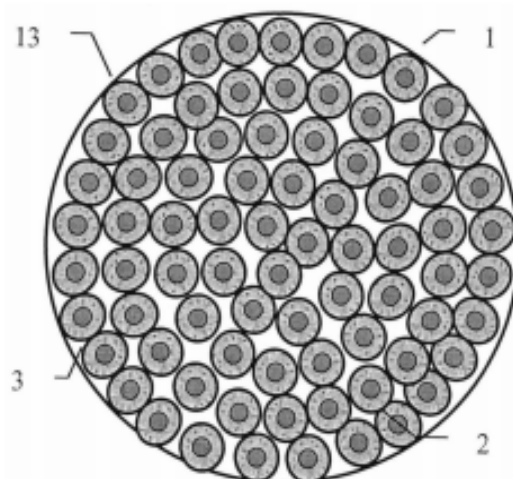


Рис. 3. Разрез вид А-А

Fig. 3. Section view A-A

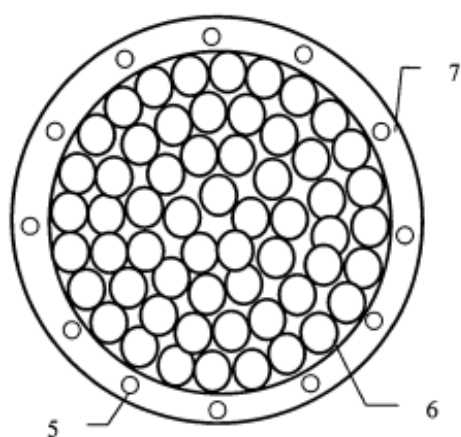


Рис. 4. Вид сверху промежуточной крышки бака-аккумулятора¹

Fig. 4. Top view of the intermediate cover of the storage tank¹

Данный тепловой аккумулятор снабжен электроподогревом с саморегулирующимися нагревательными элементами на позисторной керамике, работа-

¹ Пат. РФ 2 547680 С1, F24Н 7/00. Аккумулятор теплоты с фазопереходным материалом. Автор: Бабаев Баба Джабраилович (RU), Заявка: 2013152593/06, 26.11.2013, Опубликовано: 10.04.2015 Бюл. № 10.

ющими от аккумуляторной батареи автомобиля при выключенном двигателе или от источника питания².

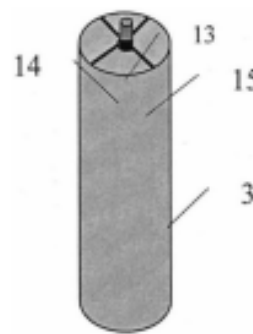


Рис. 5. Электронагреватель в вертикальной трубке

Fig. 5. Electric heater in a vertical tube

² Патент РФ 2 506 503 С1, МКИ 7 F24Н 7/00. Тепловой аккумулятор фазового перехода с саморегулируемым устройством электроподогрева. Авторы: Бублий Сергей Анатольевич (RU), Бублий Инна Анатольевна (RU), Котровский Александр Валентинович (RU), Котровская Ирина Олеговна (RU), Котровский Александр Александрович (RU), Савчук Роман Васильевич (RU), Фролов Александр Леонидович (RU), Заявка: 2012145181/06, 24.10.2012, Опубликовано: 10.02.2014 Бюл. № 4.

Схема теплового аккумулятора фазового перехода с саморегулируемым устройством электроподогрева представлена на рис. 6, где 1 – корпус внешний [11]; 2 – теплоизоляция; 3 – корпус внутренний; 4 – капсулы с теплоаккумулирующим материалом; 5 – зазоры для прохождения теплоносителя; 6 – входная труба; 7 – выходная труба; 8 – болт; 9 – крышка диэлектрик; 10 – крышка разборная; 11 – нагревательные элементы саморегулирующиеся на позисторной керамике; 12 – корпус элемента нагрева; 13 – шина для подвода электрического тока; 14 – подача электропитания (9+12, 24 В)¹.

При теплообмене теплоносителя с расплавленным ТАМ прогревается ДВС, а ТАМ в результате фазового перехода выделяет скрытую теплоту и затвердевает. Происходит нагрев теплоносителя и узлов ДВС от выделенной накопленной теплоты. Данный тепловой аккумулятор накапливает тепло при работающем и выключенном двигателе, и отдает его маслу системы смазки, или охлаждающей жидкости системы охлаждения для установления температуры, необходимой для запуска двигателя при низкой температуре окружающей среды.

Результаты и их обсуждение

В результате проведенного обзора тепловых аккумуляторов с фазовым переходом на основе парафина было определено три направления их использования. По каждому из направлений вы-

браны по одному образцу тепловых аккумуляторов, представляющие наиболее совершенные конструкции, на основе которых можно вести будущие исследования.

Бескорпусный аккумулятор теплоты на фазовом переходе [9] (см. рис. 1) можно использовать в системе децентрализованного отопления. При большой длине теплоаккумулирующих ячеек, целью исследования бескорпусного теплового аккумулятора является проведение экспериментов по расположению теплоаккумулирующих ячеек не только прямолинейно и вертикально, но и в виде криволинейных вставок П-образной, U-образной или в виде вертикального змеевика, присоединяя к трубчатым коллекторам (гребёнкам)¹. Варианты присоединения показаны на рис. 7 [9]. Теплоаккумулирующие ячейки данного теплового аккумулятора можно изготавливать из полимеров, а не из стали, это может быть использовано для дальнейших исследований.

Аккумулятор теплоты с фазопереходным материалом, заряжающийся от солнечной энергии, представляет собой универсальную версию, позволяющую заряжаться от солнечного излучения, электрического источника питания и теплоносителя системы отопления. Данный тепловой аккумулятор интересен для

¹ Умеренков Е.В. Разработка аккумуляторов теплоты на фазовом переходе для систем теплоснабжения: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2013. 160 с.

горячего водоснабжения и резервирования котла в системе отопления частного жилого дома [10]. Имеет место рассмотреть возможность зарядки данного теплового аккумулятора не от солнечного излучения, а от солнечного коллектора, нагревающего жидкость, которая и будет заряжать тепловой аккумулятор [11].

Тепловой аккумулятор фазового перехода для предпусковой подготовки двигателя внутреннего сгорания имеет хорошие перспективы внедрения в экс-

плуатацию автомобилей, что позволит увеличить ресурс двигателя, уменьшить расход топлива [12]. Особенно актуально применение тепловых аккумуляторов для дизельных двигателей, при холодном пуске с температурой ниже 5°C . Данная температура была определена в ходе теоретических и экспериментальных исследований, при запуске дизельного двигателя, проведенных научными сотрудниками Ижевска и Казани [13].

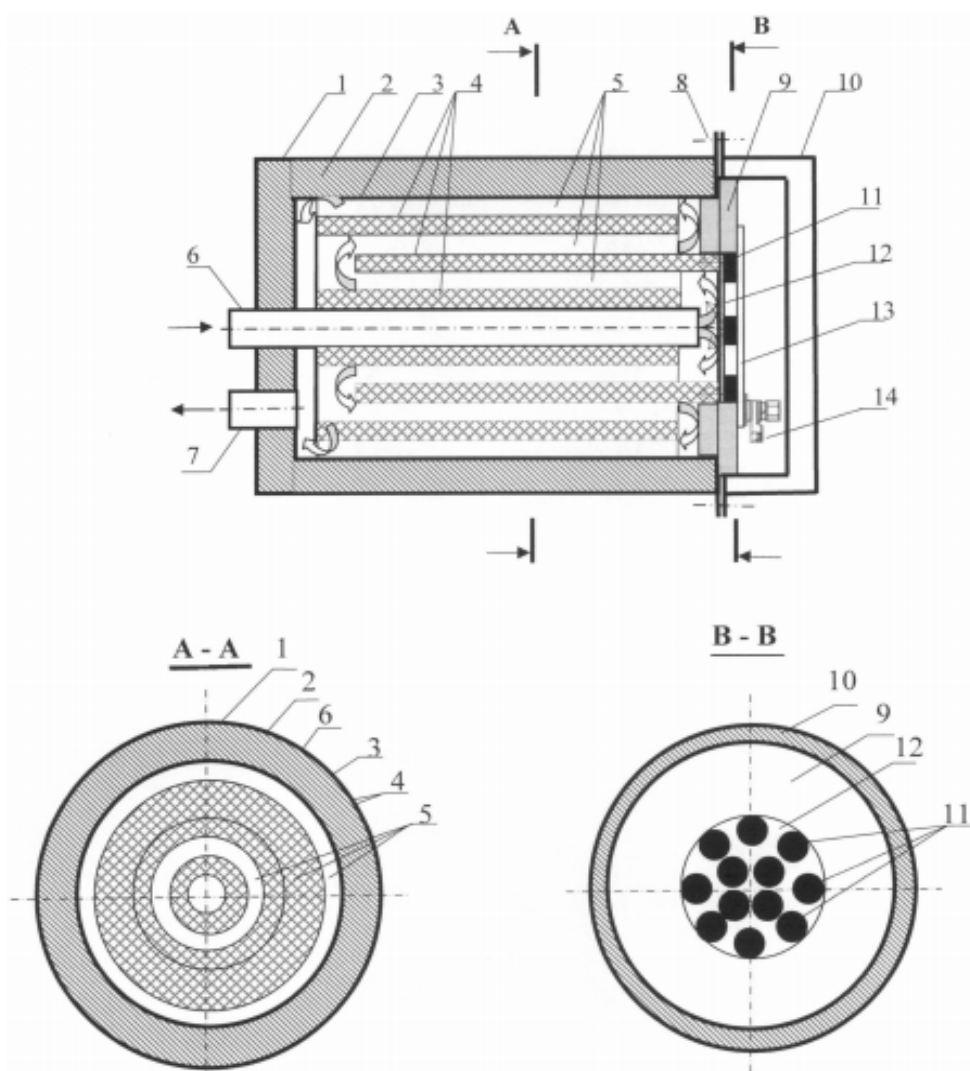


Рис. 6. Тепловой аккумулятор фазового перехода с саморегулируемым устройством электроподогрева

Fig. 6. Phase change thermal accumulator with a self-regulating electric heating device

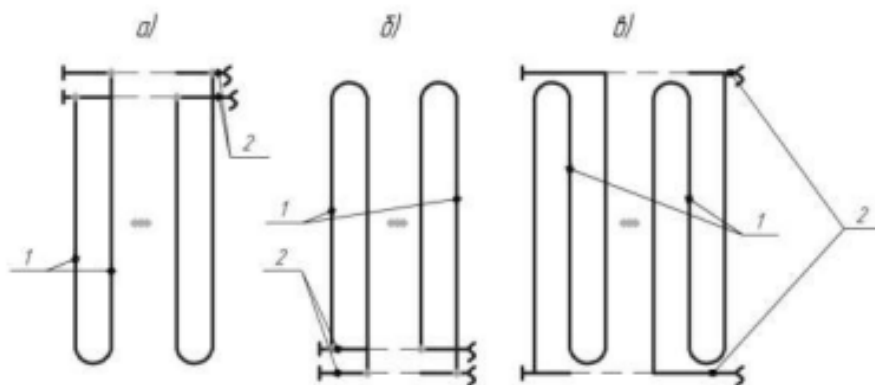


Рис. 7. Различные способы подключения трубок для теплообмена: 1 – с теплоаккумулирующим материалом к сборным коллекторам; 2: а – U-образное; б – П-образное; в – в виде вертикального змеевика [9]

Fig. 7. Various methods of connecting tubes for heat exchange 1 – with heat-storing material to collecting manifolds; 2: а – U-shaped; б – U-shaped; в – in the form of a vertical coil [9]

Повысить надежность и безопасность пуска, снизить ущерб моторесурсу при холодном пуске можно, используя аккумулятирование тепловой энергии отработанных газов поршневого двигателя [14].

Выводы

В результате проведенного обзора определены три направления для применения тепловых аккумуляторов фазового перехода: системы отопления и горячего водоснабжения от традиционных источников энергии, системы отопления и горячего водоснабжения от возобновляемых источников энергии, предпусковая подготовка двигателей внутреннего сгорания.

Дальнейшее усовершенствование бескорпусного теплового аккумулятора будет заключаться в поиске различных способов его присоединения в обратную трубу системы отопления, для более эффективного использования низкопотенциального тепла децентрализованного отопления. Так же теплоаккумуляти-

рующие ячейки этого теплового аккумулятора можно изготавливать из полимеров, полипропиленов, а не из стали. В этом направлении будет проводиться разработка теплоаккумулятирующих ячеек бескорпусного теплового аккумулятора из полиэтиленовых труб и фитингов ПЭ100 SDR11 или ПЭ100 SDR17. Готовые образцы пройдут проверку своей эффективности в системе отопления жилого дома. Корпусы теплоаккумулятирующих ячеек будут иметь ряд преимуществ, они более легкие, дешевые, имеют различные конфигурации.

Задачей для усовершенствования теплового аккумулятора будет изучение возможности зарядки не от солнечного излучения, а от солнечного коллектора, нагревающего жидкость, которая и будет заряжать тепловой аккумулятор, или от солнечных батарей, вырабатывающих электрическую энергию, которая будет подаваться на электроды, установленные внутри трубок с теплоаккумулятирующим материалом. Последующее изучение

процессов работы теплового аккумулятора состоит в разработке решений накапливать солнечную энергию в периоды её избыточной выработки, использовать в качестве резерва отопительного котла в жилом доме [15].

При низких температурах воздуха и без подзарядки в течение нескольких дней тепловой аккумулятор предпусковой подготовки двигателя внутреннего сгорания разряжается, поэтому есть задача разработать возможность применения пускового устройства для нагрева охлаждающей жидкости или масла системы смазки двигателя, для последующей зарядки теплового аккумулятора. Пусковой подогреватель, на примере существующих образцов автономного отопления салона автомобиля, устанавливается в моторном отсеке, подключается к системе охлаждения, топливной системе и бортовой электросети автомобиля. За счет сжигания топлива, подаваемого из бака специальным насосом, подогреватель нагревает жидкость в системе охлаждения автомобиля, которая заряжает тепловой аккумулятор.

Так же необходимо провести поиск новых теплоизоляционных материалов для сохранения максимально длительного заряженного состояния теплового аккумулятора.

Определить и разработать возможность компактной установки тепловых

аккумуляторов для отбора тепла выхлопных газов от двигателей внутреннего сгорания.

Тепловые аккумуляторы фазового перехода, пока еще не имеют серийного производства в системах отопления и двигателях внутреннего сгорания, но представляют большой интерес в дальнейшем, с целью усовершенствования их конструкций. Уже известно, что тепловые аккумуляторы на фазовом переходе на основе парафина имеют хорошие показатели: выделяют большое количество энергии при фазовом переходе. Парафины выпускаются в большом количестве нефтяной промышленностью, нетоксичны, не вызывают коррозию металла. В то же время тепловые аккумуляторы фазового перехода имеют недостатки - габариты, конструктивные особенности устройства. Это и будет являться целью дальнейшего исследования, а также создания более легких конструкций с применением полимеров.

Существует необходимость разработать возможность компактной установки тепловых аккумуляторов для отбора тепла от продуктов сгорания, так как информации и исследований по накоплению энергии тепловыми аккумуляторами фазового перехода при отводе дымовых газов от котлов в жилых домах, двигателей внутреннего сгорания мало.

Список литературы

1. Проектирование льдоаккумулятора и внедрение технологии в систему теплоснабжения здания / Б.А. Христенко, Д.А. Кругликов, В.Ю. Чайкин, В.А. Петров,

И.А. Султангузин // Энергосбережение – теория и практика: труды X Межд. школы-семинара молодых учёных и специалистов. Москва, 19–23.10.2020. Курск, 2020.

2. Квитко А. В., Сидоренко А. Д. Особенности и способы аккумулирования энергии, получаемой от возобновляемых источников энергии // Сборник статей по материалам национальной конференции, посвященной 100-летию Кубанского ГАУ. Краснодар: КубГАУ, 2021. С. 365-397.

3. Babaev B.D. Principles of Heat accumulation and Heataccumulating materials in Use // High Temperature. 2014. Vol. 52 (5). P.736–751. <https://doi.org/10.1134/S0018151X14050010/>

4. Sari A. Thermal Energy Storage Properties and Laboratory-Scale Thermoregulation Performance of bentonite/Paraffin Composite Phase Change material for Energy-Efficient buildings // Journal of materials in Civil Engineering. 2017. Vol. 29 (6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001775](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001775).

5. Торопов А.Л. Комбинированные тепловые гелиосистемы. Часть 2. Тепловые аккумуляторы, бойлеры косвенного нагрева индивидуальных и децентрализованных систем отопления и горячего водоснабжения. М., 2019. С.16-18.

6. Назначение и классификация тепловых аккумуляторов // Научная электронная библиотека. URL: <https://monographies.ru/ru/book/section?id=16892>.

7. К вопросу выбора теплоаккумулирующего материала для тепла гелиосистемы горячего водоснабжения / Э.В. Умеренкова, Е.В. Умеренков, М.С. Буровникова, Е.В. Припачкина. Курск, 2020. С. 359-362.

8. Торопов А.Л. Автономные системы теплоснабжения малой мощности. Настенные газовые котлы и тепловые аккумуляторы. М.: изд-во МИСИ-МГСУ, 2022. 134 с.

9. Умеренкова Э.В., Умеренков Е.В., Котенко В.И. Конструкция бескорпусного аккумулятора теплоты // Известия Юго-Западного государственного университета. 2015. № 4 (61). С.41-45.

10. Бутузов А.В., Бутузов В.В. Использование солнечной энергии для производства тепловой энергии. М.: Интехэнерго-Издат; Теплоэнергетик, 2015.

11. Строительный портал. URL: http://www.altaystroy.ru/articles/169108kak_sberech_teplo_i_dengi_v_chastnom_dome.html

12. Терзи Д.В., Алтухов Я.В., Матери И.В. Тепловой аккумулятор фазового перехода как средство улучшения пусковых характеристик двигателей в условиях отрицательных температур // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2020. № 5-6.

13. Оптимизация методов и параметров предпусковой тепловой подготовки двигателя для запуска в зависимости от температуры окружающей среды / Е.А. Потапов, Д.А. Вахрамеев, С.А. Синицкий, В.М. Медведев, А.Г. Терентьев // Вестник Казанского ГАУ. 2021. № 4(64).

14. Korobitsyn M.A. Analysis of Cogeneration, Combined and Integrated Cycles. Enschede: Febodruk BV, 2008. P. 30.

15. Перспективы развития инженерной системы энергоэффективного дома / В.А. Петров, В.Ю. Чайкин, Б.А. Христенко, И.Д. Савицкий, И.А. Султангузин, Е.А. Демидов, А.Н. Нечаев, А.В. Скоробатюк // Энергосбережение – теория и практика: труды X Межд. школы-семинара молодых учёных и специалистов. Москва, НИУ «МЭИ», 19–23.10.2020. Курск, 2020. С. 66–72.

References

1. Khristenko B.A., Kruglikov D.A., Chaikin V.Yu., Petrov V.A., Sultanguzin I.A. Design of an ice accumulator and implementation of technology in the heating system of a building. In: *Energoberezhenie — teoriya i praktika. Trudy X Mezhd. shkoly-seminara molodykh uchenykh i spetsialistov* = *Energy saving - theory and practice. Proceedings of X Int. school-seminar for young scientists and specialists*. Kursk; 2020 (In Russ.).

2. Kvitko A. V., Sidorenko A. D. Features and methods of accumulating energy obtained from renewable energy sources. In: *Sbornik statei po materialam natsional'noi konferentsii, posvyashchennoi 100-letiyu Kubanskogo GAU* = *Collection of articles based on the materials of the national conference dedicated to the 100th anniversary of the Kuban State Agrarian University*. Krasnodar: KubGAU; 2021. P. 365-397 (In Russ.).

3. Babaev B.D. Principles of Heat accumulation and Heataccumulating materials in Use. *High Temperature*. 2014; 52(5): 736–751. Doi: 10.1134/S0018151X14050010/

4. Sari A. Thermal Energy Storage Properties and Laboratory-Scale Thermoregulation Performance of bentonite/Paraffin Composite Phase Change material for Energy-Efficient buildings. *Journal of materials in Civil Engineering*. 2017; 29(6). [https://doi.org/ 10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001775](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001775).

5. Toropov A.L. Combined thermal solar systems. Part 2. Thermal accumulators, indirect heating boilers for individual and decentralized heating and hot water supply systems. Moscow; 2019. P. 16-18 (In Russ.).

6. Purpose and classification of thermal accumulators. In: *Nauchnaya elektronnyaya biblioteka* = *Scientific electronic library*. (In Russ.). Available at: <https://monographies.ru/ru/book/section?id=16892>

7. Umerenkova E.V., Umerenkov E.V., Burovnikova M.S., Pripachkina E.V. On the issue of choosing a heat-storing material for the heat of a solar hot water supply system. Kursk; 2020. P. 359-362 (In Russ.).

8. Toropov A.L. Autonomous low-power heat supply systems. Wall-mounted gas boilers and heat accumulators. Moscow: MISS-MGSU; 2022. 134 p. (In Russ.).

9. Umerenkova E.V., Umerenkov E.V., Kotenko V.I. Design of a frameless heat accumulator. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2015; (4): 41-45. (In Russ.).
10. Butuzov A.V., Butuzov V.V. Using solar energy to produce thermal energy. Moscow: Intekhenergo-Izdat; Teploenergetik; 2015 (In Russ.).
11. Construction portal. (In Russ.). Available at: http://www.altaystroy.ru/articles/169108kak_sberech_teplo_i_dengi_v_chastnom_dome.html
12. Terzi D.V., Altukhov Y.V., Moteri I.V. Phase change thermal accumulator as a means of improving the starting characteristics of engines at subzero temperatures. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeistviya terrorizmu = Issues of defense technology. Episode 16: Technical means of countering terrorism*. 2020; 5-6 (In Russ.).
13. Potapov E.A., Vakhrameev D.A., Sinitsky S.A., Medvedev V.M., Terentyev A.G. Optimization of methods and parameters of pre-start thermal preparation of an engine for starting depending on ambient temperature. *Vestnik Kazanskogo GAU = Bulletin of Kazan State Agrarian University*. 2021; 4 (In Russ.).
14. Korobitsyn M.A. Analysis of Cogeneration, Combined and Integrated Cycles. Enschede: Febodruk BV; 2008. P. 30.
15. Petrov V.A., Chaikin V.Yu., Khristenko B.A., Savitsky I.D., Sultanguzin I.A., Demidov E.A., Nechaev A.N., Skorobatiuk A.V. Prospects for the development of an engineering system for an energy-efficient house. Energy saving - theory and practice. In: *Energosberezhenie — teoriya i praktika. Trudy X Mezhd. shkoly-seminara molodykh uchenykh i spetsialistov = Proceedings of the X Int. school-seminar for young scientists and specialists*. Kursk; 2020. P. 66–72 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Милёхин Михаил Иванович, аспирант,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail.ru: melehin.mim@gmail.com

Mikhail I. Milekhin, Post-Graduate Student,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail.ru: melehin.mim@gmail.com

Умеренков Евгений Валерьевич,
кандидат технических наук, доцент кафедры
инфраструктурных энергетических систем,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail.ru: melehin.mim@gmail.com

Evgenii V. Umerenkov, Cand. of Sci.
(Engineering), Associate Professor
of the Infrastructure Energy Systems Department,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail.ru: melehin.mim@gmail.com

Оригинальная статья / Original article

УДК 699.86

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-50-68>

Методика выбора энергоэффективных теплоизоляционных материалов с помощью среды визуального программирования Dynamo

Е. Ю. Чакин¹, О. С. Гамаюнова¹ ✉

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

✉ e-mail: gamayunova_os@spbstu.ru

Резюме

Цель исследования: разработка методики выбора энергоэффективных теплоизоляционных материалов с помощью среды визуального программирования Dynamo с целью повышения энергоэффективности ограждающих конструкций зданий и сооружений.

Методы. Исследование выполнено с помощью теоретических и практических методов. Теоретическое исследование выполнено на основе анализа научных публикаций, а также нормативных требований в сфере энергоэффективности. Практическое исследование выполнено с помощью реализации методики подбора теплоизоляционных материалов в программном комплексе Revit с использованием среды визуального программирования Dynamo.

Результаты. Изучены возможности среды визуального программирования Dynamo, позволяющих автоматизировать моделирование и разработку проектной документации в программном комплексе Revit, автоматизировать процесс армирования конструкций, проектирования инженерных сетей и систем, создавать автоматизированные системы контроля качества BIM-моделей и др. Особое внимание в работе уделено возможностям Dynamo для автоматизации выполнения теплотехнического расчета и подбора энергоэффективных теплоизоляционных материалов. Создана библиотека теплоизоляционных материалов, которую можно дополнять и копировать из одного проекта в другой стандартным функционалом Revit. Создано два скрипта Dynamo. Результат работы первого – полная автоматизация теплотехнического расчета в Revit, итог работы второго – подбор теплоизоляционного материала с учетом требований по тепловой защите зданий. Разработана методика выбора энергоэффективных теплоизоляционных материалов с помощью среды визуального программирования Dynamo. Достоверность расчетов, полученных на основе разработанных скриптов, подтверждена результатами ручного расчета.

Заключение. Применение современных BIM-технологий при выборе энергоэффективных теплоизоляционных материалов позволяет оптимизировать процесс расчетов, а также дает возможность найти наиболее экономичные решения для сокращения расходов и повышает скорость проектирования.

Ключевые слова: BIM; Revit; Dynamo; ограждающие конструкции; теплоизоляционные материалы; утеплитель; энергоэффективность; теплотехнический расчет; визуальное программирование.

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

Для цитирования Чакин Е. Ю., Гамаюнова О. С. Методика выбора энергоэффективных теплоизоляционных материалов с помощью среды визуального программирования *Dynamo* // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №3. С. 50-68. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-50-68>.

Поступила в редакцию 17.05.2024

Подписана в печать 20.06.2024

Опубликована 30.09.2024

Methodology for selecting energy-efficient thermal insulation materials using the Dynamo visual programming environment

Egor Y. Chakin ¹, Olga S. Gamayunova ¹ ✉

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

✉ e-mail: politovyevegeny@yandex.ru

Abstract

Purpose of research: development of a methodology for selecting energy-efficient thermal insulation materials using the Dynamo visual programming environment in order to increase the energy efficiency of building envelopes and structures.

Methods. The study was carried out using theoretical and practical methods. The theoretical study was carried out based on an analysis of scientific publications, as well as regulatory requirements in the field of energy efficiency. The practical study was carried out using the implementation of the methodology for selecting thermal insulation materials in the Revit software package using the Dynamo visual programming environment.

Results. The capabilities of the visual programming environment Dynamo have been studied, allowing to automate the modeling and development of design documentation in the Revit software package, automate the process of reinforcing structures, designing utility networks and systems, creating automated quality control systems for BIM models, etc. Particular attention in the work is paid to the capabilities of Dynamo for automation performing thermal engineering calculations and selecting energy-efficient thermal insulation materials. A library of thermal insulation materials has been created, which can be supplemented and copied from one project to another using standard Revit functionality. Two Dynamo scripts have been created. The result of the work of the first is the complete automation of thermal engineering calculations in Revit, the result of the work of the second is the selection of thermal insulation material taking into account the requirements for thermal protection of buildings. A methodology has been developed for selecting energy-efficient thermal insulation materials using the Dynamo visual programming environment. The reliability of calculations obtained on the basis of developed scripts is confirmed by the results of manual calculations.

Conclusion. The use of modern BIM technologies when choosing energy-efficient thermal insulation materials allows you to optimize the calculation process, and also makes it possible to find the most cost-effective solutions to reduce costs and increases design speed.

Keywords: BIM; Revit; Dynamo; enclosing structures; thermal insulation materials; insulation; energy efficiency; thermal calculations; visual programming.

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

For citation: Chakin E. Y., Gamayunova O. S. Methodology for selecting energy-efficient thermal insulation materials using the Dynamo visual programming environment. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(3): 50-68 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-50-68>.

Received 17.05.2024

Accepted 20.06.2024

Published 30.09.2024

Введение

Dynamo – среда визуального программирования с открытым программным кодом, разрабатываемая крупнейшим в мире поставщиком программного обеспечения для сферы строительства – Autodesk. Главным назначением среды является создание новых программных функций, позволяющих анализировать большие массивы данных и оптимизировать рутинные процессы [1].

Процесс визуального программирования среды Dynamo можно представить, как последовательный набор действий, выполняемых по заданному алгоритму. Данный алгоритм выполняется с помощью предварительно разработанных текстовых фрагментов программного кода - узлов (англ. node), последовательность которых составляет сценарий (англ. script).

Благодаря BIM-технологиям стали возможны оптимизация и ускорение привычных процессов проектирования зданий и сооружений. Р.М. Смакаев, Т.А. Низина в работе [1] описали созданные алгоритмы Dynamo, позволяющих автоматизировать моделирование и разработку проектной документации в программном комплексе Revit. Авторы указывают на увеличение эффективности применения таких алгоритмов при выполнении большого количества повторяющихся однотипных операций, разработке типовых объектов или построении сложной параметрической

геометрии. Экономия времени на подготовку проектной документации подтверждается и в работах [2-4].

Ряд научных публикаций описывает использование Dynamo для автоматизации процесса армирования конструкций. Я.Е. Агафонов, М.Д. Черкасова [5] использовали Dynamo для создания программы для редактирования арматуры плиты в Revit на основании мозаики, полученной из ПК ЛИРА-САПР 2019. В результате работы получена программа, которая по исходным данным (плита, файл с мозаикой армирования, таблица соответствия цвета) изменяет арматуру выделенных объектов на пересчитанную с помощью ПВК ЛИРА. Программа демонстрирует возможность улучшения и автоматизации связки Revit – ЛИРА 2019 и оптимизации армирования, однако код узкоспециализирован и ограничен в функционале. В работе [6] А. Степанова, Л.А. Шилова разработали алгоритм армирования элементов железобетонных конструкций и апробировали его при армировании колонны с прямоугольным сечением, используя существующие нормы армирования колонн.

Н.Б. Колосова и В.В. Сергеев изучили совместную работу системы визуального программирования Dynamo и электронных таблиц MS Excel [7]. Разработанный авторами скрипт предложено использовать при подсчете земляных работ и исследовании картограммы

земляных работ с целью минимизирования затрат на производство работ нулевого цикла, что, например, может быть использовано в дорожном строительстве при прокладке наиболее экономически обоснованного маршрута дороги по критерию минимизации затрат на строительство.

Dynamo может применяться и при проектировании инженерных сетей и систем [8, 9], создании автоматизированной системы контроля качества BIM-моделей [10]. Подробный обзор возможностей использования Revit API и Dynamo в BIM представлен в работе [11].

Большой интерес в строительной сфере уделяется энергоэффективности ограждающих конструкций [12-15], моделированию температурно-влажностного режима [16-18], определению теплотехнических свойств строительных материалов [19-21]. При этом в основе повышения энергетической эффективности ограждающих конструкций лежит, как правило, теплотехнический расчет. Некоторые авторы предлагают различные варианты автоматизации таких расчетов. Так, например, П. Ярашов, А.Ю. Городишенина предложили алгоритм создания скрипта для автоматизированного теплотехнического расчета в Dynamo [22]. Разработанный авторами скрипт позволяет ускорить процесс проектирования, однако имеет ограничение – он предназначен только для расчета надземной части здания.

Возможности BIM-комплексов, основные принципы программирования Dynamo, а также скрипт Dynamo для теплотехнического расчета представлены в работе [23]. На основании обзора теплоизоляционных материалов, представленных в [24], была поставлена цель: разработать методику выбора энергоэффективных теплоизоляционных материалов с помощью среды визуального программирования Dynamo.

Материалы и методы

Исследование выполнено с помощью теоретических и практических методов. Теоретическое исследование выполнено на основе анализа научных публикаций, а также нормативных требований в сфере энергоэффективности. Практическое исследование выполнено с помощью реализации методики подбора утеплителей в программном комплексе Revit с использованием инструмента визуального программирования Dynamo.

Для создания скрипта Dynamo в Revit 2021 создана цифровая модель двухэтажного жилого здания (рис.1) с площадью ограждающих стеновых конструкций, равной 253,71 м² [23].

На начальном этапе в Revit необходимо внести данные теплоизоляционных материалов (плотность, коэффициент теплопроводности, стоимость). Общий вид добавленных материалов в диспетчер материалов представлен на рис. 2.



Рис. 1. Цифровая модель здания

Fig. 1. Digital building model

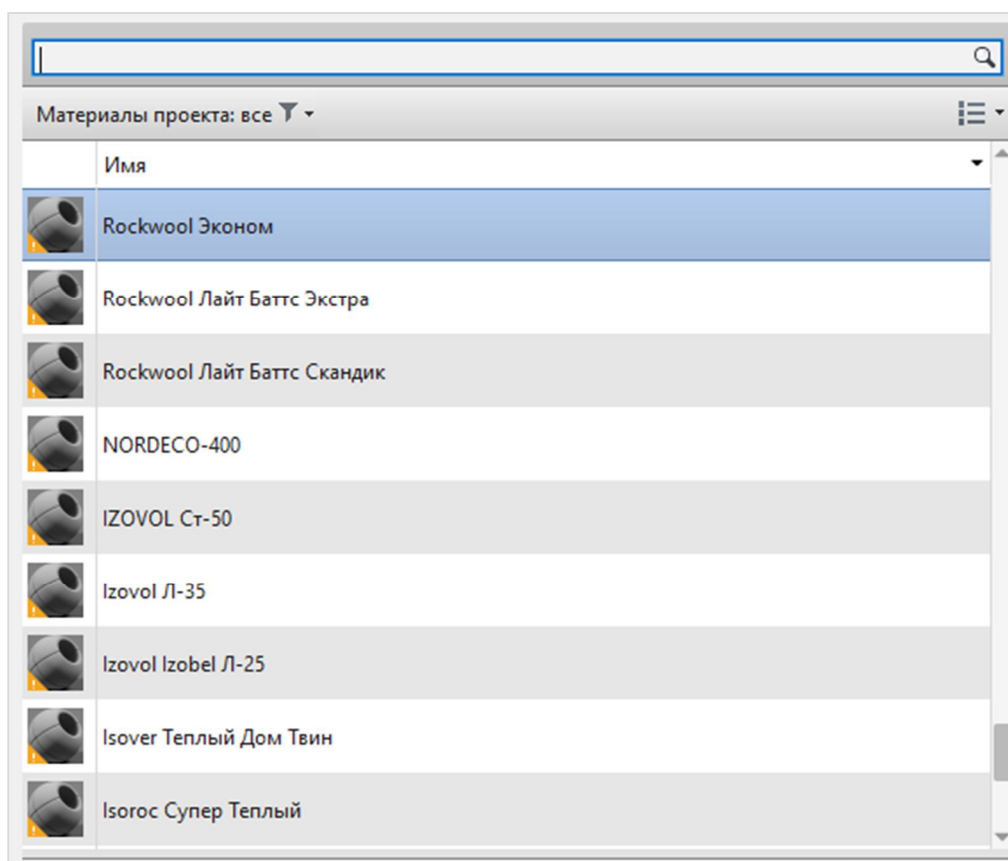


Рис. 2. Теплоизоляционные материалы, добавленные в модель Revit

Fig. 2. Thermal insulation materials added to the Revit model

На следующем этапе в Revit-модель необходимо внести параметры, используемые для теплотехнического расчета. С помощью файла общих параметров (ФОП), выполненного на основе стандартного ADSK-шаблона, создается набор требуемых параметров (рис. 3): коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, коэффициент теплоотдачи наружной

поверхности ограждающей конструкции, коэффициенты, значения которых следует принимать по данным табл. 3 в СП 50.13330.2012, требуемое и приведенное сопротивление теплопередаче, город (параметр, в котором будет возможность выбора города, от которого будет зависеть значение градусо-суток отопительного периода (ГСОП), и, наконец, значение ГСОП.

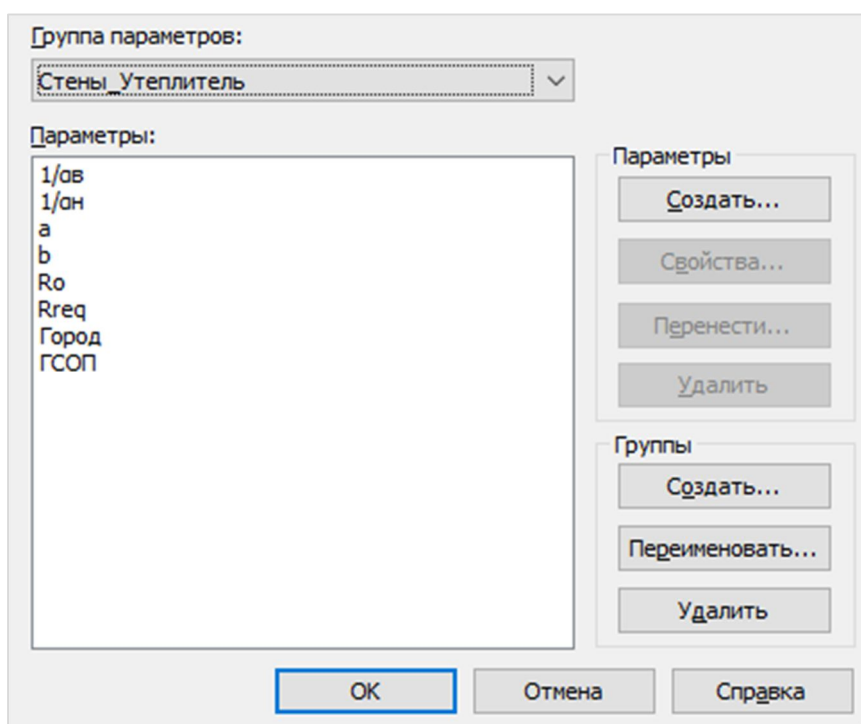


Рис. 3. Создание параметров в файле общих параметров

Fig. 3. Creating Settings in a General Settings File

В качестве примера использована ограждающая стеновая конструкция, состоящая из бетона, теплоизоляционного материала из каменной ваты, а также облицовки из кирпича. На основании заданных коэффициентов теплопроводности и толщины слоя каждого материала, Revit автоматически вычисляет параметр

термического сопротивления слоя однородной части фрагмента.

С помощью среды визуального программирования Dynamo был создан скрипт, который автоматизирует определение требуемого сопротивления теплопередаче с учетом климатических условий выбранного города. Параметр го-

рода заполняется с помощью нода (блока или узла, из которых собирается скрипт) `Element.SetParameterByName`.

Заполнение параметра ГСОП осуществляется с помощью файла Excel, где предварительно по формуле (5.2) из СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003» рассчитано значение ГСОП. Для импорта из Excel в Dynamo используется нод `Data.ImportExcel`. Скрипт для заполнения параметра ГСОП представлен на рис.4.

Далее, используя нод `Element.SetParameterByName`, на основании зна-

чений из СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003» заполняются коэффициенты:

$\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м²·°C);

$\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м²·°C);

a и b – коэффициенты, значения которых следует принимать по данным табл. 3 СП 50.13330.2012 для соответствующих групп зданий.

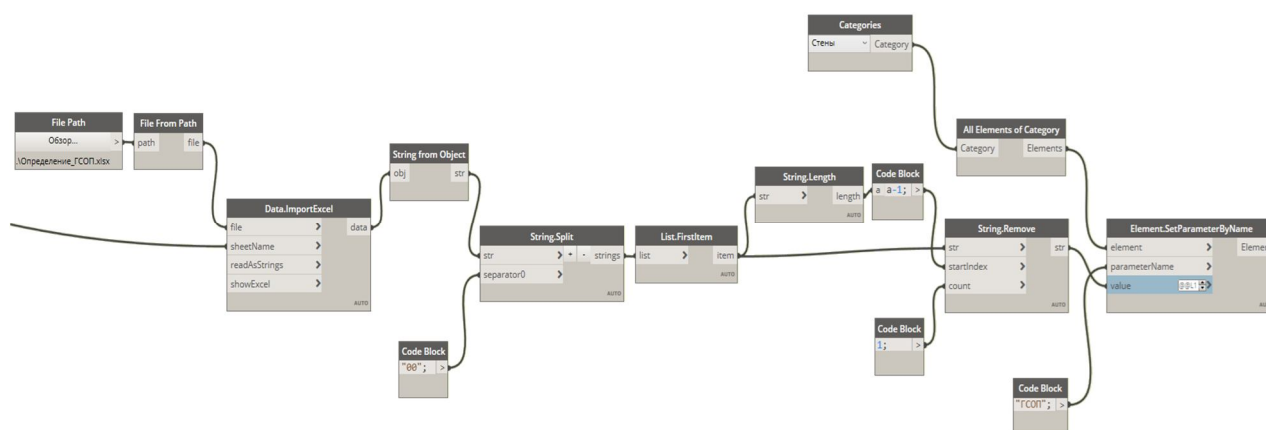


Рис. 4. Скрипт для заполнения параметра градусо-сутки отопительного периода

Fig. 4. Script for filling in the degree-day parameter for the heating period

На рис. 5 и 6 представлено автоматизированное заполнение данных параметров с помощью скрипта.

Более сложную структуру имеет скрипт (рис.7), который заполняет параметр требуемого сопротивления теплопередаче (R_{req}).

На следующем этапе происходит выполнение скрипта, который заполняет параметр требуемого сопротивления теплопередаче.

Автоматизированный подбор толщины теплоизоляционного материала происходит за счет работы второго скрипта, который, в свою очередь, подбирает множество вариантов, а затем с помощью сводной спецификации сравнивает значения требуемого и приведенного сопротивления теплопередаче. Причем значения, не обеспечивающие значение требуемого сопротивления теплопередаче, после настройки фильтрации в таблицу не попадают.

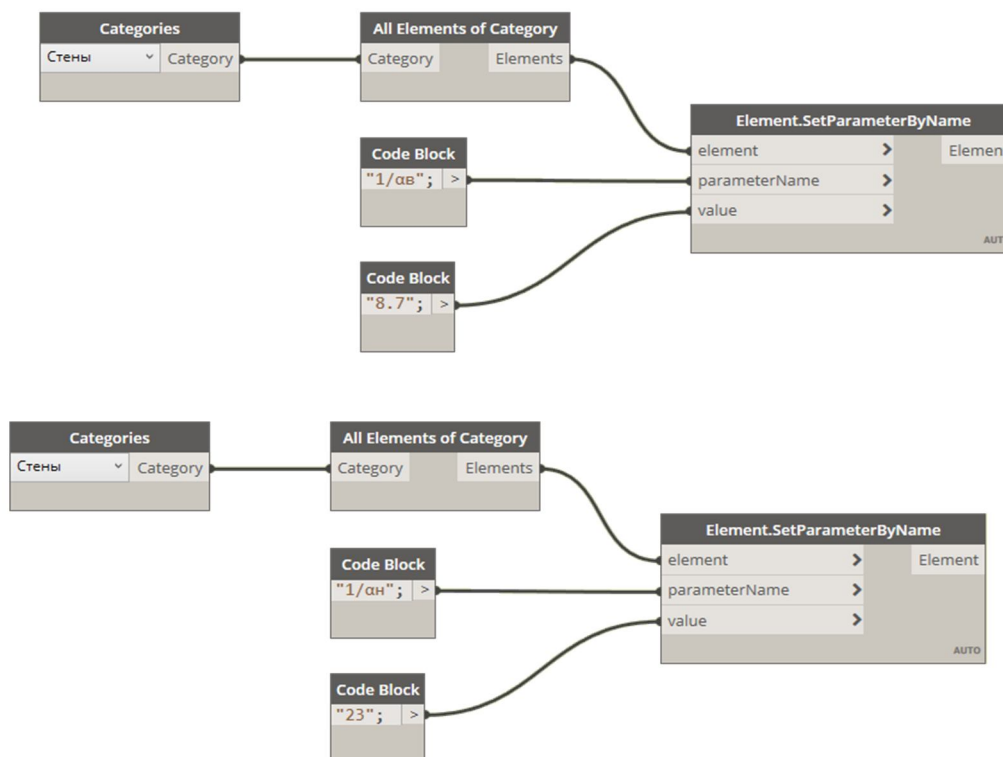


Рис. 5. Скрипт для заполнения коэффициентов α_b , α_n

Fig. 5. Script for filling in the coefficients α_b , α_n

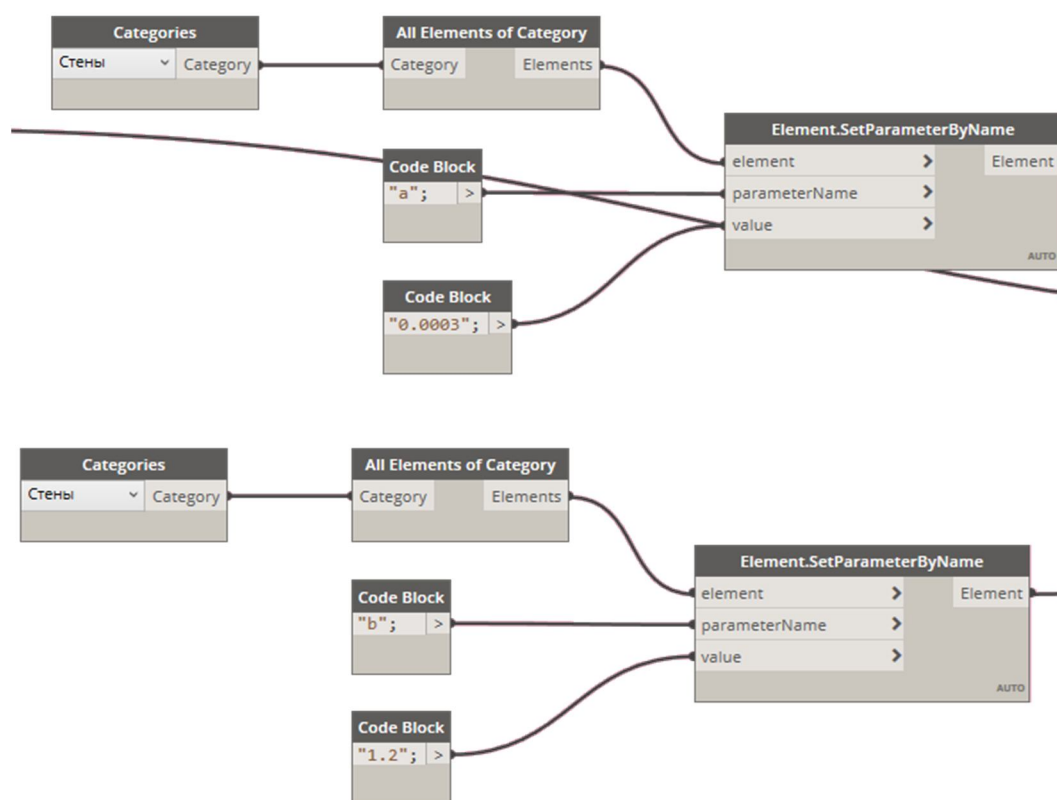


Рис. 6. Скрипт для заполнения коэффициентов a и b

Fig. 6. Script for filling in coefficients a and b

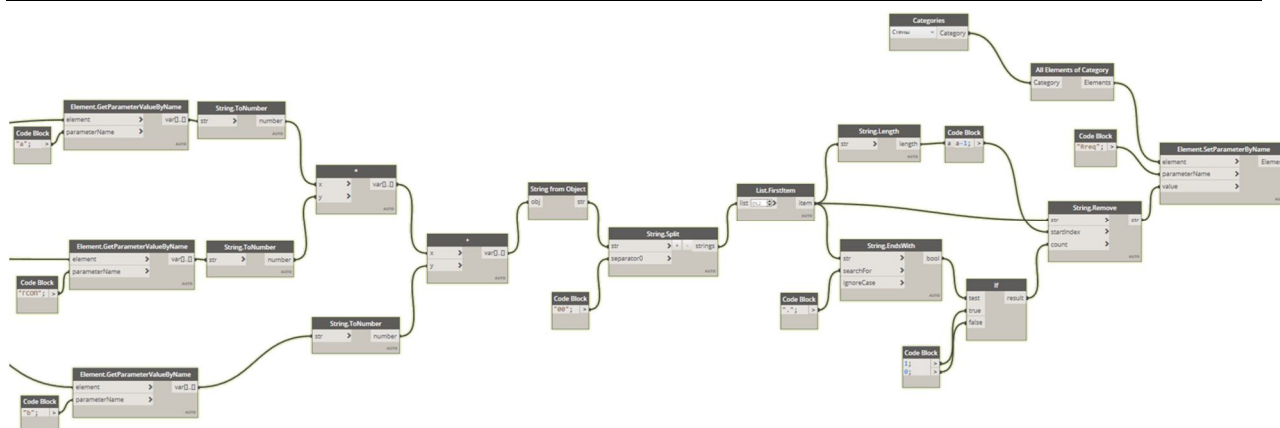


Рис. 7. Скрипт для заполнения требуемого сопротивления теплопередаче

Fig. 7. Script for filling in the required heat transfer resistance

Наименование типоразмеров назначается с помощью таблицы в Excel, из которой Dynamo также берет данные наименования и толщины теплоизоляционного материала [23]. Настройки фильтрации в ведомости формируются согласно правилу: приведенное сопротивление теплопередаче (R_{req}) должно

быть больше или равно требуемому сопротивлению теплопередаче (R_0). В итоге получаем сводную ведомость из вариаций стеновых конструкций с различными типами теплоизоляционных материалов и толщинами. Общий вид скрипта показан на рис.8.

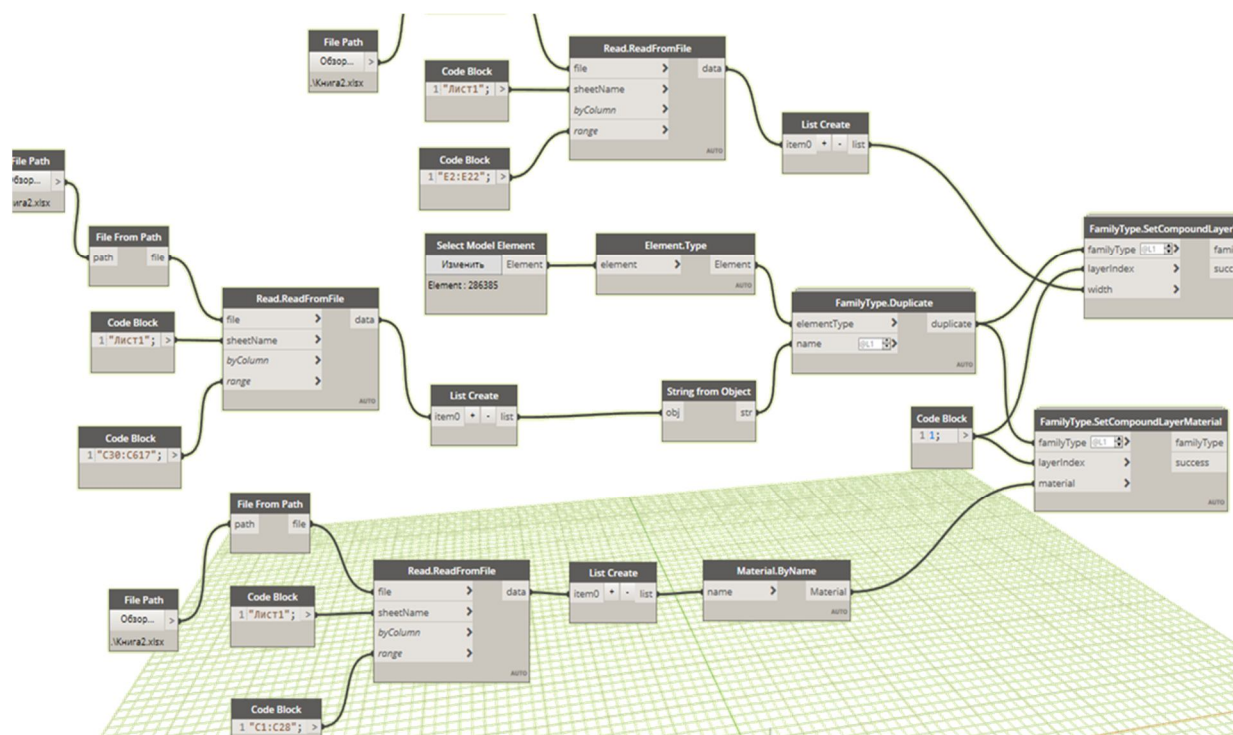


Рис. 8. Скрипт для создания различных вариаций толщин и производителей утеплителя

Fig. 8. Script for creating different variations of thicknesses and insulation manufacturers

В итоге, благодаря сводной ведомости можно увидеть все подходящие варианты теплоизоляционных материалов, удовлетворяющие теплотехническому расчету согласно СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003».

На заключительном этапе осуществляется подбор различных вариантов теплоизоляционных материалов для стеновых ограждающих конструкций, соответствующих требованиям тепловой защиты зданий и сооружений.

Выбор теплоизоляционного материала осуществляется с помощью сводной ведомости. Сортировка ведомости устроена таким образом, что сначала выводятся стеновые ограждающие конструкции с наименьшими значениями стоимости утеплителя за м³. Согласно второму этапу сортировки стеновые конструкции со значениями приведённого сопротивления теплопередаче, которые наиболее приближены к значению требуемого сопротивления теплопередаче выводятся в верх ведомости. Таким образом сверху ведомости будут выводиться наиболее оптимальные варианты теплоизоляционных материалов.

С учетом всех представленных выше этапов, методику выбора энергоэффективных теплоизоляционных материалов с помощью среды визуального программирования Dynamo можно представить в виде схемы (рис. 9).

Результаты и их обсуждение

Для подбора энергоэффективного теплоизоляционного материала воспользуем-

ся стандартным функционалом Revit и сформируем спецификацию.

Для определения трансмиссионных потерь воспользуемся функцией редактирования ведомостей в Revit (инструмент «Расчетное значение») и формулой (1), которую перенесем в Revit.

$$Q_{\text{огр}}^{\Gamma} = 0,024 \cdot \Gamma \cdot \text{СОП} \cdot \sum_i \frac{A_i}{R_i} \cdot n, \quad (1)$$

где $Q_{\text{огр}}^{\Gamma}$ – трансмиссионные потери тепловой энергии на отопление (за отопительный период), кВт·ч/год; 0,024 – переводной коэффициент теплотерь энергии через наружные ограждающие конструкции из Вт·сут в кВт·ч; A_i – площадь i -го типа наружной ограждающей конструкции, принимаемая для рассматриваемого здания согласно спецификации элементов, м²; R_i – приведенное сопротивление теплопередаче i -го типа наружной ограждающей конструкции, принятого равным требуемому (R_{req}), м²·°C/Вт; n – коэффициент, учитывающий зависимость положения наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху и уменьшающий разность температур для отдельного ограждения, которое не соприкасается с наружным воздухом; для наружных стен принимается равным 1.

С помощью инструмента «Расчетное значение» определим трансмиссионные потери для каждого вида теплоизоляционных материалов (рис.10).

Аналогичным образом зададим формулу для подсчета стоимости трансмиссионных теплотерь за первый год эксплуатации.



Рис. 9. Методика выбора энергоэффективных теплоизоляционных материалов с помощью среды визуального программирования Dynamo

Fig. 9. Methodology for selecting energy-efficient thermal insulation materials using the Dynamo visual programming environment

Формула складывается из произведения трансмиссионных потерь, переведенных в Гкал/год, и среднегодового значения стоимости тепловой энергии за коммунальные услуги по отоплению (рис.11).

Расчет общей величины затрат на теплоизоляционный материал (на утепление площади всех ограждающих стеновых конструкций) с помощью BIM-технологий осуществляется также инструментом спецификации в Revit. Ито-

говая сумма складывается из произведения общего объема необходимого теплоизоляционного материала на его удельную стоимость.

Определение затрат с помощью Revit выполняется с помощью создания нового табличного параметра «Затраты». Формула для подсчета показана на рис. 12.

Далее в Revit с помощью создания нового табличного параметра «Затраты за 1 год на энергию + стоимость утеплителя» осуществляется определение суммарных затрат. Формула представлена на рис. 13.

Формула для определения суммарных затрат за 10 лет эксплуатации представлена на рис. 14. Аналогично данным

формулам вводятся значения для сроков эксплуатации в 30 и 50 лет.

Рис. 10. Формула расчета трансмиссионных потерь в Revit

Fig. 10. Formula for calculating transmission losses in Revit

Рис. 11. Формула расчета стоимости трансмиссионных теплопотерь

Fig. 11. Formula for calculating the cost of transmission heat loss

В итоге нахождения энергоэффективного теплоизоляционного материала получаем сводную таблицу, в которой отражены все утеплители, удовлетво-

ряющие требованиям по тепловой защите зданий, для которых посчитаны трансмиссионные потери, а также затраты на покупку.

Расчетное значение

Имя: Затраты

☒ Формула: ☐ Процент

Категория: Общие

Тип данных: число

Формула: Материал: Стоимость*Материал: Объем

OK Отмена Справка

Рис. 12. Формула для подсчета затрат утеплителя в Revit

Fig. 12. Formula for calculating insulation costs in Revit

Расчетное значение

Имя: Затраты за 1 год на энергию + стоимость утеплителя

☒ Формула: ☐ Процент

Категория: Общие

Тип данных: число

Формула: Стоимость тепловой энергии трансмиссионных потерь + Затраты

OK Отмена Справка

Рис. 13. Формула для подсчета суммарных затрат за 1 год эксплуатации

Fig. 13. Formula for calculating the total costs for 1 year of operation

Расчетное значение

Имя: Затраты за 10 лет на энергию + стоимость утеплителя

☒ Формула: ☐ Процент

Категория: Общие

Тип данных: число

Формула: Стоимость тепловой энергии трансмиссионных потерь*10 + Затраты

OK Отмена Справка

Рис. 14. Формула для подсчета суммарных затрат за 10 лет эксплуатации

Fig. 14. Formula for calculating total costs over 10 years of operation

Но для непосредственного нахождения сроков окупаемости придется произвести расчет с помощью сторонних средств. Непосредственное нахождение сроков окупаемости предложенных мероприятий по утеплению ограждающих стеновых конструкций гораздо

легче выполнить вручную (используя, например, таблицы Excel), чем создавать длинный код в Dynamo.

Общая стоимость затрат на выбранный энергоэффективный теплоизоляционный материал для здания представлена на рис.15.

Затраты на теплоизоляционные материалы								
Наименование стены	ГСОП	Город	R _{req}	R ₀	Наименование утеплителя	Стоимость утеплителя за м3	Объем	Затраты
ИЗОВЕР ТЕПЛЫЕ СТЕНЫ СТРОНГ 80	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,655257	ИЗОВЕР ТЕПЛЫЕ СТЕНЫ СТРОНГ	2262.30	2.03 м³	4024.8
ИЗОВЕР ТЕПЛЫЕ СТЕНЫ СТРОНГ 80	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,655257	ИЗОВЕР ТЕПЛЫЕ СТЕНЫ СТРОНГ	2262.30	3.36 м³	6683.04
ИЗОВЕР ТЕПЛЫЕ СТЕНЫ СТРОНГ 80	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,655257	ИЗОВЕР ТЕПЛЫЕ СТЕНЫ СТРОНГ	2262.30	1.94 м³	3875.04
ИЗОВЕР ТЕПЛЫЕ СТЕНЫ СТРОНГ 80	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,655257	ИЗОВЕР ТЕПЛЫЕ СТЕНЫ СТРОНГ	2262.30	1.05 м³	2096.64
ИЗОВЕР ТЕПЛЫЕ СТЕНЫ СТРОНГ 80	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,655257	ИЗОВЕР ТЕПЛЫЕ СТЕНЫ СТРОНГ	2262.30	3.18 м³	6327.36
ИЗОВЕР ТЕПЛЫЕ СТЕНЫ СТРОНГ 80	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,655257	ИЗОВЕР ТЕПЛЫЕ СТЕНЫ СТРОНГ	2262.30	1.05 м³	2096.64
ИЗОВЕР ТЕПЛЫЕ СТЕНЫ СТРОНГ 80	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,655257	ИЗОВЕР ТЕПЛЫЕ СТЕНЫ СТРОНГ	2262.30	3.45 м³	6851.52
ИЗОВЕР ТЕПЛЫЕ СТЕНЫ СТРОНГ 80	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,655257	ИЗОВЕР ТЕПЛЫЕ СТЕНЫ СТРОНГ	2262.30	3.27 м³	6514.56
								45630,59

Рис. 15. Общая величина затрат на энергоэффективный теплоизоляционный материал

Fig. 15. Total costs for energy-efficient thermal insulation material

Дополнительно был произведен ручной расчет представленных выше параметров. Получено, что расчеты, выполненные с помощью Revit, полностью идентичны ручному расчету величины затрат на утепление всего здания, но главным преимуществом является то, что использование Revit и Dynamo для аналогичных расчетов позволит в дальнейшем существенно сократить время на выполнение работы.

Выводы

Использование BIM способно решить вопросы качественного и быстрого подбора теплоизоляционных матери-

алов, при этом даже не выходя из программного комплекса, что позволит в значительной степени сэкономить время, а также позволит минимизировать ошибки проектирования.

Анализ современных BIM-комплексов показал, что самым востребованным на сегодняшний день является Revit, а его функционал при использовании визуального программирования Dynamo практически безграничен.

По результатам исследования была разработана методика подбора теплоизоляционных материалов с помощью BIM-технологий. Но полная автоматизация подбора энергоэффективного теп-

теплоизоляционного материала с помощью Revit является достаточно трудоёмкой задачей, поэтому часть задач, например расчет срока окупаемости, быстрее будет сделать вручную или с помощью Excel.

С помощью среды визуального программирования Dynamo было создано два скрипта, используя которые можно подобрать энергоэффективные теплоизоляционные материалы. Результатом

работы первого скрипта в Revit осуществляется полная автоматизация теплотехнического расчета, Итогом работы второго скрипта служит автоматизированный подбор теплоизоляционного материала, исходя из их теплофизических и стоимостных характеристик. Достоверность расчетов, полученных на основе разработанных скриптов, подтверждена результатами ручного расчета.

Список литературы

1. Смакаев Р.М., Низина Т.А. Применение среды визуального программирования Dynamo при разработке проекта здания в Autodesk Revit // Основы экономики, управления и права. 2020. № 2(21). С. 48-55. DOI 10.51608/23058641_2020_2_48. EDN VTDDXI.
2. Mohamed M. N. A., Karmanova M.M. Creating Documents in Autodesk Revit Automatically with Dynamo // Components of Scientific and Technological Progress. 2022. № 7(73). P. 32-37. EDN ZPWOB1.
3. Автоматизация формирования спецификаций с помощью скрипта, разработанного в среде Dynamo / М. Н. А. Мохамед, С. В. Придвижкин, М. М. Карманова, Е. А. Печеркина // Перспективы науки. 2022. № 5(152). С. 82-87. EDN PVATVS.
4. Автоматизация процесса подготовки рабочей документации раздела «Конструкции железобетонные» при помощи средств визуального программирования в ПО Autodesk Revit / К.О. Шлыков, Н. И. Фомин, И. К. Каландадзе, Д. В. Никагосов // Перспективы науки. 2023. № 5(164). С. 172-175. EDN EYHAPU.
5. Агафонов Я.Е., Черкасова М.Д. Использование Dynamo для автоматизации проектирования арматуры // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. СПб.: СПбПУ, 2019. Ч. 2. С. 234-236. EDN YXSXKW.
6. Степанова А., Шилова Л. А. Применение модуля Dynamo в среде Revit для автоматизации процесса армирования элементов железобетонных конструкций // Наука и бизнес: пути развития. 2020. № 5(107). С. 76-83. EDN CUAZDR.
7. Колосова Н. Б., Сергеев В. В. Исследование трансформации аналитических данных из системы визуального программирования Dynamo в электронные таблицы Microsoft Excel // Известия Байкальского государственного университета. 2021. Т. 31. № 2. С. 156-166. DOI 10.17150/2500-2759.2021.31(2).156-166. - EDN IPGALN.
8. Чикмарев Е. С., Придвижкин С. В., Зверева О. М. Реализация комплексного подхода к проектированию инженерных систем с применением BIM-технологий: ав-

томатизация средствами Dynamo // Наука и бизнес: пути развития. 2023. № 5(143). С. 70-74. EDN QCYKSP.

9. Стариченко Д. К., Бахтина И. А. Создание скрипта для семейства трубопроводов в REVIT, при помощи визуального программирования Dynamo // Ползуновский альманах. 2023. № 1. С. 162-164. EDN EXLPEU.

10. Лемеза В. А., Придвижкин С. В. Разработка автоматизированной системы контроля качества на базе BIM моделей с помощью Dynamo // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 96-10. С. 68-72. DOI 10.18411/trnio-04-2023-527. EDN LQILYA.

11. Divin N. V. BIM by using Revit API and Dynamo. A review // AlfaBuild. 2020. № 2(14). P. 1404. DOI 10.34910/ALF.14.4. EDN CGPPSX.

12. Kokaya D., Zaborova D., Koriakovtseva T. Environmental analysis of residential exterior wall construction in temperate climate // Magazine of Civil Engineering. 2023. № 8(124). P. 114-122. DOI 10.34910/MCE.124.10. EDN HNNOQM.

13. Зубарев К.П., Рынкoвская М.И. Расчет толщины утеплителя стен зданий при нестационарном влажностном режиме ограждающей конструкции // Перспективы науки. 2023. № 1 (160). С. 99-101.

14. Zaborova D., Musorina T. Environmental and Energy-Efficiency Considerations for Selecting Building Envelopes // Sustainability. 2022. Vol. 14, № 10. P. 5914. DOI 10.3390/su14105914. EDN IXJBWJ.

15. Зубарев К.П., Бородулина А.И., Галлямова А.Р. Теоретические и экспериментальные методы определения сопротивления теплопередаче. Обзор литературы // Строительные материалы. 2021. № 6. С. 9-14. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-792-6-9-14

16. Zubarev K.P. Derivation of the equation of unsteady-state moisture behaviour in the enclosing structures of buildings using a discrete-continuous approach // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Vol. 17. № 4. P. 83-90. DOI:10.22337/2587-9618-2021-17-4-83-90

17. Zubarev K.P. Using discrete-continuous approach for the solution of unsteady-state moisture transfer equation for multilayer building walls // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Vol. 17, № 2. P. 50-57. DOI:10.22337/2587-9618-2021-17-2-50-57

18. Gamayunova O., Musorina T., Ishkov A. D. Humidity Distributions in Multilayered Walls of High-rise Buildings // E3S Web of Conferences. Samara, 04–08 September 2017. Samara: EDP Sciences. 2018. Vol. 33. P. 02045. DOI 10.1051/e3sconf/20183302045. EDN YUMGLC.

19. Бабурина Е. С., Коряковцева Т. А. Использование угольной добавки для создания теплоизоляционного бетона // Инженерные исследования. 2023. № 3(13). С. 3-11. EDN DYFSAT.

20. Теплотехнические свойства энергоэффективного материала на основе растительной добавки (сухой борщевик) / Т.А. Мусорина, Е.А. Наумова, Е.В. Шонина,

М.Р. Петриченко, М.И. Куколев // Вестник МГСУ. 2019. Т.14, №12. С. 1555-1571. DOI 10.22227/1997-0935.2019.12.1555-1571. EDN JWTJIZ.

21. Зубарев К.П., Рынковская М.И. Экспериментальное построение шкалы потенциала влажности для силикатного кирпича // Перспективы науки. 2022. № 9 (156). С. 55-57.

22. Ярашов П., Городишенина А. Ю. Алгоритм создания скрипта для автоматизированного теплотехнического расчета в Dynamo // Неделя науки ИСИ: материалы всероссийской конференции: в 3 ч., Санкт-Петербург, 26–30 апреля 2021 года. СПб.: СПбПУ, 2021. Ч. 2. С. 75-78. EDN WCAQEG.

23. Чакин Е. Ю., Гамаюнова О. С. Использование BIM-технологий для выбора энергоэффективных теплоизоляционных материалов // Инженерные исследования. 2022. № 2(7). С. 11-21. EDN GCLKXY.

24. Чакин Е. Ю. Энергоэффективные теплоизоляционные материалы для ограждающих стеновых конструкций // Инженерные исследования. 2022. № 1(6). С. 9-18. EDN GYDSPL.

References

1. Smakaev R.M., Lowland T.A. Application of the Dynamo visual programming environment when developing a building project in Autodesk Revit. *Osnovy ekonomiki, upravleniya i pravo = Fundamentals of economics, management and law*. 2020; (2): 48-55 (In Russ.). DOI 10.51608/23058641_2020_2_48. EDN VTDDXI.

2. Mohamed M. N. A., Karmanova M. M. Creating Documents in Autodesk Revit Automatically with Dynamo. *Components of Scientific and Technological Progress*. 2022, (7): 32-37. EDN ZPWOB.

3. Mohamed M. N. A., Pridvishkin S. V., Karmanova M. M., Pecherkina E. A. Automation of the formation of specifications using a script developed in the Dynamo environment. *Perspektivy nauki = Perspectives Sciences*. 2022; (5): 82-87 (In Russ.). EDN PVATVS.

4. Shlykov K.O., Fomin N. I., Kalandadze I. K., Nikagosov D. V. Automation of the process of preparing working documentation for the section “Reinforced concrete structures” using visual programming tools in Autodesk Revit software. *Perspektivy nauki = Perspectives of science*. 2023; (5): 172-175 (In Russ.). EDN EYHAPU.

5. Agafonov Ya.E., Cherkasova M.D. Using Dynamo to automate the design of reinforcement. In: *Nedelya nauki SPbPU: materialy nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem = SPbPU Science Week: materials of a scientific conference with international participation*. St. Petersburg: SPbPU; 2019. Part 2. P. 234-236 (In Russ.). EDN YXSXKW.

6. Stepanova A., Shilova L. A. Application of the Dynamo module in the Revit environment to automate the process of reinforcing elements of reinforced concrete structures. *Nauka i biznes: puti razvitiya = Science and business: ways of development*. 2020; (5): 76-83 (In Russ.). EDN CUAZDR.

7. Kolosova N. B., Sergeev V. V. Study of the transformation of analytical data from the Dynamo visual programming system into Microsoft Excel spreadsheets. *Izvestiya Baikal'skogo gosudarstvennogo universiteta = News of the Baikal State University*. 2021; 31 (2): 156-166. (In Russ.). DOI 10.17150/2500-2759.2021.31(2).156-166. EDN IPGALN.
8. Chikmarev E. S., Pridvizhkin S. V., Zvereva O. M. Implementation of an integrated approach to the design of engineering systems using BIM technologies: automation using Dynamo. *Nauka i biznes: puti razvitiya = Science and business: ways of development*. 2023; (5): 70-74 (In Russ.). EDN QCYKSP.
9. Starichenko D. K., Bakhtina I. A., Starichenko D. K. Creating a script for a family of pipelines in REVIT, using visual programming Dynamo. *Polzunovskii al'manakh = Polzunovsky almanac*. 2023; (1): 162-164 (In Russ.). EDN EXLPEU.
10. Lemeza V. A., Pridvizhkin S. V. Development of an automated quality control system based on BIM models using Dynamo. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya = Trends in the development of science and education*. 2023; (96-10): 68-72. DOI 10.18411/trnio-04-2023-527 (In Russ.). EDN LQILYA.
11. Divin N. V. BIM by using Revit API and Dynamo. A review. *AlfaBuild*. 2020; (2): 1404. DOI 10.34910/ALF.14.4. EDN CGPPSX.
12. Kokaya D., Zaborova D., Koriakovtseva T. Environmental analysis of residential exterior wall construction in temperate climate. *Magazine of Civil Engineering*. 2023; (8): 114-122. DOI 10.34910/MCE.124.10. EDN HNNOQM.
13. Zubarev K.P., Rynkovskaya M.I. Calculation of the thickness of insulation of building walls under non-stationary humidity conditions of the enclosing structure. *Perspektivy nauki = Perspectives of science*. 2023; (1): 99-101 (In Russ.).
14. Zaborova D., Musorina T. Environmental and Energy-Efficiency Considerations for Selecting Building Envelopes. *Sustainability*. 2022; 14 (10): 5914. DOI 10.3390/su14105914. EDN IXJBWJ.
15. Zubarev K.P., Borodulina A.I., Galliamova A.R. Theoretical and experimental methods for determining heat transfer resistance. Literature review. *Stroitel'nye materialy = Construction materials*. 2021; (6): 9-14 (In Russ.). DOI: 10.31659/0585-430X-2021-792-6-9-14
16. Zubarev K.P. Derivation of the equation of unsteady-state moisture behavior in the enclosing structures of buildings using a discrete-continuous approach. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021; 17(4): 83-90. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-4-83-90
17. Zubarev K.P. Using discrete-continuous approach for the solution of unsteady-state moisture transfer equation for multilayer building walls. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021; 17 (2): 50-57. DOI:10.22337/2587-9618-2021-17-2-50-57

18. Gamayunova O., Musorina T., Ishkov A. D. Humidity Distributions in Multilayered Walls of High-rise Buildings. *E3S Web of Conferences*. Samara: EDP Sciences; 2018. Vol. 33. P. 02045. DOI 10.1051/e3sconf/20183302045. EDN YUMGLC.
19. Baburina E. S., Koryakovtseva T. A. Using coal additives to create thermal insulating concrete. *Inzhenernye issledovaniya = Engineering Research*. 2023; (3): 3-11 (In Russ.). EDN DYFSAT.
20. Musorina T.A., Naumova E.A., Shonina E.V., Petrichenko M.R., Kukolev M.I. Thermal properties of energy-efficient material based on plant additives (dry hogweed). *Vestnik MGSU = Bulletin of MGSU*. 2019; 14 (12): 1555-1571 (In Russ.). DOI 10.22227/1997-0935.2019.12.1555-1571. EDN JWTJIZ.
21. Zubarev K.P., Rynkovskaya M.I. Experimental construction of a moisture potential scale for sand-lime brick. *Perspektivy nauki = Perspectives of science*. 2022; (9): 55-57 (In Russ.).
22. P. Yarashov, A. Yu. Gorodishenina Algorithm for creating a script for automated thermal calculations in Dynamo. In: *Nedelya nauki ISI: Materialy vserossiiskoi konferentsii = ISI Science Week: Proceedings of the All-Russian conference*. St. Petersburg: SPbPU; 2021. Part 2. P. 75-78 (In Russ.). EDN WCAQEG.
23. Chakin E. Yu., Gamayunova O. S. Use of BIM technologies for the selection of energy-efficient thermal insulation materials. *Inzhenernye issledovaniya = Engineering Research*. 2022; (2): 11-21 (In Russ.). EDN GCLKXY.
24. Chakin E. Yu. Energy-efficient heat-insulating materials for enclosing wall structures. *Inzhenernye issledovaniya = Engineering Research*. 2022; (1): pp. 9-18 (In Russ.). EDN GYDSPL.

Информация об авторах / Information about the Authors

Чакин Егор Юрьевич, магистрант,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,
e-mail: chakin34@gmail.com

Egor Y. Chakin, Master's Student,
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic
University, Saint Petersburg, Russian Federation,
e-mail: chakin34@gmail.com

Гамаюнова Ольга Сергеевна, кандидат
технических наук, доцент Высшей школы
промышленно-гражданского и дорожного
строительства, Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,
e-mail: gamayunova_os@spbstu.ru

Olga S. Gamayunova, Cand. of Sci. (Engineering),
Associate Professor, Higher School of Industrial,
Civil and Road Construction, Peter the Great
St.Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russian Federation,
e-mail: gamayunova_os@spbstu.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 699.81

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-69-81>

Защитное покрытие строительных конструкций от криогенного воздействия на основе цементных плит

М. В. Гравит ¹ ✉, Е. С. Недвига ¹

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

✉ e-mail: marina.gravit@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Применение сжиженного природного газа (СПГ) в качестве энергоносителя расширяется ежегодно. Поэтому целью данной статьи является анализ нормативных требований к защите конструкций от пролива криогенных жидкостей, таких как СПГ. Также в статье оценивается способность огнезащитных материалов сопротивляться не только высокотемпературным воздействиям, но и низкотемпературным.

Методы. В статье рассмотрены основные методики испытания материалов на противодействие проливу криогенных жидкостей и возможность применения средств огнезащиты в качестве криозащитных материалов. Объектом исследования стала огнезащитная конструктивная система, состоящая из плит «ПРОЗАСК Файерпанель». Защитная система производства ООО «ПРОЗАСК» состоит из двух слоев огнезащитных плит «ПРОЗАСК Файерпанель» с негорючей мембраной. А предметом исследования – криозащитная функция такой системы.

Результаты. Средняя температура образца после 60-минутного криогенного воздействия составила 53°C, сделаны выводы о целесообразности проведения последовательных испытаний на низкотемпературное и огневое воздействия ввиду высокой вероятности развития пожара после пролива криогенной жидкости при наличии источника пламени.

Заключение. В статье показаны и проанализированы результаты испытания защитной системы производства ООО «ПРОЗАСК». При корректном выборе марки стали (в том числе по требованию к ударной вязкости) несущих конструкций объектов нефтегазового комплекса, можно сделать вывод о работоспособности конструкций, защищенных системой конструктивной огнезащиты с плитами «ПРОЗАСК Файерпанель», после часового криогенного воздействия.

Ключевые слова: сжиженный природный газ; криозащитные материалы; защита строительных конструкций; конструктивная огнезащита.

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

Для цитирования: Гравит М. В., Недвига Е. С. Защитное покрытие строительных конструкций от криогенного воздействия на основе цементных плит // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №3. С. 69-81. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-69-81>.

Поступила в редакцию 21.05.2024

Подписана в печать 18.07.2024

Опубликована 30.09.2024

© Гравит М. В., Недвига Е. С., 2024

Protective coating of steel structures from cryogenic effects based on cement slabs

Marina V. Gravit ¹ ✉, Ekaterina S. Nedviga ¹

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

✉ e-mail: marina.gravit@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The use of liquefied natural gas (LNG) as an energy carrier is expanding annually. Therefore, the purpose of this article is to analyze the regulatory requirements for the structure protection from the cryogenic liquid spill such as LNG. The article also evaluates the ability of fireprotective materials to resist not only high-temperature influences, but also low-temperature ones.

Methods. The article discusses the main methods of material testings to counteract the cryogenic liquid spill and the possibility of using fireprotective products as cryoprotective materials. The results of testing the protective system manufactured by LLC "PROSASK" are shown and analyzed. The object of the study is a fire-retardant structural system consisting of "PROSASK Fire Panel" plates. The protective system consists of two layers of flame-retardant plates "PROSASK Fire Panel" with a non-flammable membrane " in the middle, manufactured by LLC "PROSASK". And the subject of the research is the cryoprotective function of this system.

Results. The average temperature of the sample after 60 minutes cryogenic exposure was - 53 °C, conclusions were drawn about the expediency of conducting successive tests for low-temperature and fire exposure due to the high probability of fire after the cryogenic liquid spill in the presence of a flame source.

Conclusion. The article shows and analyzes the test results of the protective system manufactured by LLC "PROSASK". With the correct choice of steel grade (including the requirement for impact strength) of load-bearing structures of oil and gas facilities, it can be concluded that structures protected by a structural fire protection system with PROSASK Firepanel plates are operable after an hour of cryogenic exposure.

Keywords: liquefied natural gas; cryoprotective materials; protection of building structures; structural fire protection.

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

For citation: Gravit M. V., Nedviga E. S. Protective coating of steel structures from cryogenic effects based on cement slabs. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(3): 69-81 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-69-81>.

Received 21.05.2024

Accepted 18.07.2024

Published 30.09.2024

Введение

Сжиженный природный газ (СПГ) – криогенная многокомпонентная смесь легких углеводородов, в основном, со-

стоящая из метана. СПГ используют в качестве энергоносителя, топлива автотранспорта и морских судов [1-4].

СПГ является одной из перспективных отраслей энергетики будущего, значительно опережая водород и возобновляемые источники энергии. СПГ является наиболее доступным для массового производства и внедрения в рыночный оборот.

Так объемы потребления и экспорта СПГ из России увеличиваются каждый год, за 2022 год импорт СПГ в страны ЕС увеличился в 1,5 раза, а в Китай – в 2 раза. Также это отраслевое развитие инициируется правительством России, выделяются гранты в качестве компенсации затрат на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию СПГ-оборудования.

Согласно прогнозам Shell's LNG Outlook 2024 ожидается, что в долгосрочной перспективе к 2040 году мировой спрос на СПГ вырастет более чем на 50%, поскольку промышленный переход с угля на газ набирает обороты в Китае, а страны Южной и Юго-Восточной Азии используют больше СПГ для поддержки своего экономического роста.

Основная роль при работе с СПГ должна быть уделена созданию и поддержанию особых специфических условий для хранения и транспорта сжиженного газа, поскольку они имеют свои особенности: СПГ занимает объем в 600 раз меньше, чем природный газ, и имеет температуру -162°C [5-6].

Магистральные трубопроводы, по которым транспортируется СПГ, пролегают не только на охраняемых промышленных площадках, а прокладыва-

ются еще и вдоль магистралей, по территориям городов и на других неохранных участках. Следовательно, существует постоянная вероятность вмешательства третьих лиц или влияния иных факторов на целостность трубопроводов. Также повреждение трубопроводов влечет за собой значительный риск для людей, находящихся неподалеку. Зона опасности, связанная с повреждением, будет зависеть от характера повреждения трубопровода, времени до возгорания, состояния окружающей среды в месте повреждения и метеорологических условий [7-10]. По некоторым оценкам опасное расстояние, связанное с трубопроводом, колеблется от менее 20 м для меньшего трубопровода при более низком давлении до более 300 м для более крупного трубопровода при более высоком давлении [11-15]. Поэтому необходимы дополнительные усилия по повышению безопасности объектов СПГ.

Одним из вариантов повреждения газопровода является нарушение герметичности (в виду дефекта продольного шва в трубе, вмешательства извне и др.), вследствие чего происходит утечка СПГ.

Криогенная жидкость, попавшая на металлические конструкции, имеющие температуру, равную атмосферной, начинает кипеть и интенсивно снижает их температуру. Например, температура кипения жидкого этана составляет минус 89°C , СПГ - минус 160°C , жидкого азота - минус $195,8^{\circ}\text{C}$. Сильное охлаждение углеродистой или низколегированной стали, попавшей в зону пролива

криогенных жидкостей, приводит к охрупчиванию и разрушению металлических опорных и ограждающих строительных конструкций¹ [16-17].

Согласно ГОСТ 52630-2012 «Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия», ГОСТ 27772-2015 «Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия» специальные хладостойкие марки конструкционной стали типа 09Г2С, используемые для изготовления опорных и ограждающих стальных конструкций, имеют порог хладостойкости минус 70°C, а наиболее применяемые марки строительных углеродистых сталей имеют порог хладостойкости не более -40°C [18].

Поэтому в международной и российской нормативной документации отмечена необходимость контроля разлива и утечек криогенных жидкостей, а также мероприятий по снижению количества аварийных ситуаций. Требуется предусмотреть зону удержания утечек, ограждение или обвалование резервуаров СПГ для предотвращения растекания горючих жидкостей, ограничение минимального расстояния от объектов СПГ до источников воспламенения и предусмотреть защиту конструкций от криогенного и огневого воздействия.

¹ Патент № 2683449 С1 Российская Федерация, МПК E04B 1/94. Способ защиты металлических конструкций от негативного воздействия внешней среды (варианты) / Н. Д. Войтех, В. В. Ряхин, А. А. Степкин; заявитель Акционерное общество "НИПИгазпереработка" (АО "НИПИГАЗ"). № 2018112867; заявл. 09.04.2018; опубл. 28.03.2019. EDN ZDUIBV.

Согласно ГОСТ Р 56352-2015 «Нефтяная и газовая промышленность. Производство, хранение и перекачка сжиженного природного газа. Общие требования безопасности» конструкции и материалы ограждений, ограничивающих зону растекания жидкостей, должны быть рассчитаны в том числе и на криогенное воздействие.

Зарубежные стандарты EN 1473 и NFPA 59A и отраслевые стандарты крупнейших компаний нефтегазового комплекса (НГК) предписывают, чтобы стальные конструкции оборудования, технологических установок и эстакад с обращением и хранением СПГ должны быть стойкими к криогенному воздействию, то есть к воздействию газов, сжатых до жидкого состояния, находящихся при криогенных температурах (ниже -150 °C) [19-21].

Несмотря на то, что потребность в сертифицированных испытаниях криозащитных покрытий назрела уже давно, только в 2016 году опубликована первая часть документа ISO 20088, регламентирующего проведение испытаний различных материалов на низкотемпературное воздействие. Благодаря этому стал возможен сравнительный анализ эффективности защитных материалов, так как до этого производители проводили индивидуальные испытания продукции на основании собственных неаттестованных методик.

Серия стандартов ISO 20088 содержит три части в зависимости от вида криогенного воздействия и проверяет влияние:

– внезапного криогенного пролива (жидкая фаза);

– паровой фазы, действующей на конструкции;

– выпуска криогенной струи.

Стоит отметить, что ведутся работы над четвертой частью стандарта, которая охватывает выбросы воспламеняющихся криогенных струй.

Российский стандарт ГОСТ Р 71127-2023 «Нефтяная и газовая промышленность. Средства защиты строительных конструкций от воздействия криогенных сред. Общие требования. Методы испытаний» по испытаниям криогенной защиты введен в действие 01.04.2024 и гармонизирован с международным ISO 20088-1.

Криогенный пролив СПГ при наличии источника пламени приводит к возгоранию с повышенным давлением и тепловой нагрузкой, поэтому любая конструкция, к которой предъявляются требования по хладостойкости, должна быть защищена на огневое воздействие.

Для определения материалов, способных выполнять двойную защитную функцию, выполняют и комбинированные тесты. К примеру, сначала выполняются криогенные испытания в соответствии с ISO 20088, за которыми следуют стандартные испытания на огнестойкость, такие как испытание на режим струйного горения по ISO 22899 или испытание на ударную нагрузку под давлением [14-15]. К сожалению, специальные стандарты, охватывающие комбинированные тесты, на данный момент отсутствуют. Требования к продолжительности и подверженности определенному

режиму воздействия определяются инженерами и разработчиками средств огнезащиты индивидуально, в зависимости от проектных решений объекта.

Материалы и методы

Большая часть решений для защиты от криогенных проливов возникла на основе материалов, применяемых в качестве пассивной огнезащиты. К таким средствам относятся специальные огнезащитные штукатурки, кожухи, плиты и интумесцентные краски [18].

Часть материалов, используемых в качестве пассивной конструктивной огнезащиты, обладают хорошими теплоизоляционными свойствами как при высоких, так и при низких температурах и способны эффективно защищать как от разливов криогенных веществ, так и от пожаров. Для этого материалы должны сохранять свою целостность и температурно-изоляционные свойства в диапазоне от -200°C до 1300°C .

В данной статье рассматривается вариант пассивной огнезащиты в виде смонтированной на конструкцию облицовки из плит «ПРОЗАСК Файерпанель» на основе цементного связующего с легким минеральным наполнителем. Указанные плиты состоят из портландцемента и легкого минерального заполнителя, заармированы с двух сторон стеклосеткой и с лицевой стороны для повышения защитных свойств покрыты пропиточным лакокрасочным материалом.

Применение крио-огнезащиты на основе цементных плит заводского из-

готовления позволяет производить монтаж как в летнее, так и в зимнее время, а также снижает риски, связанные с производством работ на строительной площадке.

Для огнезащитных плит «ПРОЗАСК Файерпанель» на цементном связующем проведен эксперимент по исследованию сопротивляемости криогенному воздействию.

Плиты являются негорючими с типоразмерами 1200 x 900 x 12,5 мм. Образец представляет из себя конструкцию из огнезащитных плит, смонтированных в два слоя с общей толщиной 25 мм на несущий металлический каркас, размещенный на металлической конструкции марки Fe 430, с размерами основания 1500 x 1500 x 10 мм и размерами бортов

1500 x 500 x 10 мм (рис. 1). Между слоями плит установлена негорючая воздухопроницаемая мембрана «ИЗО-ТЕКС 200 НГ W».

Испытание проводилось в НИЦ «ПБ» ИКБС НИУ МГСУ по собственной методике, разработанной на основании стандарта ISO 20088-1 «Determination of the resistance to cryogenic spillage of insulation materials – Part 1: Liquid phase».

Сущность метода заключается в определении достижения предельных значений (температуры - 49°C по средним значениям показаний датчиков температуры или времени воздействия равного 60 минутам) при воздействии на образец пролива 250 литров жидкого азота. Схема испытательного стенда выполнена в соответствии с ISO 20088-1.

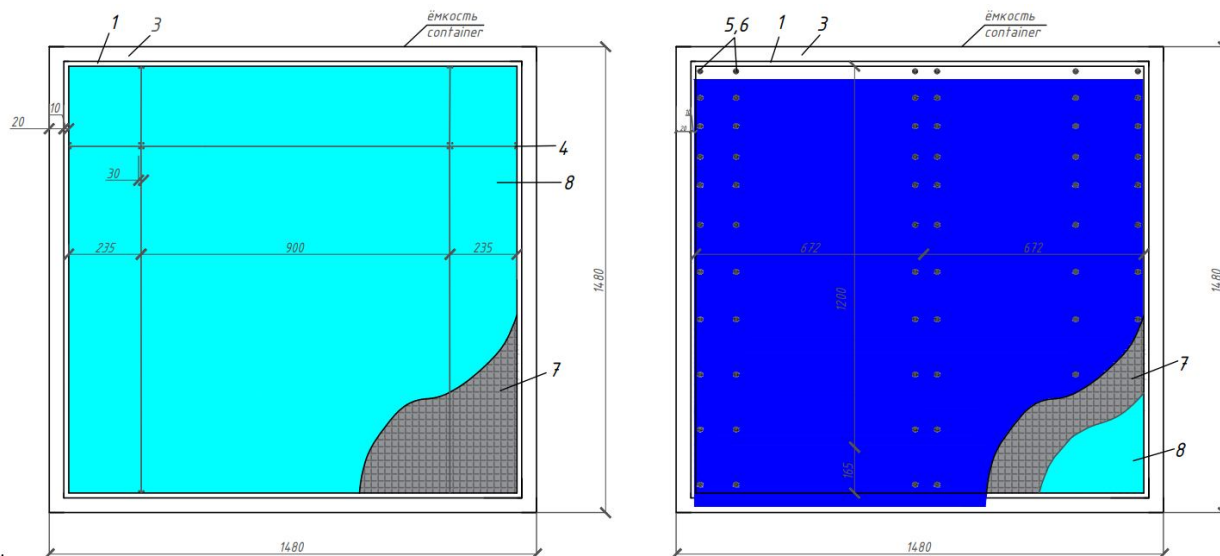


Рис. 1. Схема установки огнезащитной системы на основе огнезащитных плит «ПРОЗАСК Файерпанель». Схема раскладки плит первый слой (слева), второй слой (справа)

Fig. 1. Installation diagram of a fire-retardant system based on fire-retardant plates "PROSASK Fire panel". The layout of the plates is the first layer (left), the second layer (right)

Перед испытанием производилась установка термоэлектрических преоб-

разователей (ТЭП) для контроля уровня жидкости в образце, а также кабельных

термоэлектрических преобразователей типа КТХА для измерения температуры. Схема размещения термоэлектрических преобразователей на образце соответствует с ISO 20088-1.

Начало испытания совпадало с моментом излития 250 литров криогенной

жидкости в образец из резервуара подачи. В процессе испытания поддерживался уровень жидкого азота не ниже 5 см от основания образца. Образец до и после испытания представлен на рис. 2. Испытание проводилось в течение 60 минут [22-23].



Рис. 2. Общий вид образца плит до и после криогенного воздействия

Fig. 2. General view of the plate sample before and after cryogenic exposure

Результаты и их обсуждение

По окончании испытания производился слив жидкого азота из образца в течение периода времени, составляющего не более 15 минут, затем в течение 15 минут проводилась инспекция об-

разца. Значительных повреждений на защитном покрытии образца не зафиксировано. Наблюдался иней на всей поверхности плит. Показания 12 датчиков ТЭП температуры усреднены и представлены на рис. 3.

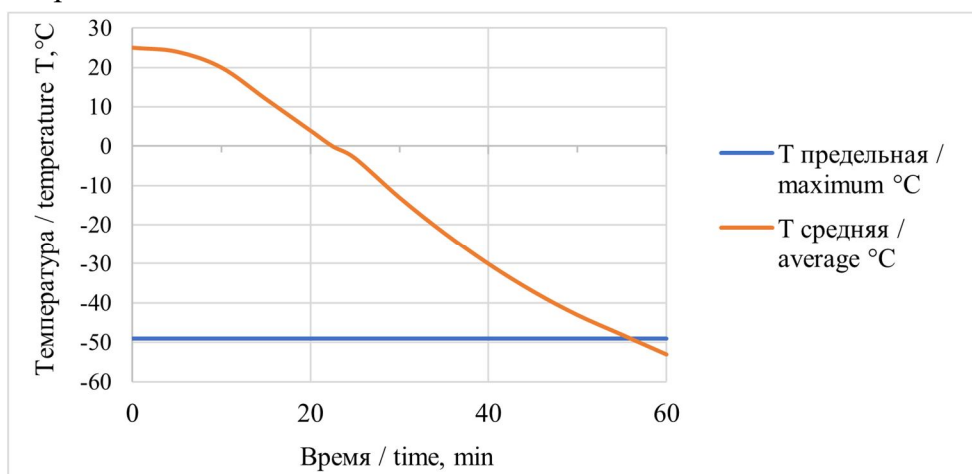


Рис. 3. График зависимости средней температуры по показаниям датчиков от времени

Fig. 3. Graph of the dependence of the average temperature according to sensor readings on time

Таким образом, рейтинг огнезащитной системы на основе огнезащитных плит «ПРОЗАКС Файерпанель» согласно методике, гармонизированной с ISO 20088-1, составляет «CL/металло-конструкция/минус49/53», где CL означает Liquid exposure (воздействие криогенной жидкостью) с достижением минус 49°C на металлоконструкции и спустя 53 минуты от начала криогенного воздействия (при этом расположение термомпар не соответствует участкам с наибольшим повреждением образца).

При испытании на криогенное воздействие системы плит «ПРОЗАКС Файерпанель» зафиксировано достижение критической температуры минус 49°C спустя 53 минуты по показаниям более чем трех термоэлектрических преобразователей, соответствующих участкам с наибольшим повреждением образца. Через час после низкотемпературного воздействия, средняя температура образца составила - 53°C, что выше минимальной эксплуатационной температуры стальных

конструкций (-60°C), требования к которым указаны в СП 16.13330.2017. При корректном выборе марки стали (в том числе по требованию к ударной вязкости) несущих конструкций объектов НГК, можно сделать вывод о работоспособности конструкций, защищенных системой конструктивной огнезащиты с плитами «ПРОЗАКС Файерпанель», после часового криогенного воздействия [23].

Выводы

Отсутствие существенных дефектов и сохранение целостности внешнего покрытия после низкотемпературного воздействия указывает на возможность дальнейшей работы системы защиты стальных конструкций с цементными плитами и противопожарным барьером и в условиях возгорания криогенной жидкости. Таким образом, требуется выполнить комбинированные последовательные испытания системы защиты на криогенное и огневое воздействия в соответствии с ISO 20088 и UL1709.

Список литературы

1. Производство СПГ в России должно вырасти в 4 раза к 2035 году. URL: https://www.vedomosti.ru/industry/energy_future/articles/2023/09/11/994392-proizvodstvo-spg-v-rossii-dolzno-virasti (дата обращения: 14.04.2024).
2. Mojarad A.A.S., Atashbari V., Tantau A. Challenges for Sustainable Development Strategies in Oil and Gas Industries // Proceedings of the 12th International Conference on Business Excellence 2018. Bucharest, 2018. P. 626-638. DOI: 10.2478/picbe-2018-0056.
3. Optimization of Cryogenic Spill Protection Insulation Thickness / Yoshinori Hiroya, Masayuki Tanabe, Shunji Kataoka, Yoshinori Yamada, Tomonori Miyashita // An International Research Journal. Chemical Engineering Transactions. 2016. №48. P. 643-648.

4. A combined fluid-dynamic and thermodynamic model to predict the onset of rapid phase transitions in LNG spills / K. Y. Lervåg, et al. // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021. № 69. P. 104354.

5. Березняков А. А., Калаушин Д. Р., Симонов М. Ю. Анализ применения различных теплообменных аппаратов в области сжиженного природного газа // *Сжиженный природный газ: проблемы и перспективы: тезисы докладов II Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 08–09 ноября 2022 года* / отв. ред. Е.Б. Федорова. М.: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, 2023. С. 88-91. EDN RUHDQQ.

6. Simplified Method to Define the Cryogenic Spill Hazard in LNG Liquefaction Facility / Y. Hiroya, M. Tanabe, S. Kataoka, Y. Yamada, T. Miyashita // *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*. 2019. №77. P. 505-510. <https://doi.org/10.3303/CET1977085>

7. Jo Y.-D., Ahn B.J. Analysis of hazard areas associated with high-pressure natural-gas pipelines // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2002. Vol. 15, is. 3. P. 179-188.

8. Mitigation of Risks Associated with Gas Pipeline Failure by Using Quantitative Risk Management Approach: a Descriptive Study on Gas Industry / A. H. Abdoul Nasser, P. D. Ndalila, E. A. Mawugbe, M. Emmanuel Kouame, M. A. Paterne, Y. Li // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. №9(10). P. 1098. <https://doi.org/10.3390/jmse9101098>.

9. Jet fires and cryogenic spills: How to document extreme industrial incidents / R.F. Mikalsen, K. Glansberg, E.D. Wormdahl, R. Stolen // *In Proceedings of the Sixth Magdeburg Fire and Explosion Days conference proceedings. Magdeburg, Germany, 25–26 March. 2019*. P. 1-6.

10. Methodology to analyse LNG spill on steel structure in congested marine offshore facility / T. Baalisampang, et al. // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019. № 62. 103936 p.

11. Young-Do Jo, Bum Jong Ahn. A method of quantitative risk assessment for transmission pipeline carrying natural gas // *Journal of Hazardous Materials*. 2005. Vol. 123, is. 1–3. P. 1-12.

12. Bradley I., Willoughby D., Royle M. A review of the applicability of the jet fire resistance test of passive fire protection materials to a range of release scenarios // *Process Safety and Environmental Protection*. 2019. №122. P. 185-191. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.12.004>.

13. Experimental study on propane jet fire hazards: Assessment of the main geometrical features of horizontal jet flames / Delphine M. Laboureur, Nirupama Gopalaswami, Bin Zhang, Yi Liu, M. Sam Mannan // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016. № 41. P. 355-364. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.02.013>.

14. Evaluation and prediction of the safe distance in liquid hydrogen spill accident / Liu Y., et al. // *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. № 146. P. 1–8.
15. Nguyen L. D., Kim M., Chung K. Vaporization of the non-spreading cryogenic-liquid pool on the concrete ground // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. N 163. P. 120464.
16. Nubli H., et al. Structural impact under accidental LNG release on the LNG bunkering ship: Implementation of advanced cryogenic risk analysis // *Process Safety and Environmental Protection*. 2024. № 186. P. 329–347.
17. Yu X., et al. Flame characteristics of under-expanded, cryogenic hydrogen jet fire // *Combustion and Flame*. 2022. № 244. P. 112294.
18. Cryogenic Spill Protection Requirements. Part 1. Fundamentals. URL: <https://www.pfpnet.com/wp-content/uploads/2023/11/PFPNet-Fundamentals-of-Cryogenic-Spill-Protection-Part-1.pdf> (дата обращения: 14.04.2024).
19. Gravit M., Shabunina D., Klementev B. Fire resistance of steel structures with epoxy fire protection under cryogenic exposure // *Buildings*. 2021. Vol. 11, № 11. <https://doi.org/10.3390/buildings11110537>. EDN XRCOPQ.
20. Клементьев Б. А., Калач А. В., Гравит М. В. Сравнительный анализ требований России и США к огнестойкости строительных конструкций нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов // *Пожаровзрывобезопасность*. 2021. Т. 30, № 5. С. 5–22. <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.05.5-22>. EDN MNGMRT.
21. Гравит М.В., Шабунина Д.Е. Штукатурные составы как огнезащита стальных конструкций объектов нефтегазового комплекса // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предупреждение, ликвидация*. 2022. № 3. С. 46–55. <https://doi.org/10.25257/FE.2022.3.46-55>.
22. Системы огнезащиты стальных конструкций с цементными плитами и противопожарным барьером при криогенном и Jet-Fire воздействиях / С. П. Антонов, М. В. Гравит, Е.С. Недвига, О.А. Фридрих // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. 2024. № 2.
23. Гарашенко А.Н., Антонов С.П., Виноградов А.В. Исследование теплотехнических характеристик и эффективности конструктивной огнезащиты на основе цементных плит типа «ПРОЗАСК Файерпанель» при воспроизведении условий высокотемпературного воздействия // *Пожаровзрывобезопасность*. 2022. Т. 31, № 6. С. 13–29. <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.06.13-29>.

References

1. LNG production in Russia should grow 4 times by 2035(In Russ). Available at: https://www.vedomosti.ru/industry/energy_future/articles/2023/09/11/994392-proizvodstvo-spg-v-rossii-dolzno-virasti (accessed: 14.04.2024).

2. Mojarad A.A.S., Atashbari V., Tantau A. Challenges for Sustainable Development Strategies in Oil and Gas Industries. *Proceedings of the 12th International Conference on Business Excellence 2018*. Bucharest; 2018. P. 626-638. <https://doi.org/10.2478/picbe-2018-0056>.
3. Yoshinori Hiroya, Masayuki Tanabe, Shunji Kataoka, Yoshinori Yamada, Tomonori Miyashita. Optimization of Cryogenic Spill Protection Insulation Thickness. *An International Research Journal. Chemical Engineering Transactions*. 2016; (48): 643-648.
4. Lervåg K. Y., et al. A combined fluid-dynamic and thermodynamic model to predict the onset of rapid phase transitions in LNG spills. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021; (69): 104354.
5. Bereznyakov A. A., Kalaushin D. R., Simonov M. Yu. Ed. by Fedorova E.B. Analysis of the use of various heat exchangers in the field of liquefied natural gas. In: *Szhizhennyyi prirodnyy gaz: problemy i perspektivy. Tezisy dokladov II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Liquefied natural gas: problems and prospects: Abstracts of the II All-Russian Scientific and practical conference..* Moscow: Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University); 2023. P. 88-91. (In Russ). EDN RUHDQQ.
6. Hiroya Y., Tanabe M., Kataoka S., Yamada Y., Miyashita, T. Simplified Method to Define the Cryogenic Spill Hazard in LNG Liquefaction Facility. *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*. 2019; (77): 505-510. <https://doi.org/10.3303/CET1977085>
7. Jo Y.-D., Ahn B.J. Analysis of hazard areas associated with high-pressure natural-gas pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2002; 15 (3): 179-188.
8. Abdoul Nasser A. H., Ndalila P. D., Mawugbe E. A., Emmanuel Kouame M., Paterne M. A., Li Y. Mitigation of Risks Associated with Gas Pipeline Failure by Using Quantitative Risk Management Approach: a Descriptive Study on Gas Industry. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021; (9): 1098. <https://doi.org/10.3390/jmse9101098>.
9. Mikalsen R.F., Glansberg K., Wormdahl E.D., Stolen R. Jet fires and cryogenic spills: How to document extreme industrial incidents. In: *Proceedings of the Sixth Magdeburg Fire and Explosion Days conference proceedings*. Magdeburg, Germany, 25–26 March. 2019. P. 1-6.
10. Baalisampang T., et al. Methodology to analyse LNG spill on steel structure in congested marine offshore facility. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; (62): 103936.
11. Young-Do Jo, Bum Jong Ahn. A method of quantitative risk assessment for transmission pipeline carrying natural gas. *Journal of Hazardous Materials*. 2005; 123 (1–3): 1-12.
12. Bradley I., Willoughby D., Royle M. A review of the applicability of the jet fire resistance test of passive fire protection materials to a range of release scenarios. *Process Safety and Environmental Protection*. 2019; (122): 185-191. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.12.004>.

13. Delphine M. Laboureux, Nirupama Gopalaswami, Bin Zhang, Yi Liu, M. Sam Man-nan, Experimental study on propane jet fire hazards: Assessment of the main geometrical features of horizontal jet flames. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016; (41): 355-364. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.02.013>.
14. Liu Y., et al. Evaluation and prediction of the safe distance in liquid hydrogen spill accident. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021; (146): 1–8.
15. Nguyen L. D., Kim M., Chung K. Vaporization of the non-spreading cryogenic-liquid pool on the concrete ground. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020; (163): 120464.
16. Nubli H., et al. Structural impact under accidental LNG release on the LNG bunkering ship: Implementation of advanced cryogenic risk analysis. *Process Safety and Environmental Protection*. 2024; (186): 329–347.
17. Yu X., et al. Flame characteristics of under-expanded, cryogenic hydrogen jet fire. *Combustion and Flame*. 2022; (244): 112294.
18. Cryogenic Spill Protection Requirements. Part 1. Fundamentals. Available at: <https://www.pfpnet.com/wp-content/uploads/2023/11/PFPNet-Fundamentals-of-Cryogenic-Spill-Protection-Part-1.pdf> (accessed: 14.04.2024).
19. Gravit M., Shabunina D., Klementev B. Fire resistance of steel structures with epoxy fire protection under cryogenic exposure. *Buildings*. 2021; 11(11). <https://doi.org/10.3390/buildings11110537>. EDN XRCOPQ.
20. Klement'ev B. A., Kalach A. V., Gravit M. V. Comparative analysis of the requirements of Russia and the USA for fire resistance of building structures of oil refineries and petrochemical plants. *Pozharovzryvobezopasnost' = Fire and explosion safety*. 2021; 30(5): 5-22. (In Russ). <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.05.5-22>. EDN MNGMRT.
21. Gravit M.V., Shabunina D.E. Plastering compounds as fire protection of steel structures of oil and gas facilities. *Pozhary i chrezvychainye situatsii: preduprezhdenie, likvidatsiya = Fires and emergencies: prevention, liquidation*. 2022; (3): 46-55 (In Russ). <https://doi.org/10.25257/FE.2022.3.46-55>.
22. Antonov S. P., Gravit M. V., Nedviga E.S., Fridrih O.A. Fire protection systems of steel structures with cement slabs and a fire barrier under cryogenic and Jet-Fire effects. *Pozhary i chrezvychainye situatsii: predotvrashchenie, likvidatsiya = Fires and emergencies: prevention, liquidation*. 2024; (2). (In Russ).
23. Garashchenko A.N., Antonov S.P., Vinogradov A.V. Investigation of thermal engineering characteristics and effectiveness of structural fire protection based on cement slabs of the "PROSASK Fire Panel" type when reproducing high-temperature exposure conditions. *Pozharovzryvobezopasnost' = Fire and Explosion Safety*. 2022; 31 (6): 13-29. (In Russ). <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.06.13-29>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Гравит Марина Викторовна, кандидат технических наук, доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: marina.gravit@mail.ru

Marina V. Gravit, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: marina.gravit@mail.ru

Недвига Екатерина Сергеевна, старший преподаватель Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: nck@bk.ru

Ekaterina S. Nedviga, Senior Lecturer, Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: nck@bk.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 624.074.421

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-82-99>

Расчет складчатых панелей из текстильно-армированного бетона по методу предельных усилий

А. Е. Донцова¹, О. Н. Столяров¹ ✉

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

✉ e-mail: stolyarov_on@spbstu.ru

Abstract

Цель исследования. В предлагаемой публикации в качестве цели исследования выбрана оценка эффективности применения неметаллических сеток из высокопрочных волокон в армировании складчатых элементов. Для этого исследуются методы расчета складчатых конструкций из бетонных композитов и проводится сравнительный расчет конструкции с различными параметрами армирования.

Методы. В статье проанализирован алгоритм расчета армоцементных конструкций по методу предельных усилий с переходом от исходного складчатого сечения к приведенному. По исследуемому методу проведен расчет тонкой складчатой панели, армированной сетками из различных материалов, с постоянным коэффициентом сетчатого армирования. В качестве армирования были рассмотрены сварная стальная сетка, тканая сетка из высокопрочных стеклянных волокон и тканая сетка из углеродных волокон. Попутно была решена обратная задача, в рамках которой подбирался коэффициент армирования, необходимый для обеспечения одинаковой несущей способности сечения при применении разных армирующих материалов.

Результаты. Расчет показал наибольшую несущую способность сечения, армированного сеткой из углеродных волокон – 14,5 кНм. При армировании сеткой из высокопрочных стеклянных волокон несущая способность сечения составила 6,4 кНм. Наименьшие значения были получены при армировании складчатой панели сварной стальной сеткой: несущая способность сечения составила 1,72 кНм. Коэффициенты сетчатого армирования для стальной сетки (С), стеклянной сетки (ЩС) и углеродной сетки (У) распределились в соотношении С:ЩС:У=1:0,26:0,12.

Заключение. Армирование бетонных композитов неметаллическими сетками имеет значительный потенциал для проектирования легких пространственных конструкций покрытий зданий и сооружений. Применение высокопрочных армирующих волокон позволяет достигнуть прочности панелей, сравнимой с прочностью традиционных армоцементных изделий. Необходимо рассмотреть прочие прочностные расчеты складчатых панелей с армированием неметаллическими сетками, а также экспериментально подтвердить результаты аналитических расчетов.

Ключевые слова: бетон; сцепление; композитная арматура; текстильно-армированный бетон; оболочки; складчатые конструкции.

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

Для цитирования: Донцова А. Е., Столяров О. Н. Расчет складчатых панелей из текстильно-армированного бетона по методу предельных усилий // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №3. С. 82-99. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-82-99>.

Поступила в редакцию 29.05.2024

Подписана в печать 10.07.2024

Опубликована 30.09.2024

Ultimate limit-state design of textile-reinforced concrete folded floor panels

Anna E. Dontsova ¹, Oleg N. Stolyarov ¹ ✉

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

✉ e-mail: stolyarov_on@spbstu.ru

Abstract

Purpose of research. The main goal of this study is to evaluate the effectiveness of using non-metallic meshes made of high-strength fibres in the reinforcement of folded elements. For this purpose, methods for calculating folded structures made of concrete composites are investigated, and a comparative calculation of the structure with various reinforcement parameters is performed.

Methods. The study analyzes an algorithm for calculating reinforced cement structures using the limit force method with the transition from the original folded section to the reduced section. Using the method under study, we calculated a thin folded panel reinforced with meshes of various materials with a constant mesh reinforcement coefficient. Welded steel mesh, high-strength glass fiber textile mesh and carbon fiber textile mesh were considered as reinforcement. Simultaneously, the inverse problem was solved, within the framework of which the reinforcement coefficient necessary to ensure the same load-bearing capacity of the section when using different reinforcing materials was selected.

Results. Sample of section reinforced with carbon fiber mesh exhibit the greatest ultimate load of 14.5 kNm. Sample of section reinforced with glass fiber and welded steel mesh exhibit ultimate load of 6.4 kNm and 1.72 kNm, respectively. Inverse problem was also solved. The reinforcement ratio necessary to ensure equal load-bearing capacity of the panel reinforced with different materials was determined. The reinforcement ratios of steel mesh (S), AR-glass textile (G) and carbon textile (C) were found as S:G:C=1:0.26:0.12.

Conclusion. Reinforcement of concrete composites with non-metallic meshes has significant potential for the design of lightweight spatial structures for roofing buildings and structures. The use of high-strength reinforcing textile meshes makes it possible to achieve panel strength comparable to that of traditional reinforced concrete products. It is necessary to consider other strength calculations of folded panels reinforced with non-metallic meshes and experimentally confirm the results of analytical calculations.

Keywords: concrete; bond; non-metallic reinforcement; textile reinforced concrete; shells; folds; folded structures.

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

For citation: Dontsova A. E., Stolyarov O. N. Ultimate limit-state design of textile-reinforced concrete folded floor panels. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(3): 82-99 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-82-99>.

Received 29.05.2024

Accepted 10.07.2024

Published 30.09.2024

Введение

Текстильно-армированный бетон (ТАБ) – это сравнительно новый конструкционный материал. В научной литературе присутствует значительное число исследований его конструктивных и эксплуатационных свойств [1–3], а также описан ряд случаев применения конструкций из ТАБ в объектах гражданского строительства [4–7]. Оценка прочности элементов из ТАБ и её повышение являются ключевыми вопросами исследований на данный момент. Прочность ТАБ на изгиб обсуждается в статьях [8, 9]. Испытания элементов из текстильно-армированного бетона на растяжение представлены в работах [10, 11]. В работах [12, 13] рассматриваются конструктивные особенности использования высокопрочного бетона при создании тонкостенных элементов из ТАБ. Предлагается использование технологии химического предварительного напряжения панелей, повышающего прочность на изгиб и трещиностойкость элементов [14]. Сравнение различных материалов для текстильного армирования представлено в [15]. Тем не менее, несущая способность конструкций из ТАБ в большинстве случаев определяется экспериментально или с применением конечно-элементного моделирования. Отсут-

ствуют стандарты, регламентирующие применение текстильно-армированного бетона в строительных проектах.

При проектировании железобетонных покрытий зданий и сооружений, испытывающих нагрузки только от собственного веса и атмосферных осадков, сжатая зона бетона зачастую оказывается загружена незначительно, несущая способность материала не используется в полной мере. Такие случаи можно рассматривать как случаи вынужденного перерасхода материала [16, 17]. Данная инженерная проблема может быть решена конструированием пустотных и ребристых покрытий, а также покрытий оболочкового типа: складчатых [18], арочных [19, 20], или криволинейных [6]. Обзор проектов оболочек из текстильно-армированного бетона приведен в [21, 22]. Прочностные расчеты складчатых конструкций из текстильно-армированного бетона приведены в работах [23]. Экспериментальная оценка прочности сэндвич-панелей со складчатой сердцевинной из текстильно-армированного бетона представлена в [24]. Масштабным проектом в данной области является проект немецких ученых Oricrete [25], в рамках которого складчатые конструкции из текстильно-армированного бетона производятся по методу оригами [26, 27].

В данной работе рассмотрен способ расчёта складчатой конструкции покрытия из текстильно-армированного бетона на основании основных положений расчёта композитных бетонных конструкций, изложенных в действующих нормах и научной литературе. Для армирования конструкции рассматриваются основываемые сетки из стеклянных и углеродных ровингов.

При проектировании оболочек рационально применение армоцемента – бетонного композита, армированного тканой или плетеной стальной сеткой [28]. Армоцемент является ближайшим аналогом ТАБ, различие между композициями заключается в материале армирующей сетки. В российских строительных нормах актуальны стандарты по применению армоцемента – это СП 96.13330.2016 «Армоцементные конструкции», СП 387.1325800.2018 «Железобетонные пространственные конструкции покрытий и перекрытий. Правила проектирования», а также «Пособие по проектированию армоцементных конструкций» к СП 96.13330.2016.

Применение неметаллического армирования в бетонных конструкциях регламентируется СП 295.1325800.2017 «Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования». Нормативный предел прочности стеклокомпозитной арматуры при растяжении $R_{f,n}=800$ МПа, что соответствует стальной арматуре класса А800. Расчетное сопротивление

растяжению стеклокомпозитной арматуры при расчете по предельным состояниям первой группы на действие только постоянных и длительных нагрузок в соответствии со сводом правил равно $R_f=240$ МПа, что соответствует расчетному сопротивлению растяжению стальной арматуры класса А240 (210 МПа). Дальнейшие указания по расчету изделий со стеклопластиковой или стальной арматурой различаются незначительно и строятся на основных законах теории железобетона. Взаимозаменяемость стеклопластиковой и стальной арматуры зачастую обосновывается сходством в показателях сцепления армирующих стержней с бетонной матрицей [29], а также близостью коэффициентов линейного расширения стали и стеклопластика [28].

Стеклопластиковые и стальные стержни являются сходными по основным характеристикам, и стеклопластиковую арматуру часто используют в строительной практике. Работа сеток из стеклянных нитей в качестве армирующего материала может отличаться от работы стержней. Во-первых, внешние геометрические параметры нитей не являются постоянными характеристиками. Нити могут деформироваться при бетонировании конструкций и последующей усадке бетона. В этом случае изменяется диаметр и форма нити, а также её площадь сечения, что влияет на коэффициент армирования конструкции. Поэтому для проведения аналогии меж-

ду ткаными стеклянными и стальными сетками необходимо дополнительное теоретическое и экспериментальное обоснование. Тем не менее, с точки зрения сцепления армирующего материала с бетонной матрицей, характеристики стальных стержней, стеклопластиковых стержней и стеклянных нитей схожи. В работах [30, 31] представлены результаты испытаний полимерных ровингов на выдергивание из бетонной матрицы, и влияние пропиток и глубины заделки на сцепление ровингов с бетоном.

Цель данного исследования заключалась в оценке эффективности применения неметаллических сеток из высокопрочных волокон в армировании складчатых элементов. Для достижения цели были выполнены следующие задачи:

1. Проанализировать метод расчета складчатых конструкций, использующий переход от складки к приведенному двутавровому сечению.

2. Исследовать соответствие геометрических параметров исходного складчатого и конечного приведенного сечений для осуществления корректного перехода от одного к другому.

3. Провести оценочный расчет типовой складчатой панели с трапецидальным поперечным сечением по различным сценариям армирования: с использованием сварной стальной сетки, сетки из высокопрочных стеклянных волокон, и сетки из углеродных волокон.

Материалы и методы

Расчет складчатых покрытий через приведенное сечение

Аналитический расчет складчатых покрытий ведется посредством приведения складчатого поперечного сечения к эквивалентному (приведенному). Эквивалентным принимается тавровое или двутавровое сечение для треугольных и трапецидальных складок, соответственно. Работа армирующего материала и бетонной матрицы представляется совместной, учёт сцепления арматуры с бетоном не производится. В расчёте учитывается лишь прочность армирующего материала и его площадь в сечении элемента. Алгоритм расчёта прочности сечения, нормального к продольной оси, по предельным состояниям первой группы приведен на рис. 1.

Переход к приведенному сечению для трапецидальной складки

Основные геометрические характеристики исходной трапецидальной складки и соответствующего ей приведенного сечения (двутавра) приведены на рис. 2.

Соответствие геометрических параметров исходного сечения трапецидальной формы и приведенного двутаврового сечения сведено в табл. 1.

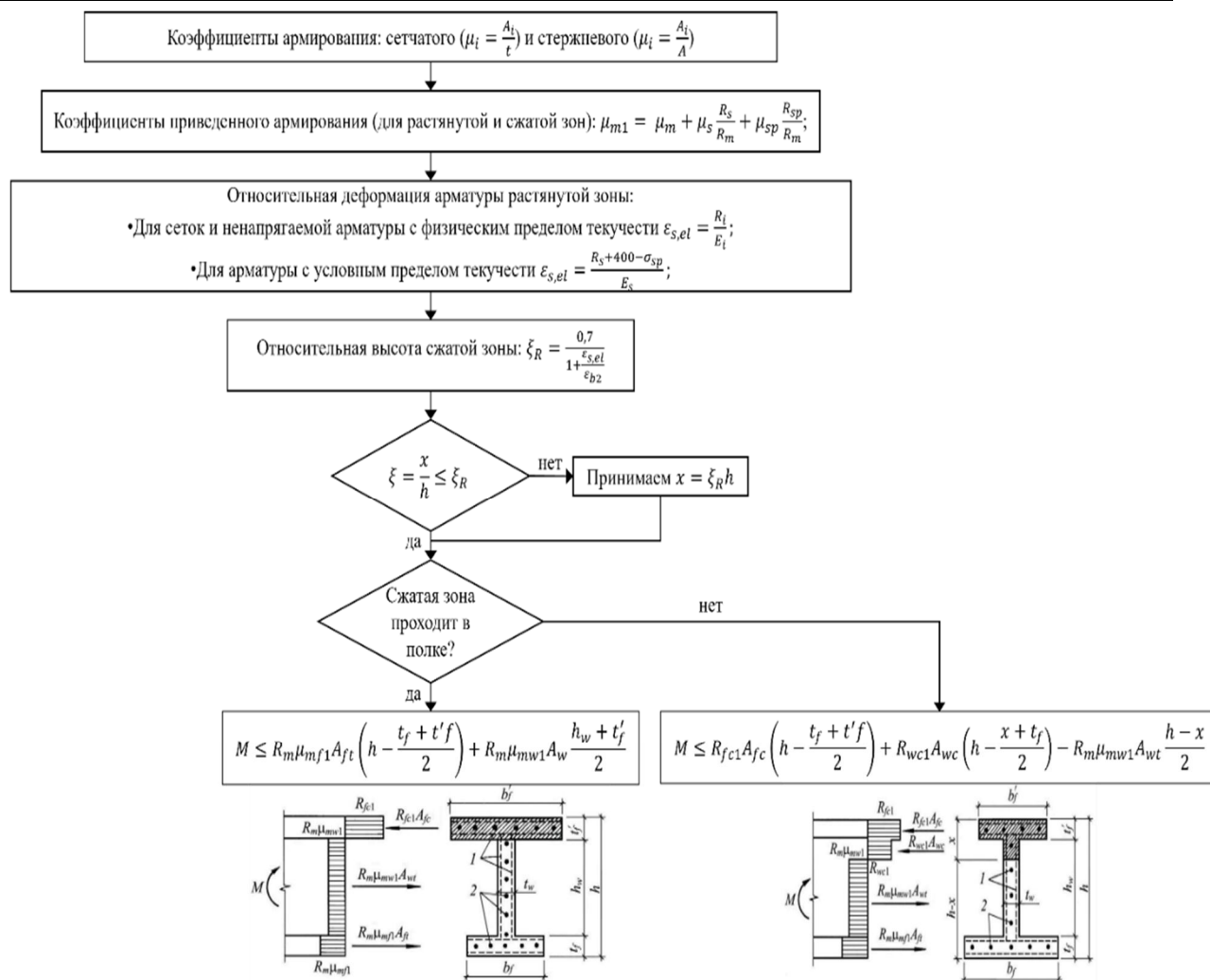


Рис. 1. Алгоритм расчёта складчатых элементов

Fig. 1. The algorithm for folded-plate structures design

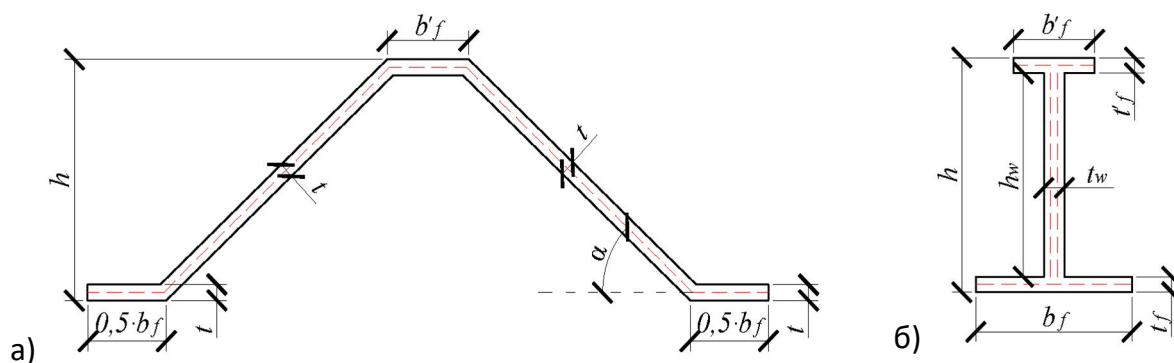


Рис. 2. Схемы сечений: а – исходного; б – приведенного

Fig. 2. Folded-plate section parameters: а – initial; б – transformed section

Таблица 1. Соответствие геометрических характеристик исходного и приведенного сечений**Table 1.** Correspondence between the geometric characteristics of the original and transformed sections

Обозначение / Designation	Трапецеидальная складка / Trapezoidal fold	Двутавр / I-beam
Заданные характеристики		
$t/t_f/t'_f$	Толщина сечения	Толщина верхней и нижней полки
b_f	Ширина нижнего основания	Ширина нижней полки
b'_f	Ширина верхнего основания	Ширина верхней полки
h	Высота складки	Высота двутавра
α	Угол наклона складки к горизонту	-
n	Число полных складок в элементе	-
Рассчитываемые характеристики		
$h_w = h - (t_f + t'_f)$	-	Высота стенки двутавра
$t_w = 2t \sin \alpha \cdot n$	-	Толщина стенки двутавра (приведенная)

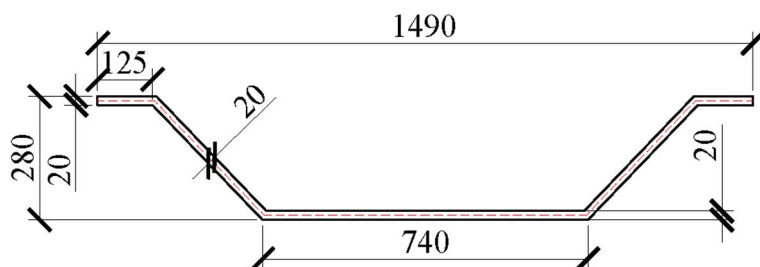
Для сравнительного анализа была рассмотрена складчатая панель, находящаяся под действием изгибающего момента от постоянных и длительных нагрузок ($M=12,56$ кНм), и рассчитанная как армоцементное строительное изделие в «Пособии по проектированию армоцементных конструкций» [32, с. 32-34]. Исходные данные для задачи были приняты из примера расчёта. Схема поперечного

сечения панели приведена на рис. 3а. Схема приведенного сечения складки приведена на рис. 3б.

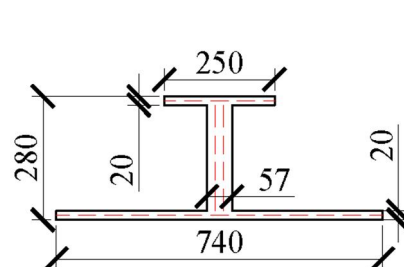
Оценка несущей способности складки при различном армировании панели

В исходной задаче складка армирована несколькими типами стального армирования:

а)



б)

**Рис. 3.** Схема поперечного сечения: а – трапецеидальной складки; б – двутавра**Fig. 3.** Cross-sectional diagram of: а – trapezoidal fold; б – I-beam

1. Двумя сварными стальными сетками № 12,5-05 (по ТУ 14-4-713-97).

2. Четырьмя стержнями Ø3 мм класса Вр-I (по ГОСТ 6727) в верхнем основании;

3. Четырьмя стержнями Ø4 мм класса Вр1400 в нижнем основании складки.

Для сравнения различных видов армирующей сетки рассматриваемая складка была рассчитана по той же методике с тремя видами армирования, различными по материалу, но с постоянным коэффициентом армирования:

1. Армирование одной сварной стальной сеткой № 12,5-05 (по ТУ 14-4-713-97). Расчетное сопротивление растяжению $R_{mc_1} = 245$ МПа (табл. 4 СП 96.13330.2016); модуль упругости $E_{m_1} = 150000$ МПа (п. 5.2.8 СП 96.13330.2016).

2. Армирование одной тканой сеткой из стекловолокна (СР-4¹) линейной плотностью 2400 текс. Сопротивление растяжению $R_{mc_2} = 914$ МПа; модуль упругости $E_{m_2} = 66500$ МПа².

3. Армирование одной тканой сеткой из углеродного волокна (УР1¹) линейной плотностью 1600 текс. Сопротивление растяжению $R_{mc_3} = 2093$ МПа; модуль упругости $E_{m_3} = 173000$ МПа³.

¹ Столяров О.Н. Тонкостенные строительные конструкции из текстильно-армированного бетона: специальность 2.1.1 «Строительные конструкции, здания и сооружения»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / О.Н. Столяров; Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого. СПб., 2023. 334 с.

² Там же, табл. 2.1

³ Там же, табл. 2.4

Материал панели принят из примера её расчёта – мелкозернистый бетон класса В40, с расчётной призмочной прочностью на сжатие $R_b = 22$ МПа (по таблице 6.8 СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения») и относительной деформацией сжатого бетона при напряжениях, равных R_b , $\varepsilon_{b_2} = 0,0048$ (по таблице 6.10 СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения»).

Сравнительный расчёт всех четырёх случаев армирования при постоянном коэффициенте армирования сетками $\mu_m = 0,0015$ (при толщине элемента 10 мм) приведен в табл. 2. Данные об армирующих стержнях и их параметрах в таблицу не занесены, поскольку в полной мере представлены в примере расчета задачи в [32].

Пример расчёта таблицы для исходной схемы армирования панели:

Относительная деформация арматуры растянутой зоны вычисляется по формуле

$$\varepsilon_{s,el} = \frac{R}{E}, \quad (1)$$

где R – сопротивление арматуры растяжению, МПа;

E – модуль упругости арматуры, МПа.

Для первой схемы армирования в растянутой зоне находятся стержни класса Вр1400 с $R_s = 1215$ МПа, $E_s = 200000$ МПа:

$$\varepsilon_{s,el} = \frac{1215}{200000} = 0,00608.$$

Таблица 2. Расчет складчатой панели при коэффициенте армирования сетками $\mu_m=0,0015$ **Table 2.** Calculation of a folded panel with a mesh reinforcement coefficient of $\mu_m=0,0015$

Вид армирования / Type of reinforcement	Исходн. (2 сварн. сетки и стержни) / Initial (2 welded nets and rods)	Сварная сетка / Welded mesh	Сетка из стеклянных ро- вингов CP-4 / Glass mesh. roving CP 4	Сетка из уг- леродн. ро- вингов / Car- bon mesh. Roving
Прочность сеток на растяжение, R_{mc} , МПа	245	245	914,1	2093
Число сеток, n	2	1	1	1
Модуль упругости арматуры, E_m , МПа	200000	200000	66500	173000
Относительная деформация ар- матуры растянутой зоны $\varepsilon_{s,el}$	0,00608	0,001225	0,0137	0,0121
Относительная высота сжатой зоны бетона ξ_R	0,309	0,558	0,181	0,199
Коэффициент армирования стержнями				
Сжатой (верхней) полки	0,00566	0	0	0
Растянутой (нижней) полки	0,00339	0	0	0
Коэффициенты приведенного армирования				
Сжатой (верхней) полки	0,0102	0,0008	0,0008	0,0008
Растянутой (нижней) полки	0,0183	0,0008	0,0008	0,0008
Вертикальной стенки	0,00105	0,00053	0,00053	0,00053
Проверка положения границы сжатой зоны: $R_{c1} A_{fc} > R_m \mu_{mf1} A_{ft} + R_m \mu_{mw1} A_{wt}$				
$R_{c1} A_{fc}$, Н	122495	110980	113656,4	118372
$R_m \mu_{mf1} A_{ft} + R_m \mu_{mw1} A_{wt}$, Н	69875	4677	17451	39956
Условие соблюдается?	да	да	да	да
Несущая способность сечения, кНм	17710	1716	6404	14663

Относительная высота сжатой зоны бетона ξ_R вычисляется по формуле

$$\xi_R = \frac{0,7}{1 + \frac{\varepsilon_{s,el}}{\varepsilon_{b_2}}}, \quad (2)$$

$$\xi_R = \frac{0,7}{1 + \frac{0,00608}{0,0048}} = 0,309.$$

Коэффициенты армирования рассчитываются по формуле

$$\mu_s = \frac{A_s}{A}, \quad (3)$$

где A_i – площадь поперечного сечения арматуры, в данном случае стержней;

A – площадь поперечного сечения элемента. Для нижней растянутой полки площадь поперечного сечения четырех стержней $A_s = 28,28 \text{ мм}^2$, а габариты полки: $b_f = 740 \text{ мм}$, $t_f = 20 \text{ мм}$. Тогда коэффициент армирования нижней полки будет:

$$\mu_s = \frac{50,24}{740 \cdot 20} = 0,00339.$$

Коэффициент приведенного армирования рассчитывается по формуле

$$\mu_{m_1} = \mu_m + \mu_s \frac{R_s}{R_m} + \mu_{sp} \frac{R_{sp}}{R_m}, \quad (4)$$

где μ_m – коэффициент сетчатого армирования;

R_s – расчетное сопротивление растяжению арматуры;

R_m – расчетное сопротивление растяжению сетки. С учетом коэффициента армирования сеткой $\mu_m = 0,0015$, и наличия в исходной задаче 2 сеток, для

нижней растянутой полки коэффициент приведенного армирования будет равен:

$$\mu_{m_1} = 0,0015 + 0,00339 \cdot \frac{1215}{245} = 0,0183.$$

Если граница сжатой зоны проходит в верхней полке, выполняется условие:

$$R_{c_1} A_{fc} > R_m \mu_{mf_1} A_{ft} + R_m \mu_{mw_1} A_{wt}, \quad (5)$$

где $R_{c_1} = R_b + R_{mc} \mu_{m_1}$;

$$A_{fc} = b'_f t'_f;$$

$$A_{ft} = b_f t_f;$$

$$A_w = h_w t_w.$$

Рассчитаем каждую из частей неравенства:

$$R_{c_1} A_{fc} = (22 + 245 \cdot 0,0102) \times \\ \times (0,25 \cdot 0,02) = 124332 \text{ Н};$$

$$R_m \mu_{mf_1} A_{ft} + R_m \mu_{mw_1} A_{wt} = \\ = 245 \cdot 0,0183 \cdot 0,74 \cdot 0,02 + \\ + 245 \cdot 0,00105 \cdot 0,24 \cdot 0,057 = \\ = 75314 \text{ Н}$$

$$124332 \text{ Н} > 75314 \text{ Н}.$$

Условие выполнено, сжатая зона расположена в верхней полке.

При расположении сжатой зоны в верхней полке несущая способность сечения определяется по формуле

$$M_{cr} = R_m \mu_{mf_1} A_{ft} \left[h - \frac{t_f + t'_f}{2} \right] + \\ + R_m \mu_{mw_1} A_w \frac{h_w + t'_f}{2}. \quad (6)$$

Подставляя полученные значения в формулу (6), получаем несущую способность сечения:

$$M_{cr} = 245 \cdot 0,01988 \cdot (0,74 \cdot 0,02) \left[0,28 - \frac{0,02 + 0,02}{2} \right] + \\ + 245 \cdot 0,00105 \cdot (0,24 \cdot 0,057) \cdot \frac{0,24 + 0,02}{2} = 19,12 \text{ кНм}.$$

Полученный результат удовлетворяет изначальному условию, поставленному в задаче – воздействующий на сечение изгибающий момент $M = 12,56 \text{ кНм}$ меньше несущей способности сечения.

Оценка потребности в армирующем материале для обеспечения одинаковой несущей способности сечения

Для оценки потребности в материале должна быть решена задача, обратная представленной в предыдущем пункте. Зададимся потребностью в несущей способности сечения $M_{cr} = 10,5 \text{ кНм}$, и рассчитаем необходимые коэффициенты армирования для такого сечения с использованием сварной стальной, стеклянной или углеродной сетки. Полученные коэффициенты армирования составят:

- для стальной сварной сетки $\mu_{m_1} = 0,0095$;
- для сетки из стеклянных ровингов СР-4 $\mu_{m_2} = 0,0025$;
- для сетки из углеродных ровингов УР1 $\mu_{m_3} = 0,0011$.

Результаты и их обсуждение

Из проведенного расчёта можно сделать вывод, что основное влияние на прочность складки в исходной задаче оказывает стержневая арматура в ниж-

нем основании трапецеидальной складки. При удалении стержневой арматуры из сечения складки несущая способность сечения понижается на порядок. При этом, при использовании армирующей углеродной сетки несущая способность сечения оказывается сравнима с изначальной. Армирование сеткой из стеклянных ровингов повышает несущую способность сечения в 3,7 раза по сравнению со сварной сеткой. Результаты расчета в графическом представлении приведены на рис. 4. Результаты расчета исходной панели, армированной стержнями и сетками, аналогичны результатам, полученным в [32].

В расчёте была использована классическая модель расчета складчатых конструкций, в рамках которой армирование принимается равномерно распределенным по сечению элемента, поскольку расстояние между стержнями не превышает $10t$, где t – толщина сечения. Правомочность применения данной модели в расчетах изделий из текстильно-армированного бетона должна быть дополнительно подтверждена экспериментально и методами конечно-элементного моделирования. Выполнение подтверждающих расчетов и создание моделей планируется в дальнейших исследованиях.



Рис. 4. Несущая способность сечения складки под действием постоянных и длительных нагрузок при расчете по первой группе предельных состояний с различными комбинациями армирования при постоянном коэффициенте армирования сетками $\mu_m=0,0015$

Fig. 4. Bearing capacity of a folded-plate section under constant and long-term loads calculated with various combinations of reinforcement at a constant mesh reinforcement coefficient of $\mu_m=0,0015$

Ввиду высокой стоимости высокопрочных углеродных волокон при дальнейших расчетах изделий из текстильно-армированного бетона следует рассмотреть возможности комбинирования стеклянных и углеродных армирующих волокон для повышения доступности конечного изделия.

Важно отметить, что для корректного определения расчетных прочностных показателей армирующих нитей из стекла и углерода необходимо введение коэффициентов условий работы, учитывающих работу армирующих нитей. Более широкое исследование свойств неметаллических армирующих нитей и их совместной работы с бетонной матрицей позволит внести в расчеты уточняющие коэффициенты.

Выводы

В работе был проведен расчет на прочность складчатой панели с трапецеидальным сечением, находящейся под действием длительных и постоянных нагрузок по первой группе предельных состояний. Было рассмотрено четыре сценария армирования панели: стержнями и сварными стальными сетками (представленный изначально в пособии по проектированию [32]); одной сварной стальной сеткой № 12,5-05; одной тканой сеткой из стекловолокна; одной тканой сеткой из углеродного волокна. В результате исследования:

1. Сформирован алгоритм расчета складчатых конструкций с использованием перехода к приведенному двутавровому сечению.

2. Сопоставлены геометрические параметры складчатого и приведенного сечений рассчитываемых элементов.

3. Оценочный расчет типовой складчатой панели с одинаковым коэффициентом сетчатого армирования $\mu_m = 0,0015$ показал наибольшую прочность сечения, армированного углеродным волокном. Несущая способность сечения составила $M_{cr3} = 14,47$ кНм, что сравнимо с несущей способностью исходного сечения,

армированного высокопрочными стальными проволоками $M_{cr} = 17,71$ кНм. Несущая способность сечения, армированного сеткой из стеклянных волокон, $M_{cr2} = 6,40$ кНм оказалась в 2,3 раза ниже, чем с углеродным армированием. Несущая способность сечения, армированного одной сварной стальной сеткой, оказалась самой низкой: $M_{cr1} = 1,72$ кНм.

Список литературы

1. Zdanowicz K., Beckmann B., Marx S. Distributed strain measurements in thin expansive concrete slabs with biaxial textile reinforcement // *Civ. Eng. Des.* 2022. № 4. P. 154–161. <https://doi.org/10.1002/cend.202200002>
2. Wu C., Pan Y., Yan L. Mechanical Properties and Durability of Textile Reinforced Concrete (TRC) — A Review // *Polymers*. 2023. № 18. P. 3826. <https://doi.org/10.3390/polym15183826>.
3. Siva Vignan G., Gourishetty R., Challa D.K. Study on mechanical properties of textile reinforced concrete // *I-manager's Journal on Structural Engineering*. 2020. № 2. P. 25. <https://doi.org/10.26634/jste.9.2.17256>
4. Kulas C. Actual applications and potential of textile-reinforced concrete // *International Congress Series*. 2015. T. 1247, № 7. P. 119-126.
5. Textilbeton – Ausgeführte Projekte im Überblick / D. Ehlig, F. Schladitz, M. Frenzel, et al. // *Beton- und Stahlbetonbau*. 2012. № 11. P. 777–785. <https://doi.org/10.1002/best.201200034>
6. Friese D., Scheurer M., Hahn L. Textile reinforcement structures for concrete construction applications – a review // *J. Compos. Mater.* 2022. № 26. P. 4041–4064. <https://doi.org/10.1177/00219983221127181>
7. Textile reinforced concrete for sustainable structures: Future perspectives and application to a prototype pavilion / P. Valeri, P. Guaita, R. Baur, et al. // *Struct. Concr.* 2020. № 6. P. 2251–2267. <https://doi.org/10.1002/suco.201900511>
8. Experimental investigation and modelling of flexural properties of carbon textile reinforced concrete / M. Halvaei, M. Jamshidi, M. Latifi, et al. // *Constr. Build. Mater.* 2020. № 262. P. 120877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120877>

9. Mansur de Castro Silva R., de Andrade Silva F. Carbon textile reinforced concrete: materials and structural analysis // *Mater. Struct.* 2020. № 1. P. 17. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-1448-4>
10. Goldfeld Y. Structural modelling of textile-reinforced concrete elements under uniaxial tensile loading // *Compos. Struct.* 2020. № 235. P. 111805. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111805>
11. Valeri P., Fernández Ruiz M., Muttoni A. Tensile response of textile reinforced concrete // *Constr. Build. Mater.* 2020. № 258. P. 119517. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119517>
12. Rossi E., Randl N., Harsányi P. Overlapped joints in Textile Reinforced Concrete with UHPC matrix: An experimental investigation // *Mater. Struct.* 2021. № 4ю P. 152. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01739-1>
13. Forman P., Mark P. Interaktionsbemessung für schlanke Querschnitte aus UHPC // *Beton- und Stahlbetonbau*, 2021. № 8. P. 607–619. <https://doi.org/10.1002/best.202100026>
14. Zdanowicz K., Marx S. Flexural behaviour of thin textile reinforced concrete slabs enhanced by chemical prestressing // *Eng. Struct.* 2022. № 256. P. 113946. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.113946>
15. Scheurer M. M., Gries T. Comparative evaluation of textiles for use in textile reinforced concrete // *Mater. Today Proc.* 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.477>
16. Jayasinghe A., Orr J., Hawkins W. Comparing different strategies of minimising embodied carbon in concrete floors // *J. Clean. Prod.* 2022. № 345. P. 131177. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131177>
17. A design methodology to reduce the embodied carbon of concrete buildings using thin-shell floors / W. Hawkins, J. Orr, T. Ibell, et al. // *Eng. Struct.* 2020. № 207. P. 110195. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110195>
18. Mohammadsalehi A., Mostofinejad D. Behavior of high-performance concrete canvas Miura-origami structures under flexural loading // *Structures.* 2023. № 54. P. 928–945. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.05.072>
19. Du W., Liu Q., Zhou Z. Experimental investigation of innovative composite folded thin cylindrical concrete shell structures // *Thin-Walled Struct.* 2019. № 137. P. 224–230. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.01.014>
20. Valeri P., Fernández Ruiz M., Muttoni A. New perspectives for design of lightweight structures by using textile reinforced concrete // *Fib Symposium. Krakow, Poland: Structural Concrete Laboratory of EPFL.* P. 8.
21. Kromoser B., Preinstorfer P., Kollegger J. Building lightweight structures with carbon-fiber-reinforced polymer-reinforced ultra-high-performance concrete: Research ap-

proach, construction materials, and conceptual design of three building components // *Struct. Concr.* 2019. № 2. P. 730–744. <https://doi.org/10.1002/suco.201700225>

22. De Coster A., De Laet L., Tysmans T. Exploring the three-dimensional space with modular concrete shells: Form-finding, design and structural analysis // *Thin-Walled Struct.* 2024. № 195. P. 111336. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111336>

23. Vakaliuk I., Scheerer S., Curbach M. Numerical Analysis of Textile Reinforced Concrete Shells: Force Interaction and Failure Types // *CivilEng.* 2024. № 1. P. 224–246. <https://doi.org/10.3390/civileng5010012>

24. Heimbs S., Cichosz J., Klaus M. Sandwich structures with textile-reinforced composite foldcores under impact loads // *Compos. Struct.* 2010. № 6. P. 1485–1497. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.11.001>

25. Chudoba R., van der Woerd J., Schmerl M. ORICRETE: Modeling support for design and manufacturing of folded concrete structures // *Adv. Eng. Softw.* 2014. № 72. P. 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.05.004>

26. Spartali H., Woerd J.D., Hegger J. Stress redistribution capacity of textile-reinforced concrete shells folded utilizing parameterized waterbomb patterns // *Proceedings of IASS Annual Symposia. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)*, 2022. P. 1–11.

27. van der Woerd J.D., Chudoba R., Bongardt C. Oridome: Construction of a dome by folding // *IASS-SLTE 2014 Symposium «Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints»*. Brasilia: International Association for Shell and Spatial Structures; 2014. P. 1–8.

28. Соколов Б.С. Проектирование армоцементных конструкций в Пособии к СП 96.13330.2016 // *Бетон и железобетон*. 2021. № 1. С. 3–7.

29. Xu S., Krüger M., Reinhardt, H. Bond Characteristics of Carbon, Alkali Resistant Glass, and Aramid Textiles in Mortar // *J. Mater. Civ. Eng.* 2004. № 4. P. 356–364. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2004\)16:4\(356\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:4(356))

30. Quadflieg T., Stolyarov O. Comparison of pull-out behavior of glass, basalt, and carbon rovings embedded in fine-grain concrete and geopolymer // *Mater. Test.* 2022. № 5. P. 746–753. <https://doi.org/10.1515/mt-2021-2117>

31. Homoro O., Michel M., Baranger T.N. Pull-out response of glass yarn from ettringite matrix: Effect of pre-impregnation and embedded length // *Compos. Sci. Technol.* 2019. № 170. P. 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.11.045>

32. Соколов Б.С., Зенин С.А., Титаев В.А. Пособие по проектированию армоцементных конструкций. М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2020. 103 с.

References

1. Zdanowicz K., Beckmann B., Marx S. Distributed strain measurements in thin expansive concrete slabs with biaxial textile reinforcement. *Civ. Eng. Des.* 2022; (4): 154–161. <https://doi.org/10.1002/cend.202200002>
2. Wu C., Pan Y., Yan L. A Review. *Polymers*. 2023; (18): 3826. <https://doi.org/10.3390/polym15183826>.
3. Siva Vignan G., Gourishetty R., Challa D.K. Study on mechanical properties of textile reinforced concrete. *i-manager's Journal on Structural Engineering*. 2020; (2): 25. <https://doi.org/10.26634/jste.9.2.17256>
4. Kulas C. Actual applications and potential of textile-reinforced concrete. *International Congress Series*. 2015; 1247 (7): 119-126.
5. Ehlig D., Schladitz F., Frenzel M., et al. Textilbeton – Ausgeführte Projekte im Überblick. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2012; (11): 777–785. <https://doi.org/10.1002/best.201200034>
6. Friese D., Scheurer M., Hahn L. Textile reinforcement structures for concrete construction applications – a review. *J. Compos. Mater.* 2022; (26): 4041–4064. <https://doi.org/10.1177/00219983221127181>
7. Valeri P., Guaita P., Baur R., et al. Textile reinforced concrete for sustainable structures: Future perspectives and application to a prototype pavilion. *Struct. Concr.* 2020, (6): 2251–2267. <https://doi.org/10.1002/suco.201900511>
8. Halvaei M., Jamshidi M., Latifi M., et al. Experimental investigation and modelling of flexural properties of carbon textile reinforced concrete. *Constr. Build. Mater.* 2020; (262): 120877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120877>
9. Mansur de Castro Silva R., de Andrade Silva F. Carbon textile reinforced concrete: materials and structural analysis. *Mater. Struct.* 2020; (1): 17. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-1448-4>
10. Goldfeld Y. Structural modelling of textile-reinforced concrete elements under uniaxial tensile loading. *Compos. Struct.* 2020; (235): 111805. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111805>
11. Valeri P., Fernández Ruiz M., Muttoni A. Tensile response of textile reinforced concrete. *Constr. Build. Mater.* 2020; (258): 119517. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119517>
12. Rossi E., Randl N., Harsányi P. Overlapped joints in Textile Reinforced Concrete with UHPC matrix: An experimental investigation. *Mater. Struct.* 2021; (4): 152. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01739-1>
13. Forman P., Mark P. Interaktionsbemessung für schlanke Querschnitte aus UHPC. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2021; (8): 607–619. <https://doi.org/10.1002/best.202100026>
14. Zdanowicz K., Marx S. Flexural behaviour of thin textile reinforced concrete slabs enhanced by chemical prestressing. *Eng. Struct.* 2022; (256): 113946. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.113946>

15. Scheurer M. M., Gries T. Comparative evaluation of textiles for use in textile reinforced concrete. *Mater. Today Proc.* 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.477>
16. Jayasinghe A., Orr J., Hawkins W. Comparing different strategies of minimising embodied carbon in concrete floors. *J. Clean. Prod.* 2022; (345): 131177. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131177>
17. Hawkins W. Orr, J., Ibell T., et al. A design methodology to reduce the embodied carbon of concrete buildings using thin-shell floors. *Eng. Struct.* 2020; (207): 110195. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110195>
18. Mohammadsalehi A., Mostofinejad D. Behavior of high-performance concrete canvas Miura-origami structures under flexural loading. *Structures.* 2023; (54): 928–945. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.05.072>
19. Du W., Liu Q., Zhou Z. Experimental investigation of innovative composite folded thin cylindrical concrete shell structures. *Thin-Walled Struct.* 2019; (137): 224–230. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.01.014>
20. Valeri P., Fernández Ruiz M., Muttoni A. New perspectives for design of lightweight structures by using textile reinforced concrete. *fib Symposium*. Krakow, Poland : Structural Concrete Laboratory of EPFL. P. 8.
21. Kromoser B. , Preinstorfer P., Kollegger J. Building lightweight structures with carbon-fiber-reinforced polymer-reinforced ultra-high-performance concrete: Research approach, construction materials, and conceptual design of three building components. *Struct. Concr.* 2019; (2): 730–744. <https://doi.org/10.1002/suco.201700225>
22. De Coster A., De Laet L., Tysmans T. Exploring the three-dimensional space with modular concrete shells: Form-finding, design and structural analysis. *Thin-Walled Struct.* 2024; (195): 111336. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111336>
23. Vakaliuk I. Scheerer, S., Curbach M. Numerical Analysis of Textile Reinforced Concrete Shells: Force Interaction and Failure Types. *CivilEng.* 2024; (1): 224–246. <https://doi.org/10.3390/civileng5010012>
24. Heimbs S., Cichosz J., Klaus M. Sandwich structures with textile-reinforced composite foldcores under impact loads. *Compos. Struct.* 2010; (6): 1485–1497. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.11.001>
25. Chudoba R., van der Woerd J., Schmerl M. ORICRETE: Modeling support for design and manufacturing of folded concrete structures. *Adv. Eng. Softw.* 2014; (72): 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.05.004>
26. Spartali H., Woerd J.D., Hegger J. Stress redistribution capacity of textile-reinforced concrete shells folded utilizing parameterized waterbomb patterns. *Proceedings of IASS Annual Symposia*. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), 2022. P. 1–11.
27. van der Woerd J.D., Chudoba R., Bongardt C. Construction of a dome by folding. *IASS-SLTE 2014 Symposium «Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints»*. Brasilia: International Association for Shell and Spatial Structures; 2014. P. 1–8.

28. Sokolov B.S. Armocement Structures Designing in the Manual to the SP 96.13330.2016. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*. 2021; (1): 3–7. (In Russ.).
29. Xu S., Krüger M., Reinhardt H. Bond Characteristics of Carbon, Alkali Resistant Glass, and Aramid Textiles in Mortar. *J. Mater. Civ. Eng.* 2004; (4): 356–364. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2004\)16:4\(356\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:4(356))
30. Quadflieg T., Stolyarov O. Comparison of pull-out behavior of glass, basalt, and carbon rovings embedded in fine-grain concrete and geopolymer. *Mater. Test.* 2022; (5): 746–753. <https://doi.org/10.1515/mt-2021-2117>
31. Homoro O., Michel M., Baranger T.N. Pull-out response of glass yarn from ettringite matrix: Effect of pre-impregnation and embedded length. *Compos. Sci. Technol.* 2019; (170): 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.11.045>
32. Sokolov B.S., Zenin S.A., Titaev V.A. Manual for armocement structures design. Moscow; 2020. 103 p. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Донцова Анна Евгеньевна, ассистент высшей школы гидротехнического и энергетического строительства Инженерно-строительного института, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: dontsova_ae@spbstu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9081-9575>

Anna E. Dontsova, Assistant at the Higher School of Hydraulic Engineering and Energy Engineering of the Institute of Civil Engineering, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: dontsova_ae@spbstu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9081-9575>

Столяров Олег Николаевич, кандидат технических наук, доцент высшей школы гидротехнического и энергетического строительства Инженерно-строительного института, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: stolyarov_on@spbstu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2930-5022>

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

УДК 621.791.927.5

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-100-118>

Static analysis of stay cables under the varying chord strength of the cable failure inspection in cable-stayed bridges

Ahmed Ramadan Ahmed Ahmed ¹ ✉, Nikolai A. Ermoshin ¹

¹ Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

29, Polytechnicheskaya str., Saint Petersburg 195251, Russian Federation

✉ e-mail: engahmedramadan103@gmail.com

Abstract

Purpose of research. Bridge constructions are frequently subjected to harsh circumstances such as severe weather, earthquakes, traffic accidents, and even explosives. Bridge structures may lose some of their important structural parts (e.g., cables or piers) as a result of such intense external stresses, and further collapse is possible, as progressive collapse is often caused by the abrupt loss of one or more critical structural components. Cable-stayed bridges have very tiny cross-sectional areas and are subjected to high loads. Such strong pressures can destroy anchoring zones due to large stress concentrations, resulting in cable loss. Bridges with cable stays must be thoroughly investigated for the danger of progressive collapse induced by cable loss scenarios. Suggests considering the most common cable failure scenarios throughout the design process. To evaluate the effect of cable loss, do a static analysis with a (DAF) of two. There are two primary ways for avoiding progressive collapse. First, adopt structural or non-structural measures to provide a high level of safety against localized collapse. Second, prevent failures from spreading by establishing a solid foundation that allows for local failures.

Methods. Materials and methods. Damage to cables in the mathematical modeling of cable-stayed bridges. A continuous beam suspended from tension elements (cables) forms the basis of the conceptual model. His strength calculation plan is by comparing stiffness and flexibility matrices of intact and damaged systems. The stiffness matrix for an intact system is calculated using its reduced shape. The flexibility matrix is then calculated by inverting the reduced stiffness matrix. The conceptual model is interactive. As a result, the stiffness matrix is infinite. For direct analytical calculations, the parameter n is set as the ratio of the stiffness of the system ($\eta = \frac{k_{cable}}{k_{beam}}$), and a reduced form of the stiffness matrix is obtained to obtain an intact.

Results. The secant module seems to give a very good approximation, since the error remains less than 1% for cables up to 300 m long and less than 2% for cables up to 750 m long. Russians Russian Bridge has a length of 135.77 meters and the longest cable is 579.57 meters, as a result, the error rate of cables on the Russian Bridge will remain less than 1% for some cables and less than 2% for some cables. Considering that the modulus of elasticity of the steel material of the cable is rarely known with an accuracy of more than 2-3%, it is obvious that the method for determining the secant modulus would be suitable for all practical purposes. The tangent module is often easier to use than the secant module, since it is only necessary to know the voltage of the cable in its initial state. On the other hand, the tangent module can lead to erroneous conclusions with a long cable length and a large traffic-to-idle ratio, as shown in Figure 8.

Conclusion. The distance between two adjacent cables on modern bridges is significantly less than on older bridges. As a result, in the event of a car accident or explosion on the new bridge, several cables will fail. As a result, it was proposed that bridge designers take into account the rupture of all cables within a radius of 10 meters. Several studies have been conducted to find DAF in bridges. According to this study, having a father of two is not always safe. Although a recent study shows that the proposed DAD is safe for cable construction, that is, it is unsafe for structures of pylons or beams with negative moments.

Keywords: bridge structures; progressive collapse; cable-stayed bridges; load conditions; cable loss.

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

For citation: Ahmed Ramadan Ahmed Ahmed, Ermoshin N. A. Static analysis of stay cables under the varying chord strength of the cable failure inspection in cable-stayed bridges. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(3): 100-118. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-100-118>.

Received 20.05.2024

Accepted 25.07.2024

Published 30.09.2024

Статический анализ несущих тросов в условиях изменяющейся прочности хорды при проверке повреждения троса на вантовых мостах

Ахмед Рамадан Ахмед ¹, Н. А. Ермошин ¹

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

✉ e-mail: engahmedramadan103@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Мостовые сооружения часто подвергаются воздействию суровых погодных условий, землетрясений, дорожно-транспортных происшествий и даже взрывчатых веществ. Мостовые сооружения могут потерять некоторые из своих важных конструктивных элементов (например, тросы или опоры) в результате таких интенсивных внешних воздействий, и возможно дальнейшее обрушение, поскольку прогрессирующее обрушение часто вызвано внезапной потерей одного или нескольких важных конструктивных компонентов. Вантовые мосты имеют очень малую площадь поперечного сечения и подвергаются высоким нагрузкам. Такое сильное давление может привести к разрушению зон крепления из-за высокой концентрации напряжений, что приведет к обрыву кабеля. Мосты с вантовыми опорами должны быть тщательно исследованы на предмет опасности постепенного обрушения, вызванного сценариями обрыва кабеля. Необходимо учитывать наиболее распространенные сценарии обрыва кабеля на протяжении всего процесса проектирования. Чтобы оценить последствия обрыва кабеля, выполняется статический анализ с использованием двух методов (DAF). Существует два основных способа избежать постепенного обрушения. Во-первых, принимаются конструктивные или неструктурные меры для обеспечения высокого уровня безопасности при локальном обрушении. Во-вторых, необходимо предотвратить распространение сбоя, создав прочную основу, допускающую локальные сбои.

Методы. Повреждения тросов при математическом моделировании вантовых мостов. Непрерывная балка, подвешенная к натяжным элементам (тросам), составляет основу концептуальной модели. Его план расчета прочности путем сравнения матриц жесткости и гибкости неповрежденных и поврежденных систем. Матрица жесткости для неповрежденной системы вычисляется с использованием ее уменьшенной формы. Матрица гибкости затем вычисляется путем инвертирования матрицы уменьшенной жесткости. Концептуальная модель является итеративной. В результате матрица жесткости бесконечна. Для прямых аналитических вычислений параметр η задается как отношение жесткости системы ($\eta = \frac{k_{cable}}{k_{beam}}$), и получается уменьшенная форма матрицы жесткости для получения неповрежденного состояния.

Результаты исследования. Модуль секущей, по-видимому, дает очень хорошее приближение, поскольку погрешность остается менее 1% для кабелей длиной до 300 м и менее 2% для кабелей длиной до 750 м. А поскольку длина самого маленького кабеля на Русском мосту составляет 135,77 метра, а самого длинного - 579,57 метра, в результате частота ошибок кабелей на Русском мосту останется для некоторых кабелей менее 1%, а для других кабелей менее 2%. Учитывая, что модуль упругости стального материала троса редко известен с точностью более 2-3%, очевидно, что метод определения секущего модуля был бы пригоден для всех практических целей. Касательный модуль часто проще в использовании, чем секущий модуль, поскольку необходимо знать только напряжение кабеля в исходном состоянии. С другой стороны, касательный модуль может привести к ошибочным выводам при большой длине кабеля и большом соотношении трафика к холостому ходу, как показано на рисунке 8.

Заключение. Расстояние между двумя соседними кабелями на современных мостах значительно меньше, чем на старых мостах. В результате в случае автомобильной аварии или взрыва на новом мосту несколько кабелей выйдут из строя. В результате было предложено, чтобы проектировщики мостов учитывали разрыв всех кабелей в радиусе 10 метров. Было проведено несколько исследований, чтобы найти DAF в мостах. Предложенный DAD безопасен для конструкции кабеля, то есть он небезопасен для конструкций пилонов или балок с отрицательными моментами.

Ключевые слова: мостовые конструкции; прогрессирующее обрушение; вантовые мосты; условия нагрузки; потеря кабеля.

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

Для цитирования: Ахмед Рамадан Ахмед, Ермошин Н. А. Статический анализ несущих тросов в условиях изменяющейся прочности хорды при проверке повреждения троса на вантовых мостах // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №3. С. 100-118. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-100-118>.

Поступила в редакцию 20.05.2024

Подписана в печать 25.07.2024

Опубликована 30.06.2024

Introduction

In cable-stayed bridges, major structural elements like towers, piers, or cables may be harmed or fail by severe loads, which might result in the collapse of the entire bridge. One of the more worrying failure types that might emerge from an unplanned cable loss in this kind of bridge is zipper-type collapse, commonly referred to as horizontal progressive collapse. Therefore, the recommendation made by PTI (2007) is that comparable static tests be used in conjunction with dynamic amplification factor (DAF) to thoroughly ex-

amine the effects of different cable loss situations. Existing standards and guidelines specify the common DAF value for building and bridge structures as $DAF = 2.0$; however, for cable-stayed bridges with considerable degrees of redundancy, the use of a constant $DAF = 2.0$ in conjunction with comparable static analysis has been questioned. One of the key objectives of this research is to investigate the abrupt loss of cables in cable-stayed and suspension bridges, which has lately attracted researchers' curiosity [1,2].

Methods

Cable failures in cable-stayed bridge mathematical models

Figure 1 shows the mathematical structure. The conceptual model is built on a continuous beam that is suspended by tension elements, such as cables. By comparing the stiffness and flexibility matrices of the damaged and undamaged systems, he intends to compute strength. Using its simplified form, the stiffness matrix of an undamaged system is computed. Next, the

owered stiffness matrix is flipped to produce the flexibility matrix. Iterations are made to the conceptual model. The stiffness matrix is therefore infinite [3].

The intact state is achieved by using the reduced form of the stiffness matrix, which is given by specifying the parameter η as the system stiffness ratio ($\eta = \frac{k_{cable}}{k_{beam}}$), for direct analytical computations [4].

$$\underline{\underline{F}} = \underline{\underline{K}}^{vv, red} * \underline{\underline{V}}. \quad (1)$$

$$\underline{\underline{F}} = (\dots, F_{i-2}, F_{i-1}, F_i, F_{i+1}, F_{i+2}, \dots). \quad (2)$$

$$\underline{\underline{V}} = (\dots, V_{i-2}, V_{i-1}, V_i, V_{i+1}, V_{i+2}, \dots). \quad (3)$$

$$\underline{\underline{K}}^{vv, red} = 3\sqrt{3}k_b \begin{pmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & \frac{k_2}{3\sqrt{3}} & \frac{k_1}{3\sqrt{3}} & \frac{k_2}{3\sqrt{3}} & \varepsilon^2 & (-\varepsilon)^3 & \dots \\ \dots & \varepsilon^2 & \frac{k_2}{3\sqrt{3}} & \frac{k_1}{3\sqrt{3}} & \frac{k_2}{3\sqrt{3}} & \varepsilon^2 & \dots \\ \dots & (-\varepsilon)^3 & \varepsilon^2 & \frac{k_2}{3\sqrt{3}} & \frac{k_1}{3\sqrt{3}} & \frac{k_2}{3\sqrt{3}} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix}, \quad (4)$$

where $\varepsilon = \sqrt{3}-2$; $k_1 = \eta - 4 + 3\sqrt{3}$; and $k_2 = \frac{1}{2}(19 - 12\sqrt{3})$.

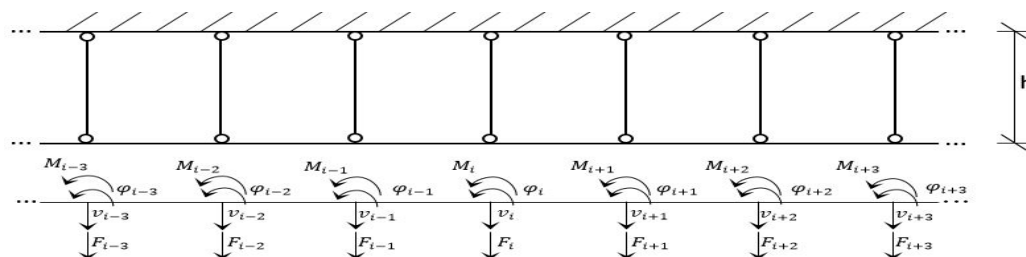


Fig. 1. Mechanism of Parallel Loading [3]

Conceptual model

A theoretical paradigm for long-span cable-supported bridges is the parallel load system. Examining the long span cable stayed bridges' structural resilience in the case of a cable failure is the aim of this research. The conceptual model is based on

a beam that is suspended by cables, or tension components. By using load-bearing components of a similar sort and function, structures can be built using parallel load-bearing methods. One of these systems' unique features is its ability to offer additional load paths. Suspension and cable-stayed bridges are prime examples of this

type of structural arrangement. Weights are supported by parallel sections called hooks and anchor cables in suspension and cable-stayed bridges [5].

On sometimes, torsion can be disregarded. When it comes to single-cable flat systems reinforced by box girders or double-cable cables flat equipment including edge girders, torsion has no impact. This work does not address torsion. Although the simplified model was first developed for a suspended bridge, it may be used for any paralleled load-bearing structure, including cable-stayed bridges. Every cable is thought to have the same axial durability, and the girder stiffness is the same in every cross-section. A true bridge's whole construction must be taken into account when calculating the cable's axial tension. The goal is to provide a general formula for the increase in stress related to a critical component as a result of cable failure. As a result, the quantity of cables may differ. First, an equation for the stress increase ratio of the critical cable is built assuming that there is only one failure of the cables. There are an increasing number of defective cables in the next phase. Finally, if cables break, an equation for a system with $(2n)$ cables is established. The length

L is the distance between two successive wires in the simplified form. The cable has an axial stiffness of K . $K_b = 12EI/L^3$ is the supporting structure's bending stiffness. The whole system is symmetrical, with the broken cable located in the center. The load sustained by the failed cable is F ; the absorption force in the critical cable as a result of a cable break is F_1 ; and the corresponding absorbed load for the other cables on both sides of the site of failure is $F_2 - F_n$. The larger forces in the cables, and hence the anticipated bending moment in the girder, are generated by cable breaking [6, 7, 8].

Adapting the approximation function to provide a conceptual model with more specific details

All cables are considered to have the same axial stiffness. But in real buildings, this assumption is not correct. For instance, every cable in cable-stayed bridges has a distinct axial stiffness due to its particular length. This section makes the assumption that the axial stiffness of each cable is distinct in order to get the conceptual model one step closer to reality. The schematic representation of the model under study is shown in form 2 [5, 6].

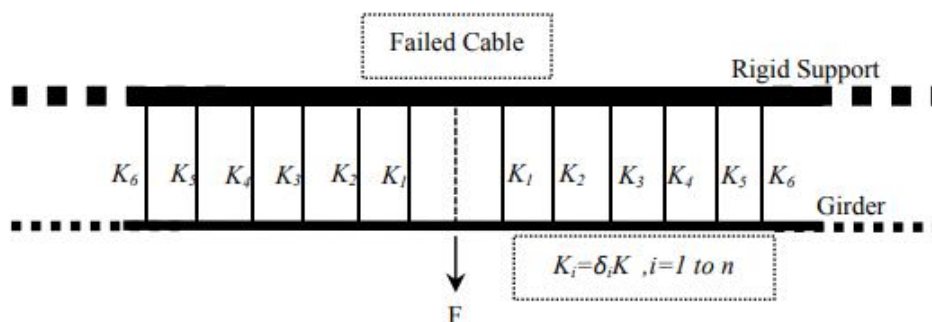


Fig. 2. Schematic representation of an elaborate model [5]

The new conceptual model takes each cable's individual axial stiffness into account, as seen in Fig. 2. In order to facilitate understanding of the mathematical process, a reference axial stiffness (K) is utilized, and the cables' stiffness is represented as a multiple of the reference stiffness ($K_i = \delta_i K$). There is just one hypothetical cable failure, and the model maintains its symmetry.

A methodical approach is used to solve this system of equations, number five. Assumptions about the stiffness of each cable

are made in the first stage ($K_1 = K_2 = \dots = KN$ or $\delta_1 = \delta_2 = \dots = \delta_n = 1$). The set of linear equations for the several cable systems is then solved, and the approximation function's unknown parameters are determined. The crucial cable's rigidity is adjusted in the second phase. As a result, all of the cables in this phase are equally stiff, with the exception of the essential cable ($\delta_2 = \delta_3 = \dots = \delta_n = 1$). Ultimately, all cables have their stiffness adjusted in the last stage. As a result, the axial stiffness of each cable is different [5, 6].

$$\left\{ \begin{array}{l} F_n + F_{n-1} + F_{n-2} + \dots + F_1 = \frac{F}{2} \\ F_n \left(6 + \frac{6\beta}{\delta_n} \right) + F_{n-1} \left(1 - \frac{12\beta}{\delta_{n-1}} \right) + F_{n-2} \left(\frac{6\beta}{\delta_{n-2}} \right) = 0 \\ F_n(12) + F_{n-1} \left(6 + \frac{6\beta}{\delta_{n-1}} \right) + F_{n-2} \left(1 - \frac{12\beta}{\delta_{n-2}} \right) + F_{n-3} \left(\frac{6\beta}{\delta_{n-3}} \right) = 0 \\ F_n(18) + F_{n-1}(12) + F_{n-2} \left(6 + \frac{6\beta}{\delta_{n-2}} \right) + F_{n-3} \left(1 - \frac{12\beta}{\delta_{n-3}} \right) + F_{n-4} \left(\frac{6\beta}{\delta_{n-4}} \right) = 0 \\ F_n(24) + F_{n-1}(18) + F_{n-2}(12) + F_{n-3} \left(6 + \frac{6\beta}{\delta_{n-3}} \right) + F_{n-4} \left(1 - \frac{12\beta}{\delta_{n-4}} \right) + F_{n-5} \left(\frac{6\beta}{\delta_{n-5}} \right) = 0 \\ \vdots \\ F_n(6n-12) + F_{n-1}(6(n-1)-12) + \dots + F_3 \left(6 + \frac{6\beta}{\delta_3} \right) + F_2 \left(1 - \frac{12\beta}{\delta_2} \right) + F_1 \left(\frac{6\beta}{\delta_1} \right) = 0 \\ F_n(9n-7) + F_{n-1}(9(n-1)-7) + \dots + F_2 \left(11 + \frac{6\beta}{\delta_2} \right) + F_1 \left(3 - \frac{6\beta}{\delta_1} \right) = 0. \end{array} \right. \quad (5)$$

Based on the previous stages' results and the definitions of each approximation function parameter, the following conclusions can be drawn:

1. The parameter a represents the lowest coefficient of stress increase that happens when $\beta = \infty$, the girder is rigid, and all cables have the same displacement. As a result, it is simple to compute the parameter as follows:

$$a = \frac{K_I}{2 \sum_{i=1}^n K_i} = \frac{\delta_1}{2 \sum_{i=1}^n \delta_i}, K_i = \delta_i K. \quad (6)$$

2. The highest voltage rise factor that happens when $\beta = 0$ is indicated by parameter b . The sole useful parameter for parameter b is thus the quantity of broken wires. It has been demonstrated that parameter b is 0.75 in the event of a single cable failure.

3. Parameter c has a growing value equal to δ_1 and is solely dependent on the crucial cable's axial stiffness.

4. A variety of systems have been studied, and the results indicate that the stiffness and quantity of cables have the most effects on parameter d . The effect of cable stiffness is negligible, though. Therefore, the effect of cable stiffness on parameter d value is disregarded in order to minimize the complexity of the approximation function.

With the aforementioned information in mind, the approximation function may be found as follows [5]:

$$\frac{F_1}{F} = a + \frac{\frac{3}{4} - a}{1 + \left(\frac{\beta}{c}\right)^d} \quad (7)$$

For large values of n :

$$\frac{F_1}{F} = \frac{\frac{3}{4}}{1 + \left(\frac{\beta}{\delta_1}\right)^{0.35}}, \quad (8)$$

where equation (9). should be used to find the value d .

$$d = 0.35 + \frac{0.65}{1 + \left(\frac{2n}{5}\right)^{1.1}} \quad 2n \geq 12. \quad (9)$$

Three distinct systems, each with two alternative cable configurations, were investigated in order to confirm the correctness of the approximation function that was given (see Fig. 3).

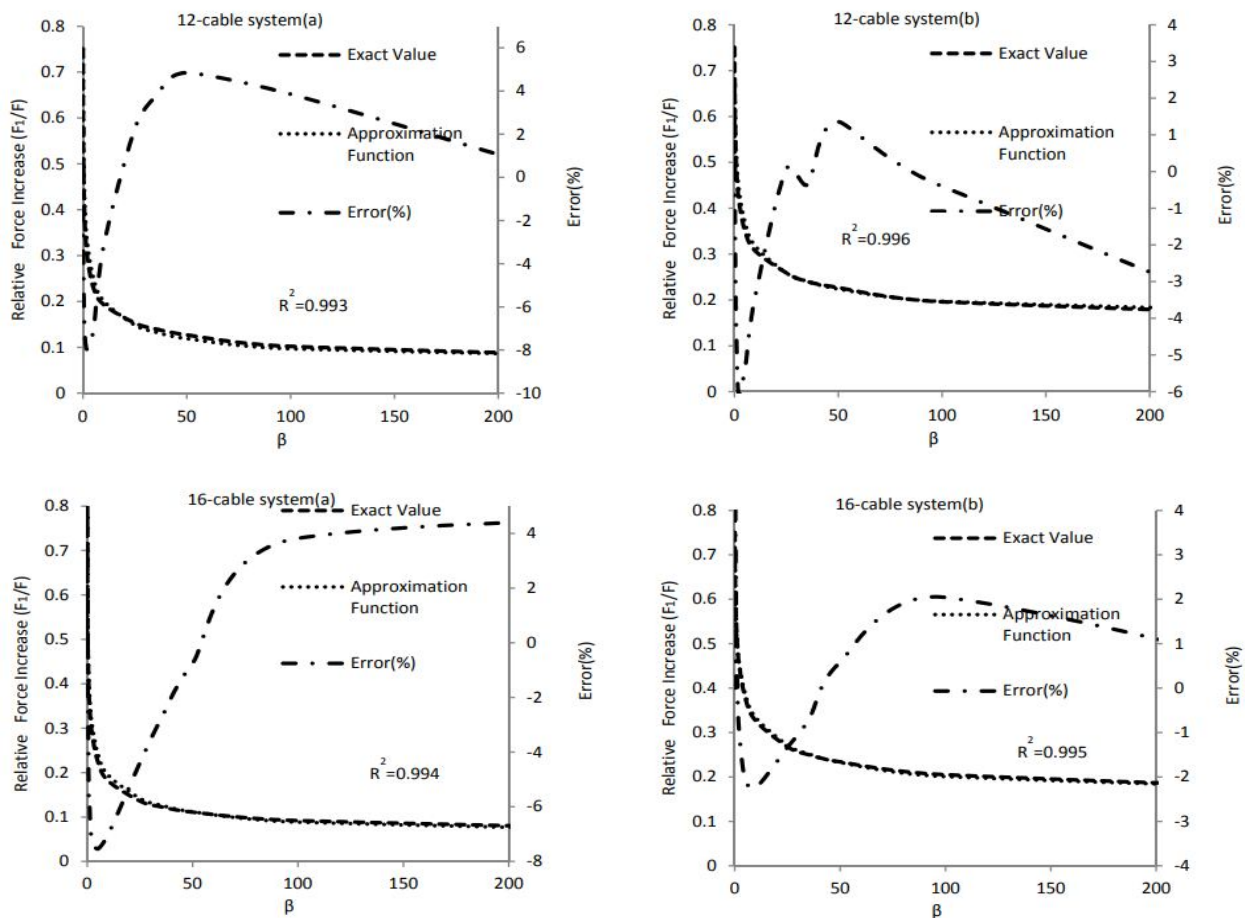


Fig. 3. The percentage of stress increase in different systems is shown through exact and estimated values

An Analytic Approach for Estimating the Stresses Increase Rate in an Important Cable Resulting from Cable Loss

When load-bearing components of similar sort and function are included into structural systems, it creates alternative load paths known as paralleled load-bearing structures. Bridges supported by cables are a prime illustration of this type of structural system. In the event that a cable or other parallel bearing element breaks, the weight it carries must be transferred to the rest of the structure. In this circumstance, the member next to the failing member bears the majority of the reallocated load and becomes the crucial member. If this component cannot sustain the redistributed weight, the collapse

may spread to other members or possibly the entire building. Hence, considering the crucial significance of the key component in the durability of the bone structure, our study concentrates on it (cables)¹.

The connection between the durability of chord F and the total length of chord c is the most important deformative characteristic in cable-stayed bridges with axial stress (Fig. 5). The dead load for the cable is equally spread around the curve. The examination of the Russky bridge (Fig. 4) will start with a catenary design rather than a parabola arrangement using a horizontal stay cable, as indicated in Fig. 6. Here, two circumstances defined by chord pressures F1 and F2 are considered [9, 10].

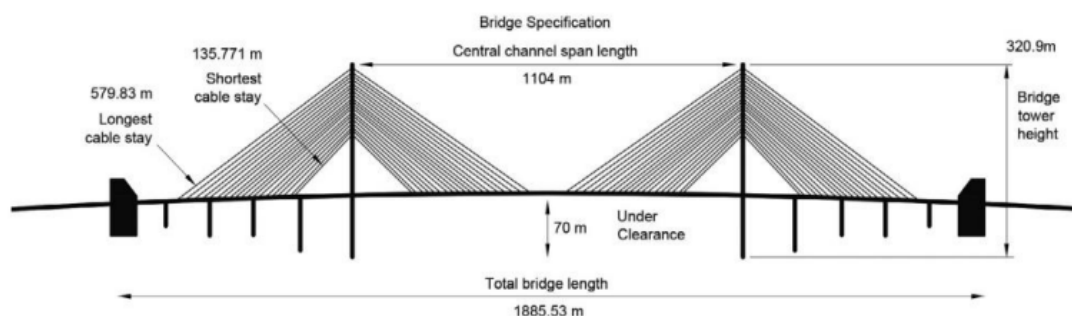


Fig. 4. Shows the bridge's primary dimensions and the positioning of important sections [7, 10]

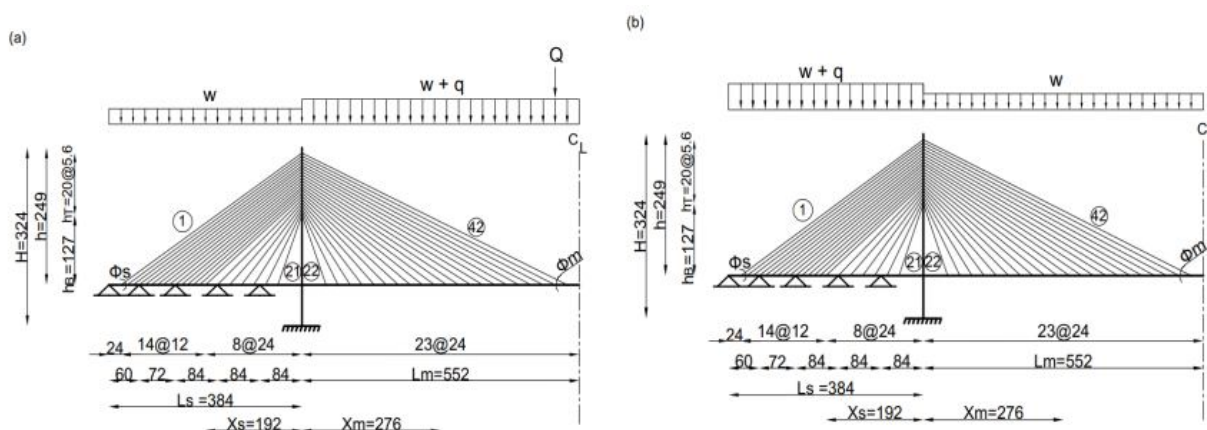


Fig. 5. Shows the stay cable's chord length (c) and chord force (F).

¹ Aoki Y. Analysis of the performance of cable-stayed bridges under extreme events (Doctoral dissertation), 2014.

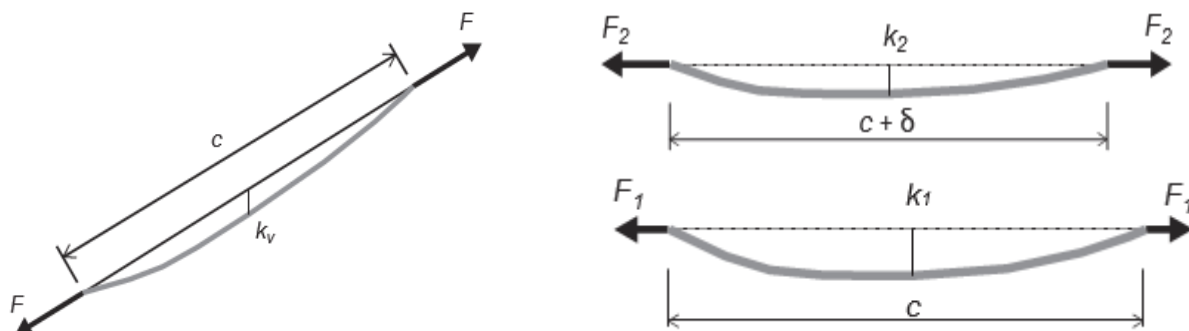


Fig. 6. A horizontal stay cable requires two requirements with F_1 and F_2 chord forces, respectively [9]

In case 1, the equation for the catenary is given by [9, 11]:

$$y_1 = \frac{F_1}{w_{cb} \cos \phi} \left[\cosh \left(\frac{w_{cb} \cos \phi}{F_1} \left(x - \frac{1}{2} c \right) \right) - \cosh \left(\frac{w_{cb} \cos \phi c}{2 F_1} \right) \right] \quad (10)$$

and in case 2:

$$y_2 = \frac{F_2}{w_{cb} \cos \phi} \left\{ \cosh \left[\frac{w_{cb} \cos \phi}{F_2} \left(x - \frac{c + \delta}{2} \right) \right] - \cosh \left(\frac{w_{cb} \cos \phi (c + \delta)}{2 F_2} \right) \right\}. \quad (11)$$

Where w_{cb} is the dead load of the cable per unit length $w_{cb} = A_{cb} \gamma_{cb}$ and δ is the elongation of the cable, which is defined as the increase in the distance between the points of support, F is the force of the chord and c is the length of the chord.

Table 1 is parabolic approximation of the values for the correct cable curve in the Russky bridge (y_1, y_2) is a catenary and is utilized in most circumstances without causing an undesirable mistake.

Table 1. Correct cable curve values (y_1, y_2) for cables in the Russky bridge

NO	y_1	y_2	NO	y_1	y_2	NO	y_1	y_2
1	1.53437	1.16203	15	0.61924	0.45863	29	0.69597	0.51769
2	1.45742	1.10207	16	0.54044	0.3986	30	0.77222	0.57699
3	1.38247	1.0438	17	0.45909	0.33727	31	0.84785	0.63641
4	1.30954	0.98722	18	0.37498	0.27446	32	0.92369	0.6966
5	1.23861	0.93231	19	0.28776	0.20992	33	0.99865	0.75669
6	1.16967	0.87906	20	0.19729	0.14349	34	1.07562	0.81897
7	1.10139	0.82644	21	0.10859	0.07878	35	1.15254	0.88181
8	1.03522	0.77556	22	0.10859	0.07878	36	1.2293	0.94507
9	0.96992	0.72546	23	0.19729	0.14349	37	1.30791	1.01044
10	0.90798	0.67805	24	0.28776	0.20992	38	1.38835	1.07796
11	0.847	0.63149	25	0.37498	0.27446	39	1.46843	1.1457
12	0.78714	0.58589	26	0.45909	0.33727	40	1.55025	1.21551
13	0.72953	0.54212	27	0.54044	0.3986	41	1.63268	1.28638
14	0.67323	0.49945	28	0.61924	0.45863	42	1.71676	1.35929

Table 2 shows the horizontal distance between the pylon and the cable (a) and the length of inclined cable (c) in the Russky bridge [12].

Table 2. Distance (a) and cable length (c)

NO	a	c	NO	a	c	NO	a	c
1	360	432.11	15	192	250.31	29	216	272.54
2	348	419.02	16	168	228.58	30	240	295.15
3	336	405.94	17	144	207.5	31	264	318.07
4	324	392.87	18	120	187.29	32	288	341.22
5	312	379.82	19	96	168.27	33	312	364.57
6	300	366.77	20	72	150.89	34	336	388.08
7	288	353.74	21	48	135.77	35	360	411.73
8	276	340.73	22	48	135.77	36	384	435.48
9	264	327.73	23	72	150.89	37	408	459.33
10	252	314.76	24	96	168.27	38	432	483.26
11	240	301.81	25	120	187.29	39	456	507.26
12	228	288.89	26	144	207.5	40	480	531.31
13	216	275.99	27	168	228.58	41	504	555.42
14	204	263.13	28	192	250.31	42	528	579.57

Total elongations from the non-stressed state

The lengths of the cables l_1 determined by [10,11]:

$$l_1 = 2 \frac{F_1}{w_{cb} \cos \phi} \sinh \left(\frac{w_{cb} \cos \phi c}{2F_1} \right) \quad (12)$$

and l_2 determined by:

$$l_2 = 2 \frac{F_2}{w_{cb} \cos \phi} \sinh \left(\frac{w_{cb} \cos \phi (c + \delta)}{2F_2} \right). \quad (13)$$

In Table 3, the lengths of the cables in the Russky bridge as a result of the force of the chord, taking into account the dead loads.

Δl_1 and Δl_2 , the total elongations from the non-stressed state, is calculated using [13]:

$$\Delta l_1 = \frac{F_1^2}{2EA w_{cb} \cos \phi} \times \left[\sinh \left(\frac{w_{cb} \cos \phi c}{F_1} \right) + \frac{w_{cb} \cos \phi}{F_1} \right]; \quad (14)$$

$$\Delta l_2 = \frac{F_2^2}{2EA w_{cb} \cos \phi} \times \left[\sinh \left(\frac{w_{cb} \cos \phi c}{F_2} \right) + \frac{w_{cb} \cos \phi}{F_2} \right]. \quad (15)$$

Table 4 shows the value of the total elongations from the unstressed condition of the cables used in the Russky bridge.

The graph shows (7) the cable lengths in the Russky bridge as a result of the force of the chord and total elongation from the case of unstressed cables used in the Russky bridge, that the cable steels do not have a plastic plateau and that the elongation at rupture is much less than that of typical structural steel.

Table 3. Lengths of the cables in the Russky bridge

NO	l_1	l_2	NO	l_1	l_2	NO	l_1	l_2
1	432.16	433.82	15	250.32	251.29	29	272.55	273.61
2	419.06	420.68	16	228.59	229.48	30	295.17	296.31
3	405.98	407.55	17	207.5	208.31	31	318.09	319.32
4	392.91	394.42	18	187.29	188.02	32	341.25	342.57
5	379.85	381.31	19	168.27	168.93	33	364.6	366.01
6	366.8	368.22	20	150.89	151.48	34	388.12	389.62
7	353.77	355.14	21	135.77	136.3	35	411.77	413.36
8	340.75	342.07	22	135.77	136.3	36	435.54	437.21
9	327.75	329.02	23	150.89	151.48	37	459.39	461.16
10	314.78	316	24	168.27	168.93	38	483.33	485.19
11	301.82	303	25	187.29	188.02	39	507.34	509.28
12	288.9	290.02	26	207.5	208.31	40	531.41	533.44
13	276	277.07	27	228.59	229.48	41	555.53	557.65
14	263.14	264.16	28	250.32	251.29	42	579.7	581.91

Table 4. Total elongation of cables in Russky bridge

NO	Δl_1	Δl_2	NO	Δl_1	Δl_2	NO	Δl_1	Δl_2
1	0.62569	1.68649	15	0.35724	0.97686	29	0.38975	1.06362
2	0.60605	1.63539	16	0.32563	0.89204	30	0.42302	1.15188
3	0.58647	1.58433	17	0.29513	0.80977	31	0.45694	1.24132
4	0.56697	1.53331	18	0.26604	0.73091	32	0.49144	1.3317
5	0.54753	1.48234	19	0.23878	0.65667	33	0.52643	1.42285
6	0.52817	1.43142	20	0.21396	0.58883	34	0.56194	1.51463
7	0.50886	1.38056	21	0.19245	0.52983	35	0.59787	1.60694
8	0.48962	1.32977	22	0.19245	0.52983	36	0.63417	1.69967
9	0.47045	1.27904	23	0.21396	0.58883	37	0.6709	1.79279
10	0.45137	1.2284	24	0.23878	0.65667	38	0.70808	1.88621
11	0.43237	1.17786	25	0.26604	0.73091	39	0.74553	1.97991
12	0.41344	1.12741	26	0.29513	0.80977	40	0.78339	2.07385
13	0.39461	1.07709	27	0.32563	0.89204	41	0.82154	2.168
14	0.37588	1.0269	28	0.35724	0.97686	42	0.86009	2.26233

Because it is not acceptable to have permanent (irreversible) elongation of the wires for loads that will occur with a large number of repetitions throughout the bridge's

lifetime, the available plastic strains (characterized by a minimum elongation at rupture of 4% in a gauge length of 250 mm) are generally sufficient to allow a local redistri-

bution of forces between wires with different initial stresses due to imperfections during erection [14, 15].

The equation of case $l_2 - l_1 = \Delta l_2 - \Delta l_1$ of the cable leads to δ [9, 16]:

$$\delta = \frac{\frac{(F_2 - F_1)c}{2EA} + \frac{1}{2EA w_{cb} \cos \phi} \left[F_2^2 \sinh \left(\frac{w_{cb} \cos \phi c}{F_2} \right) - F_1^2 \sinh \left(\frac{w_{cb} \cos \phi c}{F_1} \right) \right]}{\cosh \left(\frac{w_{cb} \cos \phi c}{2F_2} \right)} + \frac{2}{w_{cb} \cos \phi} \frac{\left[F_1 \sinh \left(\frac{w_{cb} \cos \phi c}{2F_1} \right) - F_2 \sinh \left(\frac{w_{cb} \cos \phi c}{2F_2} \right) \right]}{\cosh \left(\frac{w_{cb} \cos \phi c}{2F_2} \right)}. \quad (16)$$

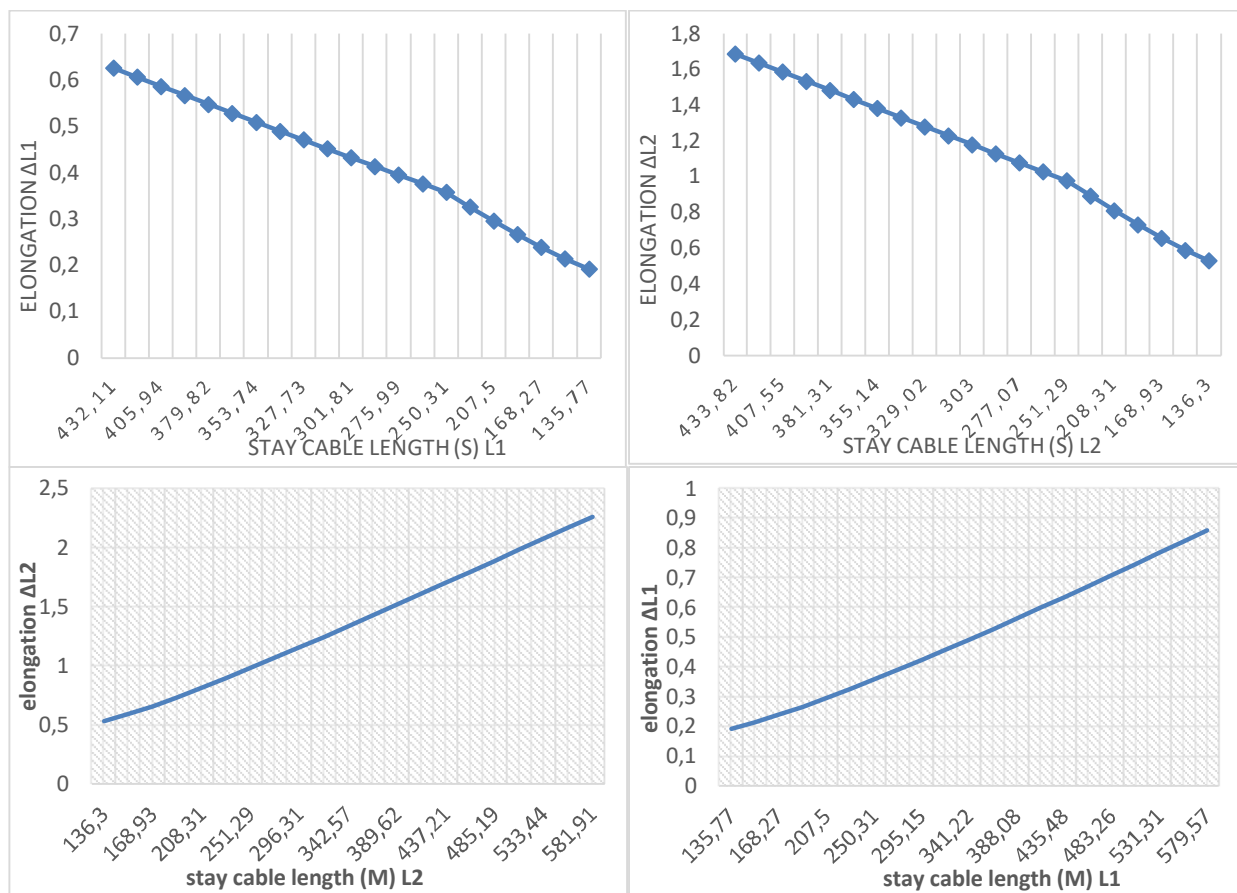


Fig. 7. Shows the lengths of the cables in the Russky Bridge

For an inclined stay cable, the transverse load which results in the sag has an intensity of $w_{cb} \cos \phi$, as indicated in Fig. 8. The deformational characteristics of an inclined cable will be very close to those of

a horizontal cable with the same chord length c , but subject to a dead vertical load $w_{cb} \cos \phi$.

Introducing $F_1 = A\sigma_1$, $F_2 = A\sigma_2$, $w_{cb} = A_{cb}\gamma_{cb}$ leads to [9, 17]:

$$\frac{\delta}{c} = \frac{(\sigma_2 - \sigma_1)\gamma_{cb} \cos \phi + \frac{1}{c} \left[\sigma_2^2 \sinh \left(\gamma_{cb} \cos \phi \frac{c}{\sigma_2} \right) - \sigma_1^2 \sinh \left(\gamma_{cb} \cos \phi \frac{c}{\sigma_1} \right) \right] + 4 \frac{E}{c} \left[\sigma_1 \sinh \left(\gamma_{cb} \cos \phi \frac{c}{2\sigma_1} \right) - \sigma_2 \sinh \left(\gamma_{cb} \cos \phi \frac{c}{2\sigma_2} \right) \right]}{2E\gamma_{cb} \cos \phi \cosh \left(\frac{\gamma_{cb} \cos \phi c}{2\sigma_2} \right)}, \quad (17)$$

where A_{cb} is the cross-sectional area of the stay cable, γ_{cb} the density of the cable material (weight per unit volume), σ_1 is the cable

stress in case 1, σ_2 is the cable stress in case 2 and E modulus of elasticity.

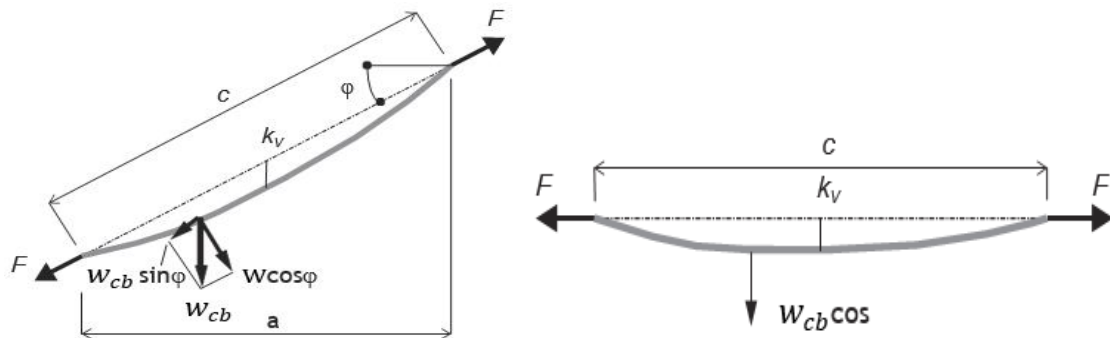


Fig. 8. An inclined stay cable and a parabolic horizontal stay cable with equal deformational characteristics [9, 18]

According to Equation 17, Table 5 expresses the elongation based on the correct configuration and the exact catenary-based solution. But the solution is approximate, depends on the parabola-based solution and will be easier to use.

For large values of σ_2 , it is the stress-strain relationship of a straight rod of the same unstressed length as the cable. Given that sag is inversely proportional to cable

stress, it is well understood that, for large values of σ_2 , the sag effect will ultimately wear off and the cable behaves more and more like a straight rod [19].

The sag k_c perpendicular to the chord for an inclined stay cable (Figure 9), is given by [9, 11]:

$$k_c = \frac{g_{cb} c^2 \cos \phi}{8T} = \frac{\gamma_{cb} c^2}{8\sigma} \cos \phi. \quad (18)$$

Table 5. Elongation of cables in Russky bridge based on correct configuration

NO	δ	δ/c	NO	δ	δ/c	NO	δ	δ/c
1	0.459437	0.001063	15	0.269006	0.001075	29	0.292123	0.001072
2	0.445689	0.001064	16	0.246285	0.001077	30	0.315519	0.001069
3	0.431965	0.001064	17	0.224129	0.00108	31	0.339105	0.001066
4	0.418264	0.001065	18	0.202784	0.001083	32	0.362813	0.001063
5	0.404585	0.001065	19	0.182601	0.001085	33	0.386627	0.00106
6	0.390928	0.001066	20	0.164064	0.001087	34	0.41044	0.001058
7	0.377297	0.001067	21	0.147881	0.001089	35	0.434288	0.001055
8	0.363685	0.001067	22	0.147881	0.001089	36	0.458197	0.001052
9	0.350095	0.001068	23	0.164064	0.001087	37	0.48203	0.001049
10	0.336523	0.001069	24	0.182601	0.001085	38	0.505732	0.001047
11	0.322974	0.00107	25	0.202784	0.001083	39	0.529529	0.001044
12	0.309445	0.001071	26	0.224129	0.00108	40	0.553187	0.001041
13	0.295939	0.001072	27	0.246285	0.001077	41	0.576865	0.001039
14	0.282458	0.001073	28	0.269006	0.001075	42	0.600374	0.001036

The relative sag k/c appears to be proportional to the cable length c with a proportionality factor: $\gamma_{cb}/8\sigma$ vertical sag k_v :

$$k_v = \frac{k_c}{\cos \phi} = \frac{\gamma_{cb} c^2}{8\sigma}. \quad (19)$$

Note that the vertical sag k_v is unaffected by the stay cable's inclination.

In the dead load state, the factor $\gamma_{cb}/8\sigma$ typically has a value of approximately 25×10^{-6} , resulting in a relative sag k/c of less than 1/100 for cable lengths up to 400 m. As a result, a stay cable's relative sag is less than one-tenth of that of cable stay

bridge main cables. This is demonstrated in Table 6 values of sag k_c perpendicular to the chord and vertical sag k_v of cables used on the Russky bridge.

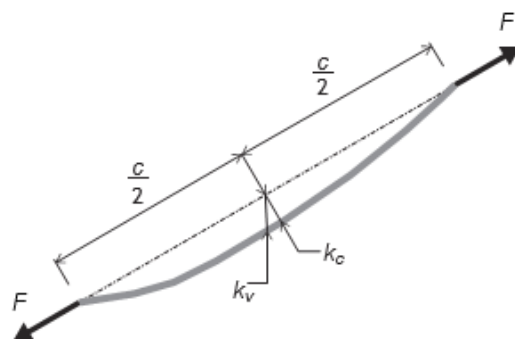


Fig. 9. Sag of stay cable measured perpendicular to the chord (k_c) and perpendicular (k_v) [9, 15]

Table 6. k_c , k_v for cables used in Russky Bridge

NO	k_c	k_v	NO	k_c	k_v	NO	k_c	k_v
1	2.0417	2.4507	15	0.6311	0.8224	29	0.7726	0.9749
2	1.9131	2.3045	16	0.5042	0.6858	30	0.9299	1.1434
3	1.7892	2.1629	17	0.392	0.5651	31	1.1023	1.3278
4	1.6699	2.0258	18	0.2949	0.4604	32	1.2905	1.5282
5	1.5551	1.8934	19	0.2122	0.3716	33	1.4924	1.7445
6	1.4448	1.7656	20	0.1427	0.2988	34	1.7122	1.9768
7	1.3374	1.6424	21	0.0857	0.2419	35	1.9463	2.225
8	1.2346	1.5238	22	0.0857	0.2419	36	2.1939	2.4891
9	1.135	1.4098	23	0.1427	0.2988	37	2.4588	2.7692
10	1.0415	1.3003	24	0.2122	0.3716	38	2.7411	3.0652
11	0.9513	1.1955	25	0.2949	0.4604	39	3.0357	3.3772
12	0.8645	1.0953	26	0.392	0.5651	40	3.3473	3.7051
13	0.7826	0.9997	27	0.5042	0.6858	41	3.673	4.049
14	0.7044	0.9088	28	0.6311	0.8224	42	4.0154	4.4088

Results and Discussion

The danger of slow collapse due to cable loss scenarios in bridges with cable supports has to be thoroughly investigated. There are two main approaches to stopping a slow collapse. First, use structural or non-structural measures to ensure a higher level of safety against localized collapse. Second, provide a solid structure that permits local

failure in order to stop failures from spreading. The weight carried by each parallel force-bearing cable must be transmitted to the remaining structure in the event that it fails. The member who is next to the failing member in this scenario becomes the key member and receives the majority of the transferred load. The collapse will likely affect other components of the structure as

well as this one if it is unable to support the weight that has been shifted. As a result, because the crucial component plays such an important role in the structural system's resilience, our study focuses primarily on this member.

The effect of variable sag under different loading conditions indicates that there is no linear relationship between force and deformation, but a linearization may be achieved by adding a secant modulus of elasticity, E_{sec} , defined by:

$$E_{\text{sec}} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\delta} c. \quad (20)$$

Substituting the value of δ/c , the following expression for E_{sec} is derived:

$$\frac{1}{E_{\text{sec}}} = \frac{1}{E} + \frac{\gamma_{\text{cb}}^2 a^2}{24} \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{\sigma_1^2 \sigma_2^2} \right). \quad (21)$$

The secant modulus might be substituted by a tangent modulus E_{tan} obtained from (21) with $\sigma_2 = \sigma_1$ for cable-stayed bridges with low traffic-to-dead load ratios:

$$\frac{1}{E_{\text{tan}}} = \frac{1}{E} + \frac{\gamma_{\text{cb}}^2 a^2}{12\sigma_1^3}. \quad (22)$$

The secant modulus appears to give a very good approximation as the error remains less than 1% for cable lengths up to 300 m and less than 2% for cable lengths up to 750 m.

And because the smallest cable in the Russky bridge is 135.77 meters long and the longest cable is 579.57 meters, as a result, the error rate of cables in the Russky bridge will remain for some cables less than 1% and for some cables less than 2%. Considering that the cable steel material's modulus of elasticity is rarely known with greater than 2-3% precision, the secant modulus approach would be appropriate in all realistic cases. Since just the cable stress in the starting condition has to be known, the tangent modulus is frequently simpler to use than the secant modulus. However, as Figure 10, 11 illustrates, the tangent modulus may yield inaccurate results for high cable lengths and significant traffic-to-dead load ratios.

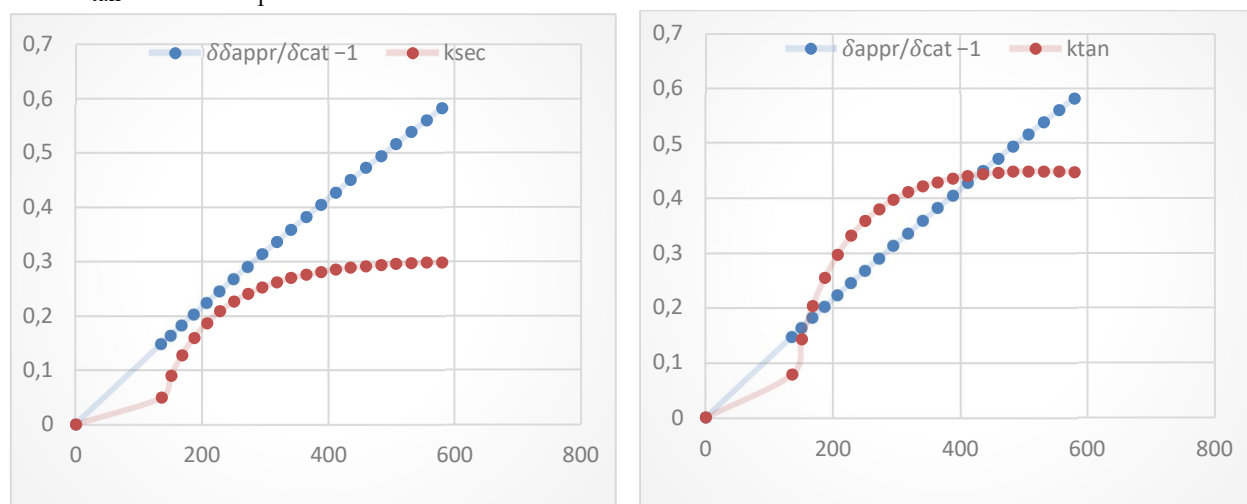


Fig. 10. Indicated the effect of using an equivalent modulus of elasticity based on the parabolic approximation rather than the correct catenary solution for cables. Looking at the results in Table (7), the maximum stress ratio for cables is 0.75, and accordingly, the stress ratio for cables K will be considered 0.8 and 0.5, respectively. The error is defined as $\delta_{\text{appr}}/\delta_{\text{cat}}$, where $\delta_{\text{appr}} = (\sigma_2 - \sigma_1)c/E_{\text{eq}}$ for a horizontal cable with varying length

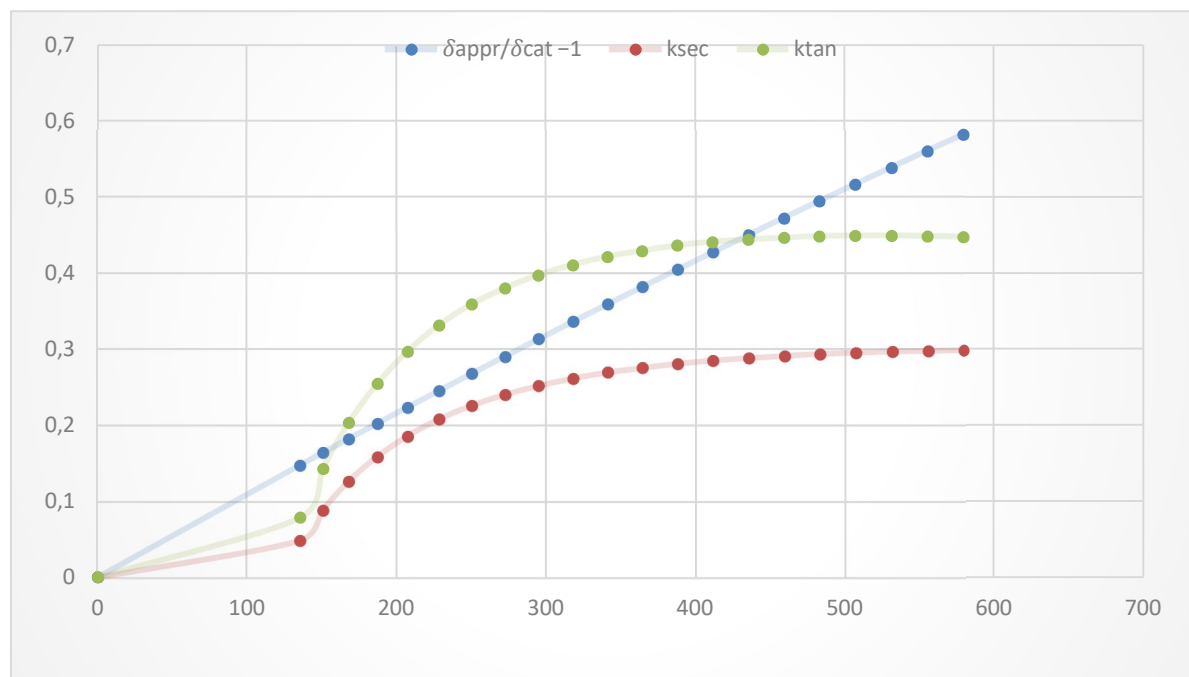


Fig. 11. $(\delta_{appr}/\delta_{cat} - 1)$ shows an error by applying the tangent modulus or secant modulus of the stay cables in the Russky bridge with the following Parameters: $E = 205\text{GN/m}^2$, $\gamma_{cb} = 0.08\text{MN/m}^3$ (including corrosion protection), $\sigma_2 = 720\text{MN/m}^2$, $\kappa = 0.5$ and 0.8 , respectively

The structural details for every system are displayed in Table 7. The findings further demonstrate that the accuracy of the final approximation function is little affected when the impact of cable stiffness (S) on the d parameter is disregarded. The rounding error is smaller than 5%, with the exception

of tiny values of β . All systems' computed R-square values are higher than 0.970, which is acceptable. The matching system of linear equations must be solved in order to determine the precise values for systems with 12 and 16 wires. As a result, the analytical method was looked at once again.

Table 7. The structural details for every system are displayed

Stiffness of the Cables	12 cable system (a)	12 cable system (b)	16 cable system (a)	16 cable system (a)
S_1	S	$3S$	S	$4.5S$
S_2	$1.4S$	$2.6S$	$1.5S$	$4S$
S_3	$1.8S$	$2.2S$	$2S$	$3.5S$
S_4	$2.2S$	$1.8S$	$2.5S$	$3S$
S_5	$2.6S$	$1.4S$	$3S$	$2.5S$
S_6	$3S$	S	$3.5S$	$2S$
S_7			$4S$	$1.5S$
S_8			$4.5S$	S

Conclusions

The space between two neighboring cables in modern bridges is significantly less than in older bridges. As a result, in the case of a vehicle accident or an explosion on a new bridge, several cables are going to fail. As a result, it was suggested that bridge designers consider the bursting of all cables inside 10 meters. Several investigations have been done to find DAF in bridges. According to this research, having a DAF of two is not always safe. Although a recent study shows that the suggested DAF is secure for cable design, which is it is not safe for pylon or girder designs with negative moments.

DAF = 2.0 is a popular DAF measurement for buildings and bridge structures that is accepted by current standards and guidelines (PTI, 2007); however, the consistency of DAF = 2.0 has been questioned for bridges that are cable-stayed with considerable degrees of redundancy. When used with a comparable static evaluation, the comparable static evaluation with DAF = 2.0 is occasionally conservative in measuring bending moments inside an edifice following the absence of a single stay. As a result, it is strongly advised to conduct a comprehensive dynamic study to estimate the increasing collapse of bridges due to cable loss. Static linear evaluation using DAF is a frequent method in actual projects for solving the challenges listed

above. Precise calculation of DAF is critical when utilizing linear static analysis. abrupt wire loss A sudden loss of cable can cause a gradual "zipper-type" collapse, making it one of the most severe loading scenarios for a bridge with cable stays. Some of the subsequent conclusions may be derived. * The bridge's location has a significant impact on how it responds dynamically to an unexpected cable loss. Especially for multi-DOF constructions like cable-stayed bridges, dynamically amplifying factors (DAFs) can be more than two when fast forces are applied. Because of this, the DAF=2 building plan for this kind of bridge is not always cautious, and there's a chance that important sections will have lower load factors.

* Each section and reaction component (such as internal forces, deflection, etc.) requires a different DAF, and each DAF must accurately represent the impact of the technique and structure type.

* The stay arrangement, loading groups, deck stiffness, and damping ratio have an effect on DAFs in cable-stayed bridges.

* It is considered and highly suggested to do a fluid assessment of big structures that are prone to unexpected component failure, given the diversity of mathematical tools available for analyzing structures. This is because an easier comparable static evaluation strategy employing DAF = 2 can be unusual.

References

1. Rosignoli M.. Bridge construction equipment. In Innovative Bridge Design Handbook, 2016; 701-717. Butterworth-Heinemann.
2. Weber F., Distl H. Amplitude and frequency independent cable damping of Sutong Bridge and Russky Bridge by magnetorheological dampers. Structural Control and Health Monitoring, 2015; 22(2): 237-254.
3. Starossek U. Progressive Collapse and Bridge Dynamics. National Scientific Seminar on Dynamics and Progressive Collapse in Cable-Stayed Bridges. Hanoi, Vietnam, 2011.
4. Kempfski J. Steifigkeits- und Flexibilitätsmatrix eines unendlichen Systems. Project for master degree, Hamburg University of Technology, Hamburg, Germany, 2016.
5. Starossek U. Progressive collapse of structures. ICE Publishing, London, 2018.
6. Shoghijavan M. Progressive collapse in long-span cable-supported bridges. Technische Universität Hamburg, 2020.
7. Ahmed A. R., Yermoshin N. A. Optimum design of cable-stayed bridges considering cable loss scenarios. Asian Journal of Civil Engineering, 2023; 1-9.
8. Kaveh A., Zarandi M. M. M. Optimal design of steel-concrete composite I-girder bridges using three meta-heuristic algorithms. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 2019; 63(2): 317-337.
9. Gimsing N. J., Georgakis C. T. Cable supported bridges: Concept and design. John Wiley & Sons., 2011.
10. Ahmed A. R., Ermoshin N. Assessment of the Cable-Stayed and Cable Damping System Used in the Russky Bridge and Determination of the Force Acting on the Bridge's Cables. In International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry "Interagromash" (pp. 2719-2730). Cham: Springer International Publishing, 2022, May.
11. El Shenawy E. A. Form finding for cable-stayed and extradosed bridges. 2013. <https://d-nb.info/1030364877/34>.
12. Ahmed A. R., Ermoshin N. Method for investigating the reliability of structural elements of cable-stayed supports' anchorage: a case study of the Russky Bridge. Transportation Research Procedia, 2022; 63: 2887-2897.
13. Ha M. H., Vu Q. A., Truong V. H. (2018). Optimum design of stay cables of steel cable-stayed bridges using nonlinear inelastic analysis and genetic algorithm. In Structures. November 2018; 16: 288-302. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.10.007>.
14. Farkas J., Jármai K. Analysis and optimum design of metal structures. CRC Press, 2020
15. Ha Manh-Hung, Quoc-Anh Vu, Viet-Hung Truong. Optimum design of stay cables of steel cable-stayed bridges using nonlinear inelastic analysis and genetic algorithm. Structures, 16. 2018.

16. Wang G., Ye J. Localization and quantification of partial cable damage in the long-span cable-stayed bridge using the abnormal variation of temperature-induced girder deflection. *Structural Control and Health Monitoring*, 2019; 26(1): e2281.
17. Huang Y., Wang Y., Fu J., Liu A., Gao W. Measurement of the real-time deflection of cable-stayed bridge based on cable tension variations. *Measurement*, 2018; 119: 218-228. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.01.070>.
18. Wolff M., Starossek U. Cable loss and progressive collapse in cablestayed bridges. *Bridge Structures*, 2009; 5: 17-28.
19. Martins A. M., Simões L. M., Negrão J. H. Optimization of cable-stayed bridges: A literature survey. *Advances in Engineering Software*, 2020; 149: 102829.

Информация об авторах / Information about the Authors

Ахмед Ахмед Рамадан Ахмед, аспирант, ассистент преподавателя факультета гражданского строительства Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: engahmedramadan103@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9411-656X>

Ahmed Ramadan Ahmed Ahmed, Post-Graduate Student, Assistant at Civil Engineering Faculty, Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: engahmedramadan103@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9411-656X>

Ермошин Николай Алексеевич, доктор военных наук, профессор, профессор Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: ermonata@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0367-5375>

Nikolai A. Ermoshin, Dr. of Sci. (Military), Professor, Professor of Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: ermonata@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0367-5375>

Оригинальная статья / Original article

УДК 697.921.45

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-119-130>

Исследование аэродинамических параметров воздухораспределителей при взаимодействии круглых несоосных струй

О.Н. Зайцев ¹✉, Н.Е. Семичева ¹, А.П. Бурцев ¹, Е.О. Зайцева ²

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

² Белгородский государственный технический университет им. В.Г. Шухова
ул. Костюкова, д. 46, г. Белгород 308012, Российская Федерация

✉ e-mail: zon071941@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Целью работы является определение параметров результирующего потока при взаимодействии встречных несоосных потоков воздуха для обеспечения интенсивного снижения скорости воздуха в производственно-технологических помещениях небольшого объема. Достижение поставленной цели необходимо решить такие задачи как проведение анализа существующих теоретических положений и методов расчета систем воздухораспределения производственно-технологических помещений небольшого объема; разработка математической модели процесса взаимодействия встречных несовместимых потоков и определить параметры результирующего воздушного потока в зависимости от геометрических характеристик прибора. Объектом исследования являются системы приточной вентиляции в производственно-технологических помещениях небольшого объема с незначительными тепловыми нагрузками. Предметом исследования являются процессы формирования результирующего воздушного потока, созданного путем взаимодействия встречных несоосных потоков воздуха.

Методы. Методы математического моделирования движения воздушного потока на основании уравнений аэродинамики.

Результаты. Получены аэродинамические характеристики результирующей струи – коэффициент Буссинеска и коэффициент поля скоростей.

Заключение. Выявлено, что между двумя круглыми струями с разнонаправленными скоростями и двумя результирующими потоками по внутренней области образуется пространственная вихревая зона с максимальным градиентом скорости. На границах струй происходит интенсивное подмешивание окружающего воздуха, векторы которого направлены противоположно, а величины скоростей зависят от скоростей в струях, из-за чего изменяется характер вихревого движения. Результаты показывают, что, фактический уровень перерегулирования при скачке нагрузки определяется в первом приближении величиной приращения потерь, умноженной на разность значений тепловой проводимости, обмотка-масло при исходной и конечной температурах масла в каналах охлаждения обмотки, а эта разность сама зависит от величины приращения потерь. Получены оптимальные интервалы факторов для значения максимального значения функции: t – от 40 до 120; p – от 800 до 900; c – от 1,4 до 2,3.

Ключевые слова: вентиляция; воздухораспределитель; аэродинамика; моделирование взаимодействия струй; воздушная струя.

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

Для цитирования: Исследование аэродинамических параметров воздухораспределителей при взаимодействии круглых несоосных струй / О.Н. Зайцев, Н.Е. Семичева, А.П. Бурцев, Е.О. Зайцева // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №3. С. 119-130. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-119-130>.

Поступила в редакцию 12.02.2024

Подписана в печать 18.04.2024

Опубликована 30.09.2024

Study of aerodynamic parameters of air distributors during interaction of round non-coaxial jets

Oleg N. Zaitsev ¹ ✉, Natalia E. Semicheva ¹, Alexey P. Burtsev ¹,
Ekaterina O. Zaitseva ²

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

² Belgorod State Technical University named after V.G. Shukhov
46, Kostyukova str., Belgorod 308012, Russian Federation

✉ e-mail: zon071941@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The aim of the work is to determine the parameters of the resulting flow in the interaction of counter-misaligned air flows to ensure an intensive decrease in air velocity in production and technological premises of small volume. To achieve this goal, it is necessary to solve such tasks as analyzing existing theoretical provisions and methods for calculating air distribution systems for small production and technological premises; development of a mathematical model of the process of interaction of oncoming incompatible flows and to determine the parameters of the resulting air flow depending on the geometric characteristics of the device. The object of the study is the supply ventilation systems in industrial and technological premises of small volume with insignificant thermal loads. The subject of the study is the processes of formation of the resulting air flow created by the interaction of counter-misaligned air flows.

Methods. Methods of mathematical modeling of air flow motion based on the equations of aerodynamics.

Results. The aerodynamic characteristics of the resulting jet are obtained – the Boussinesq coefficient and the velocity field coefficient.

Conclusion. In the ambiguities, between two-meter-long-range extravehicular jets and two-meter-long-range converging streams in the inner regions, a spatial vortex zone is formed with a maximum extravehicular gradient velocity. At the boundary of the jet stream there is an intense interaction with the surrounding air, the vector of the propeller is directed by the opposite direction, and the quantity of the speed of the plane depends on the speed of the jet, which changes the nature of the swirling movements. The results show that the actual level of overshoot during a load surge is determined in the first approximation by the increment value multiplied by the difference in the values of thermal conductivity, winding-oil at the initial and final temperatures of the oils in the channels of the cooled windings, and this difference itself depends on the magnitude of the incremental damage. Optimal factor intervals for the values of the maximum value of the functions are obtained: t – from 40 to 120; ρ – from 800 to 900; c – from 1.4 to 2.3.

Keywords: ventilation; air distributor; aerodynamics; simulation of jet interaction; air jet.

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

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

Received 12.02.2024

Accepted 18.04.2024

Published 30.09.2024

Введение

Современное развитие общества связано с потребностями улучшения санитарно-гигиенических условий в производственных и непроизводственных помещениях, а также экономии материальных и топливно-энергетических ресурсов. Условия труда, эффективность и надежность оборудования зависят от условий воздушной внешней среды производственных и технологических помещений, которые могут быть обеспечены вентиляционными системами.

В помещениях небольшого объема с вредными условиями, незначительными тепловыми нагрузками и фиксированными рабочими местами, значительное влияние на формирование внутреннего микроклимата имеют приточные потоки воздуха. Решение этой задачи усложняется ограничением расстояния до рабочей зоны при подаче воздуха вертикальными струями. В связи с этим возникает необходимость разработки новых конструктивных решений воздухораспределения, которые обеспечили бы одновременно создание необходимого микроклимата и экономию материальных и энергетических ресурсов. Недостаточно изученным, и как следствие, мало применяемым остается вопрос интенсификации снижения скорости воздушного

потока во взаимодействии со встречными потоками.

Целью работы является определение параметров результирующего потока при взаимодействии встречных несоосных потоков воздуха для обеспечения интенсивного снижения скорости воздуха в производственно-технологических помещениях небольшого объема.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ существующих теоретических положений и методов расчета систем воздухораспределения производственно-технологических помещений небольшого объема;
- разработать математическую модель процесса взаимодействия встречных несовместимых потоков и определить параметры результирующего воздушного потока в зависимости от геометрических характеристик прибора.

Объектом исследования являются системы приточной вентиляции в производственно-технологических помещениях небольшого объема с незначительными тепловыми нагрузками.

Предметом исследования являются процессы формирования результирующего воздушного потока, созданного путем взаимодействия встречных несоосных потоков воздуха.

Методы исследования – математическое моделирование движения воздушного потока на основании уравнений аэродинамики.

Материалы и методы

Данная работа посвящена рассмотрению комплекса вопросов относительно параметров результирующего потока, образованного взаимодействием плоских встречных струй. Аналитически изучены плоские взаимодействующие струи и результирующий поток. Оценено влияние взаимодействия струй на характер результирующего потока в помещении небольшого объема. Аналитически спрогнозированы результаты исследований результирующего потока, образованного путем взаимодействия несоосных струй. Определены параметры результирующего воздушного потока.

Так на формирование воздушной среды помещения влияет кинетическая энергия приточных струй, содержащаяся в крупномасштабных вихрях приточных и конвективных струй. Они разделяются на меньшие, превращая кинетическую энергию в теплоту. Турбулентный перенос энергии и вещества обуславливает распределение вредностей, температур и скоростей по всей площади и объему помещения. Процессы, проходящие в вентилируемом помещении, характеризуются величиной удельной энергии [1], вносимой струей за единицу времени, отнесенной к массе воздуха в объеме помещения.

$$E = \frac{G_v^2}{2V} = \frac{F_v^3}{2V}. \quad (1)$$

Для создания равномерных струйных потоков в помещениях необходимо, чтобы величина $E_{n.c}$ приточных струй была одинакова во всей рабочей зоне.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим истечение воздуха из щели. В поперечном сечении плоской приточной струи в воздухопроводе значения удельной энергии для разных точек неравнозначны из-за неравномерности скорости выхода воздуха. В начале щели вектор скорости потока и продольная ось канала почти параллельны, а в конце канала направление скорости перпендикулярно оси [1-3].

Равномерное распределение кинетической энергии в помещении возможно, когда алгебраическая сумма $E_{n.c}$ всех приточных струй будет постоянно в нижней точке:

$$\sum E'_{n.c} = \sum E''_{n.c} = \dots \sum E^{i-1}_{n.c} < \sum E^i_{n.c}. \quad (2)$$

Условие (2) достигается при взаимодействии нескольких потоков ($E_{n.c} = E_{n.c1} + E_{n.c2}$), например, двух струй с противоположным неравномерным распределением параметров.

Струи, вытекающие из воздухораспределителей, установленных на значительном расстоянии друг от друга, до выхода в рабочую зону развиваются как одиночные. При этом равномерность вентилирования помещения все же повышается, поскольку струи распространяются по противоположным направлениям.

При взаимодействии струй, исходящих из этих воздухопроводов, можно получить результирующую приточную струю с новыми аэродинамическими характеристиками.

Различное направление скоростей потока этих струй интенсифицирует перемещение воздуха со взаимным погашением их начальной энергии.

Удельная кинетическая энергия является величиной скалярной, поэтому для того, чтобы учесть направления скоростей, необходимо в (1) отделить векторную часть, и представить ее в виде

$$E_{\text{nc}}^i = \frac{\vec{v}^i}{2V} G = \vec{v}^i = \frac{\vec{v}^i}{2V} \vec{I}^i. \quad (3)$$

Для результирующего потока i -ого участка E_{nc} будет равна:

$$\sum E_{\text{nc}}^i = E_{\text{nc1}}^i + E_{\text{nc2}}^i. \quad (4)$$

а для всей результирующей струи с учетом (3) и (4) записывается в виде:

$$\begin{aligned} E_{\text{nc}\Sigma}^i &= \left[\frac{\vec{v}^i \vec{I}^i}{2V} + \dots + \frac{\vec{v}^i \vec{I}^i}{2V} \right] + \\ &+ \left[\frac{\vec{v}^i \vec{I}^i}{2V} + \dots + \frac{\vec{v}^i \vec{I}^i}{2V} \right] = \\ &= \frac{1}{2V} \sum_{i=1}^n \left(\vec{v}_1^i \vec{I}_1^i + \vec{v}_2^i \vec{I}_2^i \right) = \\ &\frac{1}{2V} \frac{\sum_{i=1}^n (\vec{v}_1^i + \vec{v}_2^i)}{2n} \sum_{i=1}^n \vec{I}_{\Sigma}^i = \frac{v_{\Sigma}}{2V} \sum_{i=1}^n \vec{I}_{\Sigma}^i, \end{aligned} \quad (5)$$

где v_{Σ} – среднее значение скорости результирующей струи.

Векторы скоростей исследуемых плоских струй имеют разные направления, поэтому их взаимосвязь рассматривается с точки зрения векторного совмещения импульсов, т.е. из (5) необ-

ходимо выделить только один общий множитель I_{Σ}^i :

Импульс в i -й точке результирующей струи определяем по формуле:

$$\vec{I}_{\Sigma}^i = \vec{I}_1^i + \vec{I}_2^i. \quad (6)$$

В области соприкосновения границ обеих струй при наличии векторного расстояния между щелями воздухопроводов, есть возможность возникновения обратных воздушных течений [1, 3, 4, 5].

$$\vec{I}_{\Sigma}^i + \vec{I}_{36}^i = \vec{I}_1^i + \vec{I}_2^i. \quad (7)$$

Обратные воздушные течения, образующиеся при взаимодействии одинарных струй, направлены в противоположном направлении от основных. Для удобства выразим их как часть от основных:

$$\vec{I}_{36}^i = A \vec{I}_{\Sigma}^i, \quad (8)$$

$$(1 + A) \vec{I}_{36}^i = \vec{I}_1^i + \vec{I}_2^i. \quad (9)$$

Импульс результирующего потока в проекциях на оси координат можно записать как:

$$I_{\Sigma} = \sqrt{I_{\Sigma x}^2 + I_{\Sigma z}^2}, \quad (10)$$

а с учетом обратного потока:

$$(1 + A)^2 I_{\Sigma}^2 = I_{\Sigma x}^2 + I_{\Sigma z}^2. \quad (11)$$

Выразим импульс результирующего потока через исходные импульсы в проекциях на оси координат:

$$(1 + A)^2 I_{\Sigma}^2 = (I_{1x} + I_{2x})^2 + (I_{1z} + I_{2z})^2. \quad (12)$$

Исходные импульсы обеих струй определяются из соотношений:

$$I_{1z} = I_{1h}^i \cos \alpha_1^i; \quad I_{2z} = I_{2h}^i \cos \alpha_2^i, \quad (13)$$

$$I_{1x} = I_{1h}^i \sin \alpha_1^i; \quad I_{2x} = I_{2h}^i \sin \alpha_2^i. \quad (14)$$

Подставив в (13) и (14), получим импульс результирующей струи в i -м сечении, выраженный через импульсы обеих струй с учетом направлений их движения:

$$(1+A)I_{\Sigma}^i = \sqrt{(I_1^i \cos \alpha_1^i + I_2^i \cos \alpha_2^i)^2 + (I_1^i \sin \alpha_1^i + I_2^i \sin \alpha_2^i)^2}. \quad (15)$$

Величина может быть определена из (15) при известных начальных импульсах. Обычно в практике решают обратную задачу: по известным параметрам в рабочие зоны определяются необходимые параметры на истоке. В этом случае под корнем (15) есть четыре неизвестных.

Поскольку воздушные потоки в воздуховодах одинаково направлены, то в каждом i -ом сечении обеих струй их импульсы могут быть одинаковы. Поэтому интенсивное взаимодействие встречных струй происходит по всей длине столкновения.

Равенство конструктивных размеров обоих воздуховодов и постоянство расходов по длине щели обуславливают равенство параметров обеих струй и импульсов обоих потоков ($I_{1c} = I_{2c}$). Проекции импульсов на ось (X) равны и противоположно направлены $\Sigma I_x = 0$, а на ось (Z) – также равны, однако сонаправлены.

Учитывая вышесказанное, (15) для области взаимодействия струй можно записать:

$$(1+A)I_{\Sigma c} = (1+A)I_{\Sigma c_z} = 2I_{ic_z}. \quad (16)$$

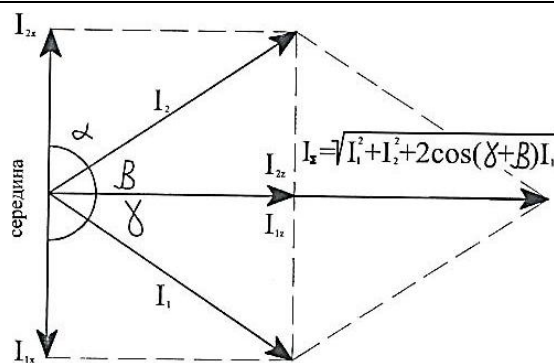


Рис. 1. Векторное добавление импульсов взаимодействующих струй

Fig.1. Vector addition of pulses of interacting jets

Аналогичное решение может быть получено путем преобразования:

$$(1+A)^2 I_{\Sigma c}^2 = I_1^2 + I_2^2 + 2 \cos(\gamma + \beta) I_1 I_2. \quad (17)$$

При равных значениях углов соединение струй γ и β (рис. 1) и равных импульсах после ряда преобразований (17) получим:

$$(1+A)I_{\Sigma} = 2I_1 \cos \beta = 2I_1 \sin \alpha. \quad (18)$$

Проекция импульса на ось (z) равняется:

$$I_{iz} = \rho \beta_0 \sigma v_0^2 \Delta l, \quad (19)$$

$$I_{\Sigma z} = \rho \beta L_{\Sigma z} v_{\Sigma z} \Delta l. \quad (20)$$

Количество движения результирующей струи на расстоянии z от площади щелей.

$$B_z = 2 \operatorname{tg} \theta_{\Sigma z}, \quad (21)$$

$$I_{\Sigma z} = 2 \rho X \operatorname{tg} \theta_z \beta (K v_{\Sigma z})^2 \Delta l, \quad (22)$$

где $I_{\Sigma z} = B_z v_{\Sigma z}$ – расход воздуха в результирующей струе при входе в рабочую зону; B_z – ширина результирующей зоны, определяется по величине угла раскрытия.

Подставив в (20) значение входящих величин и $(L_{\Sigma}=K_{\Sigma} v_{\Sigma z})$, получим проекцию результирующего импульса на ось (z) .

Таким образом, зависимость результирующего импульса от исходных (16) для средней части воздуховодов можно выразить следующим образом:

$$(1+A)2\rho X \operatorname{tg} \theta_{\Sigma} \beta (K v_{\Sigma z})^2 \Delta l = 2\beta_0 \rho \delta v_0^2 \Delta l, \quad (23)$$

$$v_{\Sigma z} = \sqrt{\frac{\beta_0 v_0^2 \delta}{(1+A)z \operatorname{tg} \theta_{\Sigma} \beta K^2}}. \quad (24)$$

Итак, скорость воздуха на оси результирующей струи на расстоянии X от площади щелей для средней части каналов.

Если рабочие места расположены вне зоны действия струи, то $v_{p,z}$, вдвое меньше, чем $v_{\Sigma z}$.

Из (23) получим отношение осевой скорости результирующей струи к скорости выхода:

$$\frac{v_{\Sigma x}}{v_0} = \sqrt{\frac{\beta_0 v_0^2 \delta}{(1+A)z \operatorname{tg} \theta_{\Sigma} \beta K^2}}, \quad (25)$$

$$m = \sqrt{\frac{\beta_0}{(1+A)z \operatorname{tg} \theta_{\Sigma} \beta K^2}}. \quad (26)$$

Решая вместе (25) с формулой Шлихтинга, получим значение коэффициента (m_{Σ}) затухания осевой результирующей струи, где $\beta_0 = 1$, поскольку через открытую щель выход воздуха свободный.

Аналогично (26), из равенства импульсов определяется значение коэффициента затухания осевой скорости свободной плоской струи.

$$m = \sqrt{\frac{\beta_0}{(1+A)z \operatorname{tg} \theta_{\Sigma} \beta K^2}}. \quad (27)$$

Если поле скоростей струи описывается зависимостью Шлихтинга, то коэффициенты K и β в (26) и (27) будут иметь известные значения [1].

Однако в ряде работ по взаимодействию струй [2-13] поля скоростей результирующего потока описываются законом нормального распределения.

Поскольку значения K и β необходимо найти по всей площади поля скоростей, примем максимальное значение $b = y_{\text{гр}}$. Прологарифмировав его, получим в общем виде связь между « $y_{\text{гр}}$ » и « $y_{0,5}$ »:

$$y_{\text{гр}} = y_{0,5} \sqrt{\frac{\ln b}{t}}. \quad (28)$$

Для отдельного случая, когда $t = -0,7$ и $b = 0,06$, выражение примет вид, откуда:

$$\ln_{0,05} = -0,7 \left[\frac{y_{\text{гр}}}{y_{0,5}} \right]^2, \quad (29)$$

$$y_{\text{гр}} = 2,07 y_{0,5}. \quad (30)$$

Подставим в формулу Шлихтинга (29) и получим окончательно:

$$\frac{v_y}{v_x} = e^{-3 \left[\frac{y}{y_{\text{гр}}} \right]^2}. \quad (31)$$

Для струй, поля скоростей которых описываются зависимостью (31), могут быть получены значения коэффициентов Буссинеска и поля путем общего решения с (30), соответственно:

– коэффициент поля скоростей свободной струи:

$$K = \frac{1}{y_{\text{гр}}} \int_y^{y_{\text{гр}}} e^{-3\left(\frac{y}{y_{\text{гр}}}\right)} dy = \int_0^1 e^{-3\bar{y}^2} d\bar{y}; \quad (32)$$

Правомочный коэффициент на количество движения (Буссинеска):

$$\beta = \frac{1}{K^2} \int_0^1 \left(e^{-3\bar{y}^2} \right) d\bar{y}, \quad (33)$$

где $(e^{-3\bar{y}^2})$ – интеграл вероятности.

В результате расчета получены следующие значения коэффициентов:

при $y = y_{0,5}$	$\beta = 1,0441$	$K = 0,8085;$
при $y = y_{\text{гр}}$	$\beta = 1,4240$	$K = 0,5040;$
по Шлихтингу	$\beta = 1,560$	$K = 0,450.$

Выводы

Экспериментально установлено, что тестовые расчеты и экспериментальные данные показали достаточную для инженерных расчетов точность, максимальная относительная погрешность

для трех моделей составила 7,9% [5, 7-13]. На основе экспериментальных исследований работы установлено что, предлагаемая модель дает вполне ожидаемый результат – плавное снижение температуры в баке [1, 3].

Результаты показывают, что, фактический уровень перерегулирования при скачке нагрузки определяется в первом приближении величиной приращения потерь, умноженной на разность значений тепловой проводимости, обмотка-масло при исходной и конечной температурах масла в каналах охлаждения обмотки, а эта разность сама зависит от величины приращения потерь.

На основании рис. 1 получены следующие оптимальные интервалы факторов для значения максимального значения функции: t – от 40 до 120; ρ – от 800 до 900; c – от 1,4 до 2,3.

Список литературы

1. Logachev I.N., Logachev K.I. Industrial Air Quality and Ventilation: Controlling Dust Emissions. CRC Press. 2017. 414 p.
2. Logachev K.I., Ziganshin A.M., Averkova O.A. On the resistance of a round exhaust hood, shaped by outlines of the vortex zones occurring at its inlet, Build. Environ. 2019, 151 338–347. doi:10.1016/j.buildenv.2019.01.039.
3. A survey of separated airflow patterns at inlet of circular exhaust hoods / K.I. Logachev, A.M. Ziganshin, O.A. Averkova, A.K. Logachev // Energy Build. 2018. № 173. P. 58–70. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.036>.
4. Naidenov G.F. Gas burner devices with adjustable torch characteristics. Kiev: Tekhnika, 1974. 112 p.
5. Юдин Ю. В., Майсурадзе М. В., Водолазский Ф. В. Организация и математическое планирование эксперимента. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 124 с.
6. Logachev I., Konstantin K., Averkova O. Local Exhaust Ventilation: Aerodynamic Processes and Calculations of Dust Emissions. Boca Raton: CRC Press, 2015. 540 p.

7. Жилина К. В., Тютюнов Д. Н., Бурцев А. П. Один из вариантов управления системой тепло-снабжения зданий и сооружений с применением методов математического анализа // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №2. С. 56-70. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-56-70>.
8. Исследование процесса генерации термоэлектричества при утилизации низкопотенциального тепла сбросных газов / С. В. Ежов, Е. Н. Семичева, А. П. Бурцев, В. И. Зенченков, Д. А. Ермаков // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23, № 2. С. 74-84. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-2-74-84>
9. Бурцев А. П., Булгаков А. В., Яковлева В. Н. Вариант управления воздушными потоками по схеме «умный дом» с использованием комплексного многослойного пластинчатого рекуператора // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2023. № 7(1067). С. 60-63.
10. Математическая модель для автоматизированного управления тепловыми потоками энергоэффективной системы вентиляции / В. С. Ежов, Н. Е. Семичева, Д. Н. Тютюнов, А. П. Бурцев, Н. С. Перепелица, А. П. Бурцев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. Т. 25, № 1. С. 38-52. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-38-52>
11. Experimental research of main characteristics in a complex multi-layer plate heat exchanger / V. S. Yezhov, N. E. Semicheva, A. P. Burtsev, et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2022. Vol. 1242, no. 1. P. 012042. DOI 10.1088/1757-899x/1242/1/012042.
12. Zaitsev O.N., Logachev K.I., Gol'tsov A.B. Increasing the pollutants capture rate by local exhaust due to the use of external swirling jet. Part 1. Research methods // Refractories and Industrial Ceramics. 2022. Vol. 63, № 3. P. 332-336.
13. Zaitsev O.N., Logachev K.I., Gol'tsov A.B. Increasing the rate of pollutants capture by local exhaust due to the use of external swirling jet. Part 2. Results of numerical and experimental studies // Refractories and Industrial Ceramics. 2022. Vol. 63, № 4. P. 448-453.
14. Zaitsev O.N., Logachev K.I., Gol'tsov A.B. Increasing the rate of capture of pollutants by local suction due to the use of an external swirling jet. Part 1. Research methods // Refractories and Industrial Ceramics. 2022. Vol. 1, № 6. P. 40-45.
15. Системы отопления при нестационарном температурном режиме на основе комбинированного теплогенератора / Ф.А. Кешвединова, А.С. Умеров, С.А. Егоров, И.П. Ангелюк, О.Н. Зайцев // Строительство и техногенная безопасность. 2022. № 25 (77). С. 87-90.
16. Коаксиальное воздухораспределительное устройство с торцевой раздачей потока для вентиляционных систем / Зайцев О.Н., Сиваченко Ю.А. // Патент на полезную модель RU 207611 U1, 03.11.2021. Заявка № 2021105119 от 25.02.2021.

17. Исследование влияния структуры потока на коэффициент гидравлического сопротивления / Т.В. Дихтярь, О.Н. Зайцев, К.С. Дихтярь, И.П. Ангелюк // Строительство и техногенная безопасность. 2021. № 22 (74). С. 129-133.

18. Zaycev O.N., Angeluck I.P., Toporen S.S. Experimental study of the aerodynamic resistance of a conical-spiral heat exchanger of the outgoing flue gases // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific Conference "Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development" - Organisation and Technology of Construction Production. 2019. С. 055033. DOI: 10.1088/1757-899X/698/5/055033

19. Зайцев О.Н., Дихтярь Т.В., Циплина А.А. Совершенствование систем микроклимата в сооружениях полукрытого типа // Строительство и техногенная безопасность. 2018. № 11 (63). С. 187-193.

20. Исследование свободной закрученной струи с прецессирующим вихревым ядром / О.Н. Зайцев, Н.А. Степанцова, О.А. Аверкова, К.И. Логачев, В.А. Уваров // Строительство и техногенная безопасность. 2017. № 8 (60). С. 109-113.

References

1. Logachev I.N., Logachev K.I. Industrial Air Quality and Ventilation: Controlling Dust Emissions. CRC Press. 2017. 414 p.

2. Logachev K. I., Ziganshin A. M., Averkova O. A. On the resistance of a round exhaust hood, shaped by outlines of the vortex zones occurring at its inlet. *Build. Environ.* 2019. 151: 338–347. doi:10.1016/j.buildenv.2019.01.039.

3. Logachev K.I., Ziganshin A.M., Averkova O.A., Logachev A.K. A survey of separated airflow patterns at inlet of circular exhaust hoods. *Energy Build.* 2018. (173): 58–70. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.036>.

4. Naidenov G.F. Gas burner devices with adjustable torch characteristics. Kiev: Tekhnika; 1974. 112 p.

5. Yudin Yu. V., Maisuradze M. V., Vodolazsky F. V. Organization and mathematical planning of the experiment. Ekaterinburg; 2018. 124 p. (In Russ.).

6. Logachev I., Konstantin K., Averkova O. Local Exhaust Ventilation: Aerodynamic Processes and Calculations of Dust Emissions. Boca Raton: CRC Press; 2015. 540 p.

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

8. Ezhov V. S., Semicheva N. E., Burtsev A. P., Zenchenkov V. I., Ermakov D. A. Study of the Process of Generation of Thermoelectricity in Low Grade Heat Recovery of Waste Gases. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of*

the Southwest State University. 2019; 23(2): 74-84 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-2-74-84>.

9. Burtsev A. P., Bulgakov A.V., Yakovleva V. N. Variant of air flow control according to the "smart house" scheme using a complex multilayer plate heat exchanger. *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki = BST: Bulletin construction equipment*. 2023; (7): 60-63 (In Russ.).

10. Yezhov V. S., Semicheva N. E., Tyutyunov D. N., Burtsev A. P., Perepelitsa N. S., Burtsev A. P. A Mathematical Model for Automated Heat Flow Control of an Energy-Efficient Ventilation System. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(1): 38-52 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-38-52>

11. Yezhov V. S., Semicheva N. E., Burtsev A. P., et al. Experimental research of main characteristics in a complex multi-layer plate heat exchanger. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2022; 1242, (1): 012042. DOI 10.1088/1757-899x/1242/1/012042

12. Zaitsev O.N., Logachev K.I., Gol'tsov A.B. Increasing the pollutants capture rate by local exhaust due to the use of external swirling jet. Part 1. Research methods. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2022; 63 (3): 332-336.

13. Zaitsev O.N., Logachev K.I., Gol'tsov A.B. Increasing the rate of pollutants capture by local exhaust due to the use of external swirling jet. Part 2. Results of numerical and experimental studies. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2022; 63 (4): 448-453.

14. Zaitsev O.N., Logachev K.I., Gol'tsov A.B. Increasing the rate of capture of pollutants by local suction due to the use of an external swirling jet. Part 1. Research methods. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2022; 1 (6): 40-45.

15. Keshvedinova F.A., Umerov A.S., Egorov S.A., Angelyuk I.P., Zaitsev O.N. Heating systems with non-stationary temperature conditions based on a combined heat generator. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' = Construction and technogenic safety*. 2022; (25): 87-90.

16. Zaitsev O.N., Sivachenko Yu.A. Coaxial air distribution device with end flow distribution for ventilation systems. Patent for utility model RU 207611 U1, 03.11.2021. Application No. 2021105119 dated 25.02.2021 (In Russ.).

17. Dikhtyar T.V., Zaitsev O.N., Dikhtyar K.S., Angelyuk I.P. Study of the influence of flow structure on the hydraulic resistance coefficient. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' = Construction and technogenic safety*. 2021; (22): 129-133. (In Russ.).

18. Zaycev O.N., Angeluck I.P., Toporen S.S. Experimental study of the aerodynamic resistance of a conical-spiral heat exchanger of the outgoing flue gases. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific Conference "Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development" - Organisation and Technology of Construction Production*. 2019. P. 055033. DOI: 10.1088/1757-899X/698/5/ 055033

19. Zaitsev O.N., Dikhtyar T.V., Tsiplina A.A. Improving the microclimate systems in semi-open structures. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bez-opasnost' = Construction and technogenic safety*. 2018; (11): 187-193. (In Russ.).

20. Zaitsev O.N., Stepantsova N.A., Averkova O.A., Logachev K.I., Uvarov V.A. Study of a free swirling jet with a precessing vortex core. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' = Construction and technogenic safety*. 2017; (8): 109-113 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

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

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

Семичева Наталья Евгеньевна, кандидат технических наук, заведующий кафедрой инфраструктурных энергетических систем, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: nsemicheva@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0232-5282>, ScopusID: 56826118600

Natalia E. Semicheva, Cand. of Sci. (Engineering), Head of the Infrastructure Energy Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: nsemicheva@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0232-5282>, ScopusID: 56826118600

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

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

Зайцева Екатерина Олеговна, магистрант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Белгородский государственный технический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: katerinazaytseva01@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-8199-9926>

Ekaterina O. Zaitseva, Master of the Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Belgorod State Technical University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: katerinazaytseva01@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-8199-9926>

УДК 004.912 + 004.89

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-131-163>

Когнитивная пиринговая инфраструктура для организации коллективной работы над проектами на основе agile-методологии

Н.С. Карамышева¹, В.С. Александров¹, И.А. Кирюткин¹, С.А. Зинкин¹ ✉

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

✉ e-mail: zsa49@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Целью работы является предложение и обоснование когнитивной пиринговой инфраструктуры, позволяющей улучшить условия для коллективной работы над проектами на основе agile-методологии. Когнитивная архитектура определяется как структура, обеспечивающая реализацию антропоморфных и нейроморфных функций в естественных или искусственных системах. Предлагаемый подход основан на организации взаимодействия коллективного интеллекта членов agile-команды и искусственного интеллекта, представленного обученными искусственными нейронными сетями. При формировании agile-команды предлагается учитывать структуру познавательной сферы в структуре психических процессов когнитивного, способного к познавательной деятельности агента-человека.

Методы. Знания о предметной области определяются на основе коллективного интеллекта участников agile-команды и обучения искусственных нейронных сетей. Предполагается, что искусственные нейронные сети доступны всем участникам agile-команды и реализуют функции коллективного искусственного интеллекта при условии, что при их обучении использован профессионализм и опыт работы человека в естественной социальной среде. Мыслительные операции, такие как анализ, разбиение (модуляризация), сравнение, абстрагирование, синтез, обобщение, классификация, конкретизация, известные из курсов общей психологии, интерпретируются не только как результат деятельности человека, но и как функционал программы. Аналогично реализуются некоторые элементы процессов познавательной сферы «память» и «речь».

Результаты. Система реализована на основе пиринговой компьютерной сети, обеспечивающей коммуникации между всеми искусственными и естественными участниками когнитивного познавательного процесса в процессе проектирования. Предложена концептуальная модель ячейки когнитивного коллективного интеллекта, объединяющая элементы собственно коллективного интеллекта agile-агентов с коллективным искусственным интеллектом агентов на базе нейронных сетей. При экспертной оценке качества отдельных этапов проектирования предложено использовать тегирование на основе эмоционально-волевых и мотивационных психических процессов личностей.

Заключение. Когнитивная обработка информации основана на идее моделирования процессов человеческого мышления в компьютерных системах. В рассматриваемой системе это включает в себя обработку естественного языка, распознавание письменной речи, связанные с пониманием информации

путем программной имитации человеческого интеллекта. Принятая концепция предполагает реализацию коллективного интеллекта не только искусственным путем, но и путем организации удобного взаимодействия участников интеллектуального чата. Искусственный интеллект, также коллективный, реализуется при помощи первоначально обученных и обучаемых далее нейронных сетей.

Ключевые слова: agile-методология; когнитивные агенты; интеллектуальный чат; антропоморфизм; нейроморфизм; программная реализация; пиринговая сеть.

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

Для цитирования: Когнитивная пиринговая инфраструктура для организации коллективной работы над проектами на основе agile-методологии / Н.С. Карамышева, В.С. Александров, И.А. Кирюткин, С.А. Зинкин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №3. С. 131-163. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-131-163>.

Поступила в редакцию 15.05.2024

Подписана в печать 21.06.2024

Опубликована 30.09.2024

Cognitive peering infrastructure for the organization teamwork on projects based on agile methodology

Nadezhda S. Karamysheva ¹, Vladimir S. Alexandrov ¹,
Ilya A. Kiryutkin ¹, Sergey A. Zinkin ¹ ✉

¹ Penza State University

40 Krasnaya str., Penza 440026, Russian Federation

✉ e-mail: zsa49@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. The goal of the work is to develop and justify a cognitive peer-to-peer infrastructure that will improve the conditions for collective work on projects based on agile methodology. Cognitive architecture is defined as a structure that ensures the implementation of anthropomorphic and neuromorphic functions in natural or artificial systems. The proposed approach is based on organizing the interaction of the collective intelligence of members of an agile team and artificial intelligence, represented by trained artificial neural networks. When forming an agile team, it is proposed to take into account the structure of the cognitive sphere in the structure of the mental processes of a human cognitive agent.

Methods. Domain knowledge is determined based on the collective intelligence of the agile team members and the training of artificial neural networks. It is assumed that artificial neural networks are available to all members of an agile team and implement the functions of collective artificial intelligence, provided that their training uses the professionalism and experience of a person in a natural social environment. Mental operations such as analysis, partitioning (modularization), comparison, abstraction, synthesis, generalization, classification, concretization, known from general psychology courses, are interpreted not only as a result of human activity, but also as the functionality of a program. Some elements of the cognitive sphere processes "memory" and "speech" are realized in a similar way.

Results. The system is implemented on the basis of a peer-to-peer computer network that provides communications between all artificial and natural participants in the cognitive process during the design process. A conceptual model of a cognitive collective intelligence cell is proposed, combining elements of the actual collective intelligence of agile agents with the collective artificial intelligence of agents based on neural networks. In an expert assessment of the quality of individual design stages, it was proposed to use tagging based on the emotional-volitional and motivational mental processes of individuals.

Conclusion. *Cognitive information processing is based on the idea of modeling human thinking processes in computer systems. In the system under consideration, this includes natural language processing, written speech recognition, associated with understanding information through software imitation of human intelligence. The accepted concept involves the implementation of collective intelligence not only artificially, but also by organizing convenient interaction between participants in an intellectual chat. Artificial intelligence, also collective, is implemented using initially trained and further trained neural networks.*

Keywords: *agile methodology; cognitive agents; intelligent chat; anthropomorphism; neuromorphism; software implementation; peer-to-peer network.*

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

For citation: Karamysheva N. S., Alexandrov V. S., Kiryutkin I. A., Zinkin S. A. Cognitive peering infrastructure for the organization teamwork on projects based on agile methodology. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(3): 131-163 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-131-163>.

Received 15.05.2024

Accepted 21.06.2024

Published 30.09.2024

Введение

Сложность анализа разнообразных социальных процессов и явлений приводит к необходимости использования средств познавательного, или когнитивного, моделирования ситуаций в единой взаимосвязанной системе «человек и общество»; когнитивная модель – это «основной механизм, обеспечивающий обработку и хранение информации о мире в сознании человека» [1, 2].

Неформальный когнитивный подход к моделированию имеет много общего с так называемой agile-методологией (англ. agile – гибкий; читается «эджайл») работы над проектами и нередко обеспечивает большую адаптивность, готовность к изменениям и производительность по сравнению с традиционными методологиями, называемыми waterfall-методологиями (англ. waterfall – водопад). Каждая agile-структура

является адаптивной по отношению к разбиению проектов на этапы и при учете меняющихся требований [3, 4, 5].

В «Кратком словаре когнитивных терминов» определено, что «...термин «когнитивная модель» может использоваться в трех значениях: как концепция, в которой язык рассматривается как разновидность когнитивного процесса; как ментальная модель понимания текста в результате естественной обработки языковых данных и как характеристика процесса категоризации в естественном языке» [6].

Когнитивистика имеет междисциплинарный характер и как наука объединяет несколько научных направлений: когнитивную психологию, культурную антропологию, моделирование искусственного интеллекта, философию, нейронауки, лингвистику [7].

Целью работы является разработка и обоснование когнитивной пиринговой инфраструктуры, позволяющей улучшить условия для коллективной работы над проектами на основе agile-методологии. Эта цель достигается путем реализации коллективного интеллекта не только искусственным путем, но и путем организации рационального взаимодействия участников интеллектуального чата, реализованного в вычислительной сети с пиринговой архитектурой. Поскольку рассматриваются вопросы интеграции методов исследования, затрагивающие понятия общей психологии, коллективной работы над проектами, информационных технологий, статья содержит необходимые понятия из этих областей, оформленные цитатами.

Возможности современных искусственных когнитивных архитектур, осуществляющих программно-аппаратную имитацию интеллекта человека, разнообразны. Главными свойствами искусственных когнитивных архитектур являются: представление, организация, использование, приобретение и совершенствование знаний [8].

Известный проект «The Human Brain Project, НБР» – «Проект Человеческий Мозг» посвящен исследованию механизмов работы мозга на основе новых вычислительных технологий. Участники проекта сделали вывод о том, что когнитивистика как наука, изучающая функции мозга высокого уровня – познание и поведение, имеет жизненно

важное значение и в перспективе станет наиболее важным компонентом в проекте НБР [9].

Ученые, работающие над темой НБР, создают нейроморфные биологически инспирированные когнитивные архитектуры, состоящие из множества сетей или модулей, которые работают вместе, создавая более сложное и гибкое поведение, чем отдельные глубокие искусственные нейронные сети. Архитектуры расширяются за счет добавления все большего количества когнитивных способностей более высокого уровня, включая нейронные системы для реляционного мышления и иерархического планирования [10].

Для эффективной коллективной работы agile-команд могут быть созданы лучшие условия за счет создания развитой сетевой инфраструктуры, интегрированной с технологиями создания когнитивных баз знаний.

Материалы и методы

Agile-методология и когнитивные модели. В рамках настоящей работы мы ориентируемся на применение agile-методологии как в программных, так и в непрограммных проектах, то есть и за пределами индустрии программного обеспечения – редактирование текстов, литературное творчество, подготовка документов, разработка сценариев пьес и компьютерных игр и др.

К наиболее популярным вариантам использования принципов agile-методологии относятся [11, 12]:

- Scrum: управление проектами на основе итеративной модели разработки сложного программного обеспечения; фиксированные операции, называемые *спринтами*, позволяют команде обеспечить регулярный выпуск программного обеспечения продукции иного рода;

- Kanban: визуализация рабочих процессов, сопровождаемых небольшими постепенными изменениями в текущем проекте; в качестве инструмента для реализации метода Kanban в проектах используется так называемая доска Kanban – физическая или виртуальная;

- Scrumban: гибрид методологий Scrum и Kanban;

- XP: экстремальное программирование, повышающее качество программного обеспечения и обеспечивающее оперативность реагирования на требования клиентов;

- APF: методология, поддерживающая универсальную командную работу с адаптивной структурой проекта и хорошо подходящая для проектов с неясными деталями, вносимыми клиентами.

Известен и ряд других agile-методологий – Hybrid, Bimodal, Lean, Crystal. При выборе варианта agile-методологии учитывается размер команды, конкретные требования проекта, профессионализм и уровень опыта членов команды.

Методы организации коллективного интеллекта. Организация коллективной работы над каким-либо проектом начинается с описания ситуации, места и времени ее реализации, определения количества и состава участников.

На успешность реализации проекта в общем случае оказывают влияние эмоции и чувства всех участников коллективного общения, направленность внимания каждой личности, процессы эмоционально-волевой сферы, мотивация участия в коллективной работе.

Личностные и социальные качества, проявляемые в работе agile-команды, составляют структуру навыков эмоционального интеллекта (рис. 1) [13, 14]. Эта структура представлена в форме концептуального графа навыков командной работы на основе личного и коллективного интеллекта. При построении концептуального графа использован интеллектуальный редактор CharGer [15]. В дальнейшем в подобном виде будут представлены структуры психических процессов человека: общая структура психики личности, мышление, память и речь. Данное представление пригодно для автоматического формирования баз знаний о психических процессах.

Из практики коллективной и командной работы известен психологический и социологический феномен, когда коллективный интеллект принимает более эффективные решения, чем отдельно взятые квалифицированные специалисты; могут быть отмечены некоторые ключевые факторы, влияющие на эффективность коллективных решений [16]:

- многообразие мнений, отражающих индивидуальные точки зрения участников;

- независимость мнений участников, формируемых без влияния остальных членов команды;

– мнения участников должны быть сформированы на основании индивидуальных «локальных» знаний, либо знаний, извлекаемых из независимых источников;

– каждый из участников команды должен иметь представление о предмете и конечной цели обсуждения.

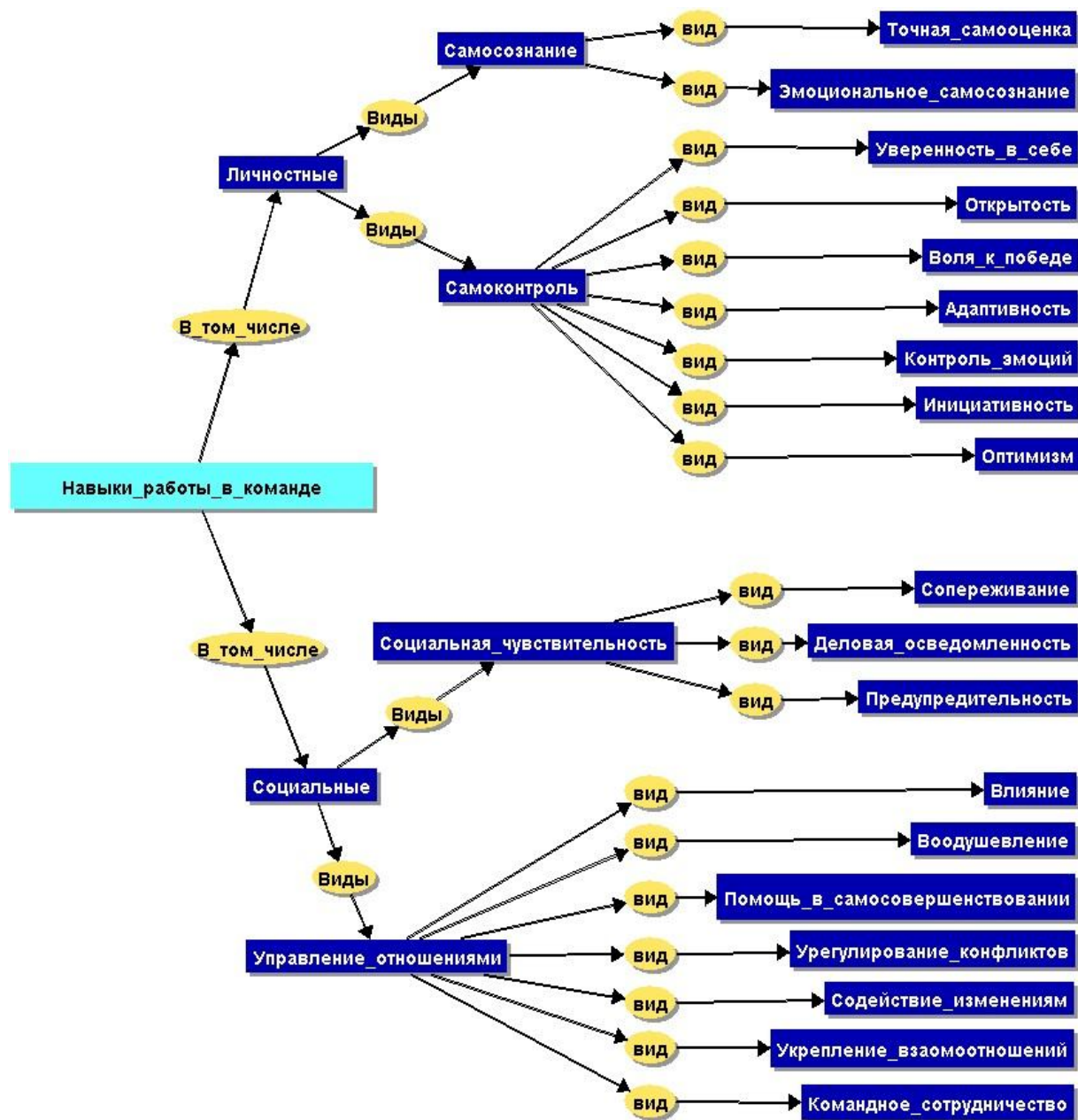


Рис. 1. Концептуальный граф навыков командной работы при учете личного и коллективного интеллекта

Fig. 1. Conceptual graph of teamwork skills when taking into account personal and collective intelligence

Коллективный интеллект, возникающий в результате сотрудничества, кол-

лективных усилий и, возможно, конкуренции многих людей, проявляется в со-

гласованном принятии решений по результатам экспертного оценивания информации о выбранных этапах совместной работы [17]. Например, известный метод экспертного оценивания Дельфи [18] основан на анонимном участии экспертов в диалоге с организаторами опроса. В процессе диалога эксперты могут вносить добавления, делать комментарии к задаваемым вопросам, уточнять свои ответы. С результатами опроса организаторы знакомят всех экспертов с просьбой дать оценки наиболее крайним точкам зрения. Опросы повторяются до тех пор, пока не будет достигнута согласованность мнений всех экспертов.

Другими известными методами принятия коллективных решений являются: кейс-метод, заключающийся в детальном разборе и анализе ситуаций; метод экспертных оценок, основанный на обработке мнений экспертов по поводу неформализованных проблем и метод «мозговой атаки, или штурма», заключающийся в выработке коллективного решения на инновационном уровне. Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки. Основными особенностями этих методов являются высокие требования к компетентности экспертов [19]. Недостатком коллективных методов принятия решений является высокая стоимость, низкая оперативность и пониженная ответственность участников принятия решений [20].

В настоящей работе предполагается использовать специальные закладки – ярлыки, или теги, для обсуждаемых фрагментов некоторой информацион-

ной структуры. Полученная в результате информационная структура может рассматриваться как коллективное знание (или коллективный интеллект) сообщества пользователей.

Известная модель Белбина, предложенная им в работе [21], основана на использовании теории ролей в команде. Согласно этой модели, «...роли участников команды делятся на три категории: ориентированные на действия, ориентированные на размышления и социально ориентированные (рис. 2).

Ориентированные на действия участники команды готовы выполнять задачи в поставленные сроки (они играют роли мотиватора движения к цели, реализатора-планировщика действий и педанта-перфекциониста, обращающего особое внимание на детали проекта). Ориентированные на размышления участники команды обладают критическим мышлением и могут предлагать новые идеи (эту категорию составляют генератор идей, аналитик-стратег и специалист, обладающий глубокими знаниями по данной проблеме). Социально ориентированные участники команды отличаются развитыми коммуникативными навыками, благодаря чему они могут поддерживать весь коллектив (координатор – нередко один из руководителей команды, обладающий хорошими коммуникационными навыками, консолидатор-шейпер (от англ. *shaper* – формирователь), который является неформальным лидером и «душой команды» – посредником при выработке консолидированного мнения

команды, и исследователь ресурсов, а также новых инновационных подходов к решению вопросов» [21].

К сожалению, описанный метод для формирования agile-команды сложен и зачастую неосуществим в полном виде, когда члены команды должны играть роли независимых и равноправных экспертов. Однако при наличии возможностей выявления и оценки свойств раз-

личимых по ролям участников, этим методом целесообразно воспользоваться. Если agile-команде предусмотрена роль руководителя-куратора проекта, то им может быть один из участников, причем при его выборе целесообразно воспользоваться концептуальным графом навыков командной работы, представленном на рис. 1.

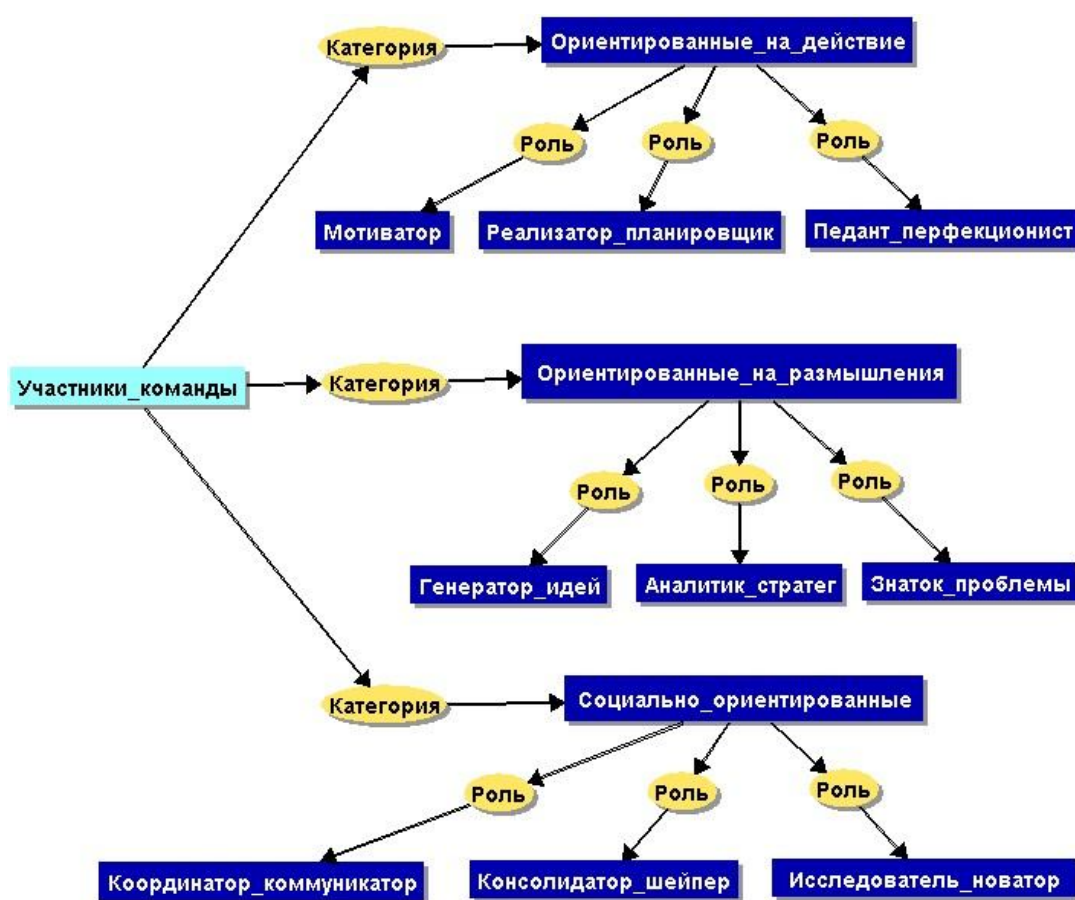


Рис. 2. Концептуальный граф ролей участников agile-команды при учете личного и коллективного интеллекта

Fig. 2. Conceptual graph of roles of agile team members when taking into account personal and collective intelligence

Инфраструктура для организации коллективной работы над проектами, для обучения и бизнеса может содержать

коллективный интеллект групп пользователей, искусственный интеллект или коллективный искусственный интеллект

– обученную или обучаемую искусственную нейронную сеть.

Другим полезным примером коллективной сетевой деятельности являются чаты, предоставляемые социальными сайтами и Интернетом в целом.

В настоящее время предлагается идея почти футуристического характера, но технически уже осуществимая: для создания коллективного искусственного интеллекта необходимо объединить отдельные искусственные нейросети в общую нейросеть, что позволит им непрерывно самообучаться на основе обмена информацией между нейросетями [22]. Частично эта проблема нашла свое решение в настоящей статье, сделанное на основе интеграции искусственного и коллективного интеллекта, а также на основе новых образовательных, в том числе дистанционных, технологий.

Организация коллективной работы agile-команды. Предлагаются для реализации следующие режимы системы – пиринговой инфраструктуры для организации коллективной работы над проектами на основе agile-методологии:

- Все оценки и имена-псевдонимы участников работы над проектом известны руководителю команды.

- Все оценки известны участникам работы над проектом, но имена-псевдонимы известны только руководителю команды.

- Все оценки и имена-псевдонимы участников работы над проектом известны руководителю команды и всем остальным участникам.

- Все оценки и имена-псевдонимы участников работы над проектом известны каждому участнику, кроме руководителя команды.

- Все участники работы трудятся анонимно, оценки известны в процессе работы, но имена-псевдонимы открываются только после завершения проекта. Руководитель команды отсутствует, вместо него в системе имеются координатор или модератор.

- Все участники работы трудятся анонимно, оценки и имена-псевдонимы открываются только после завершения проекта. Руководитель команды отсутствует, вместо него в системе имеются координатор или модератор.

Оценки представляются в форме хеш-тегов или «эмодзи», например, в виде *#автор #идея #мысль #задача #оценка*. При коллективной работе формальный лидер команды (мотиватор) может выполнять функции куратора или модератора диалогов с различающимися полномочиями. Он также может выполнять функции эксперта с решающим голосом, ставящего вопросы на голосование. При отсутствии формального лидера назначается временный модератор, следящий за корректностью диалога. Вне числа экспертов команды остается лицо, выполняющее функции системного администратора и отвечающее за правильную работу программного обеспечения.

Искусственный интеллект в системе реализуется обученной искусственной нейронной сетью. Отдельно взятую нейронную сеть возможно отнести не к

индивидуальному искусственному интеллекту, а к коллективному, в случае, когда ее «мнение» по изучаемому вопросу формируется на основе использования информации из различных источников, созданных людьми [23].

На рис. 3. дано представление когнитивных процессов субъекта agile-методологии (человека) в форме концептуального графа.

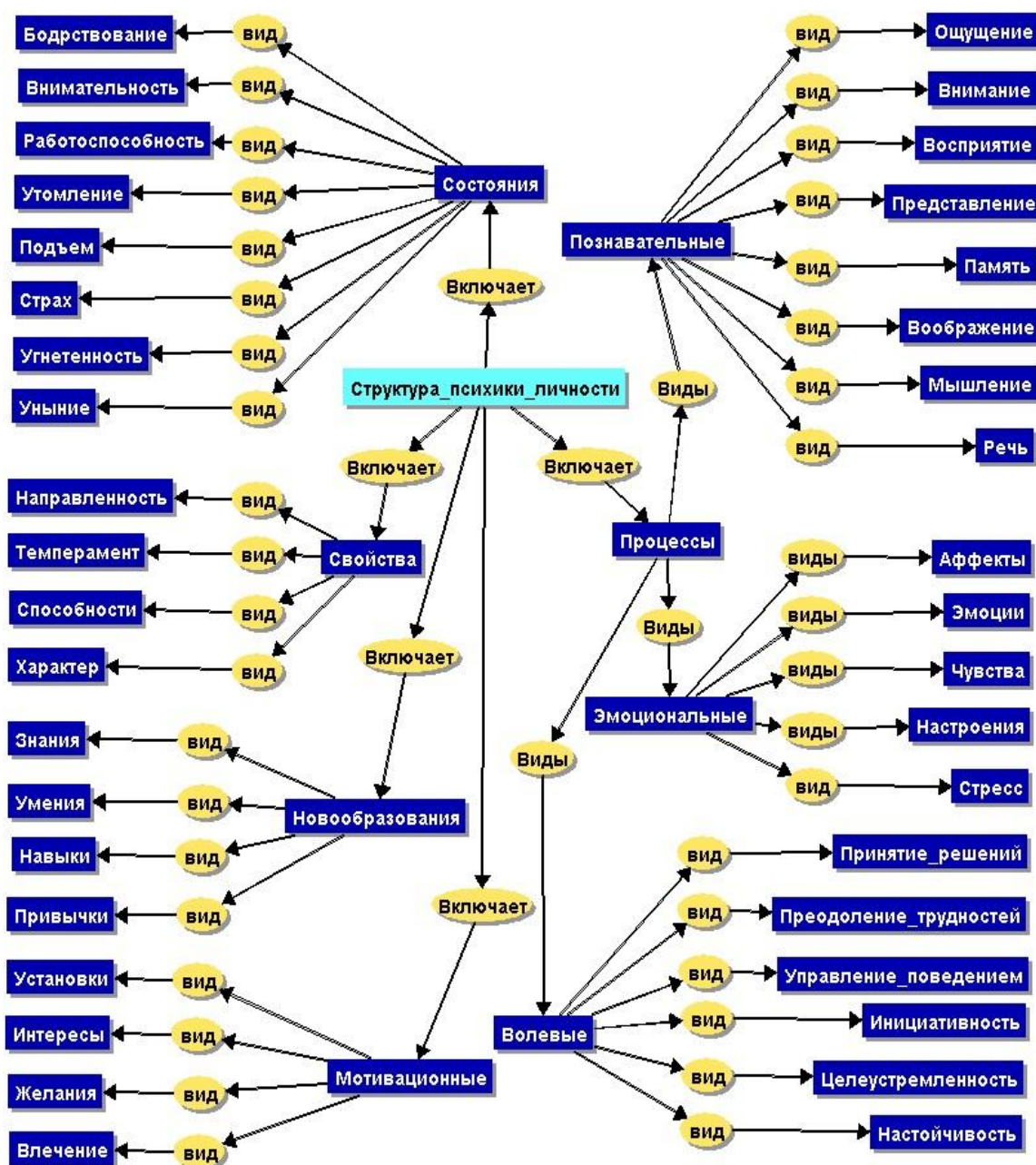


Рис. 3. Концептуальное представление когнитивных процессов и состояний для субъекта agile-методологии

Fig. 3. Conceptual representation of cognitive processes and states for the subject of agile methodology

Концептуальный граф составлен согласно источникам по общей психологии [24, 25, 26]. Данный граф подчеркивает сложность структуры психики личности, а также видов познавательных, то есть когнитивных процессов и состояний. Для некоторых из этих явлений могут быть разработаны аналоги в программировании.

Когнитивные особенности личности и концепция «бережливого мышления» участников agile-процессов. Особенностью agile-методологий является наличие главного коллективного исполнителя – самоорганизующейся команды психически-совместимых специалистов, готовых к работе с клиентами-заказчиками, а также с искусственным интеллектом, в первую очередь с искусственными нейронными сетями [27].

Внедрение семейства процессов agile-методологии на предприятиях способно повысить заинтересованность и мотивацию сотрудников.

Agile-мышление, в первую очередь, предполагает наличие у сознания личности свойств адаптивности и способности меняться в зависимости от окружающего контекста. Например, Lean-мышление, или «бережливое мышление» (англ. *Lean Thinking*), связано с использованием личностью системного подхода при взгляде на окружающую действительность как на единый комплекс взаимосвязанных элементов [27]. Базовое мышление, умонастроения и допущения принесут больше пользы при меньших затратах, одновременно развивая уверенность, компетентность

и способность каждого сотрудника работать с другими.

О технической и программной интерпретации и имитации когнитивных процессов познавательной сферы человека. Почти для каждого из когнитивных процессов познавательной сферы человека возможно дать техническую или программную интерпретацию. Например, ощущения, восприятие и внимание можно интерпретировать как ввод информации; внимание, представления и воображение – как подготовку информации к запоминанию; памяти и мышлению может соответствовать запоминание, хранение и выполнение операций по обработке данных, представляющих собой информацию в формализованном виде; речь – как процесс, выполняющий коммуникативную функцию. Таковы простейшие и далеко неполные технические интерпретации явлений познавательной сферы человека. Однако некоторые подобные интерпретации могут носить мнемонический или метафорический характер.

Познавательный психический процесс «память». Запоминание информации в памяти человека иллюстрируют рис. 4 и рис. 5, построенные на основании курсов общей психологии [24, 25, 26]. Когнитивное развитие влечет за собой развитие различных процессов, таких как обучение, восприятие, память и внимание, которые позволяют людям получать знания и понимать свое окружение. Некоторым процессам памяти может соответствовать работа иерархически структурированной памяти компьютера.

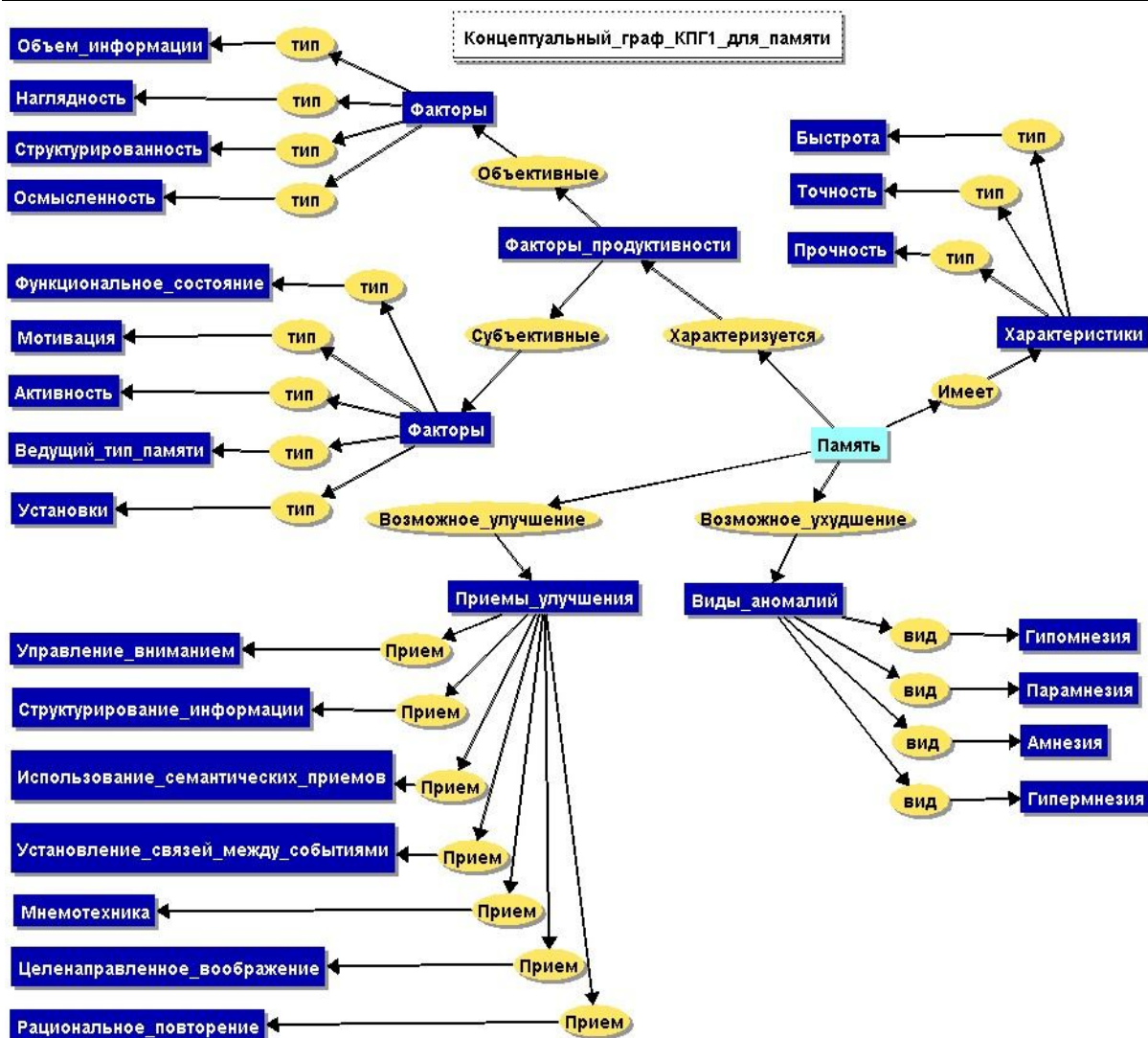


Рис. 4. Концептуальный подграф 1 когнитивного процесса «память» субъекта agile-методологии

Fig. 4. Conceptual subgraph 1 of the cognitive process "memory" of the subject of agile methodology

Память – это фундаментальный когнитивный процесс, который функционирует уже с рождения человека. Запоминание определяется как ключевой когнитивный процесс мозга, поскольку на его основе функционирует почти весь человеческий интеллект. Механизмы запоминания в литературе были тщательно исследованы как когнитивный процесс, а фундаментальные вопросы о том, как и когда в долговременной памяти создаются воспоминания, были логически объяснены [24, 25, 26, 28].

В психических процессах преобладают преимущественно два типа памяти. Первый – кратковременная память, второй – долговременная память. Кратковременная память также имеет другую терминологию, известную как «рабочая память». Кратковременная память – это система временного хранения и управления информацией, необходимой для выполнения некоторых конкретных задач, таких как обучение или рассуждение.

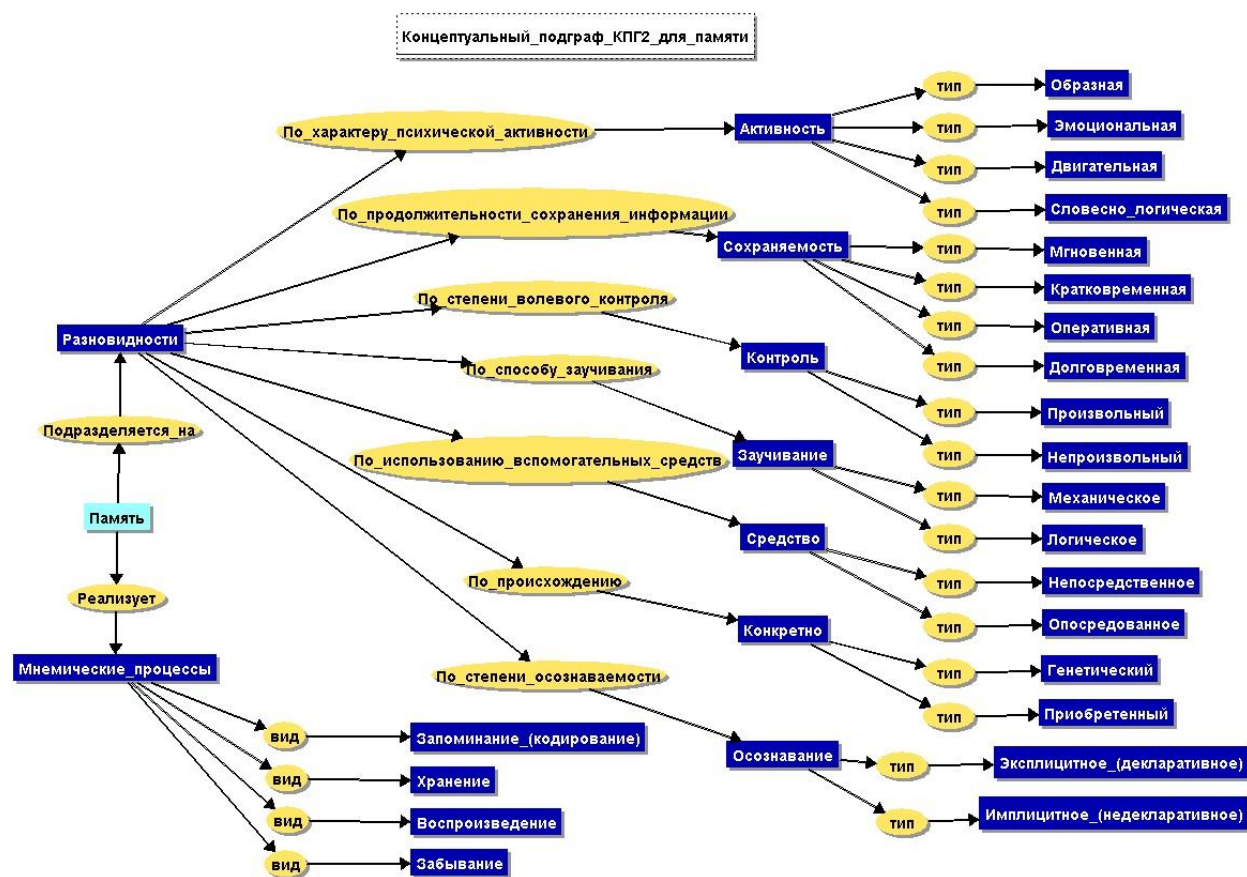


Рис. 5. Концептуальный подграф 2 когнитивного процесса «память» субъекта agile-методологии

Fig. 5. Conceptual subgraph 2 of the cognitive process “memory” of the subject of agile methodology

Долговременную память можно разделить на три категории. Эти три категории известны как процедурная память, семантическая память и эпизодическая память. Долговременную память можно определить как систему длительного хранения информации [29].

Познавательный психический процесс «мышление». Остановимся далее на обсуждении одного из важнейших процессов познавательной сферы – мышления. Как известно из курсов по психологии [24, 25, 26], мышление является познавательным психическим процессом, более сложным по сравнению с процессами внимания, ощущения

и восприятия. Мышление – это психический познавательный процесс отражения существенных связей и отношений предметов и явлений объективного мира. Человеческий мозг обрабатывает информацию из внешнего мира, упрощает, классифицирует и интерпретирует огромное количество ежедневно получаемой информации. Наше мышление формируется в течение всей жизни посредством систематического обучения (курсы, чтение) и бессистемного получения знаний (события из жизни, опыт работы).

На рис. 6 представлен концептуальный граф когнитивного процесса

«мышление», иллюстрирующий сложность этого психического процесса, принадлежащего к познавательной сфере

человека. Концептуальный граф составлен согласно источникам по психологии [24, 25, 26].

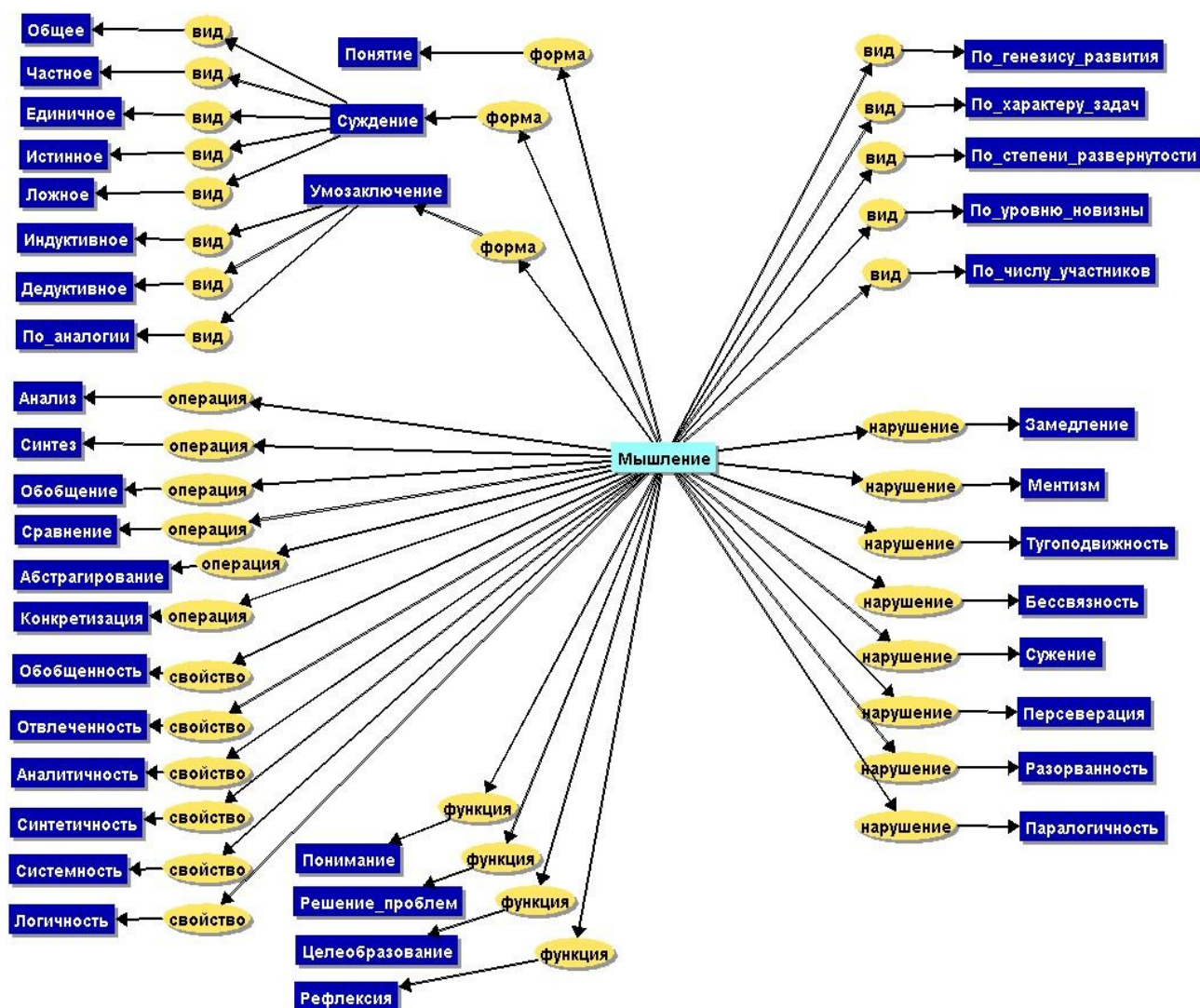


Рис. 6. Концептуальный граф когнитивного процесса «мышление» субъекта agile-методологии

Fig. 6. Conceptual graph of the cognitive process "thinking" of a subject of agile methodology

Для приложений когнитивной информатики к agile-методологии и программированию и вычислительной техники в частности большой интерес представляют операции мышления [30]:

- анализ: мыслительная операция разбиения сложного объекта на составляющие части;

- сравнение: мыслительная операция, заключающаяся в выявлении общности или различий предметов и явлений;

- абстрагирование: мыслительная операция, основанная на выделении основного признака предмета или явления и отвлечении от их несущественных признаков;

- синтез: мыслительная операция, состоящая в аналитико-синтетическом процессе перехода от частей к целому;
- обобщение: мыслительная операция, заключающаяся в объединении мнений и многих предметов или явлений по некоторому признаку;
- классификация: мыслительная операция деления объема понятия, исходя из его характеристик; термины «классификация» и «категоризация» часто рассматриваются как эквивалентные;
- конкретизация: мыслительная операция, противоположная абстракции; предполагает возвращение мысли от общего и абстрактного к конкретному с целью раскрыть содержание предмета или явления.

Многие из понятий, связанных с когнитивными мыслительными процессами, имеют аналоги в объектно-ориентированном проектировании.

Познавательный психический процесс «речь». Важной особенностью мышления является его неразрывная связь с речью. Концептуальный граф когнитивного процесса «речь» представлен на рис. 7.

Концептуальный граф на рис. 6 составлен согласно источникам по психологии [24, 25, 26]. Важной функцией речи является коммуникативная функция, выражающаяся в том, что язык и речь выступают в качестве важнейших средств общения людей, передачи информации и воздействия друг на друга в ходе общения.

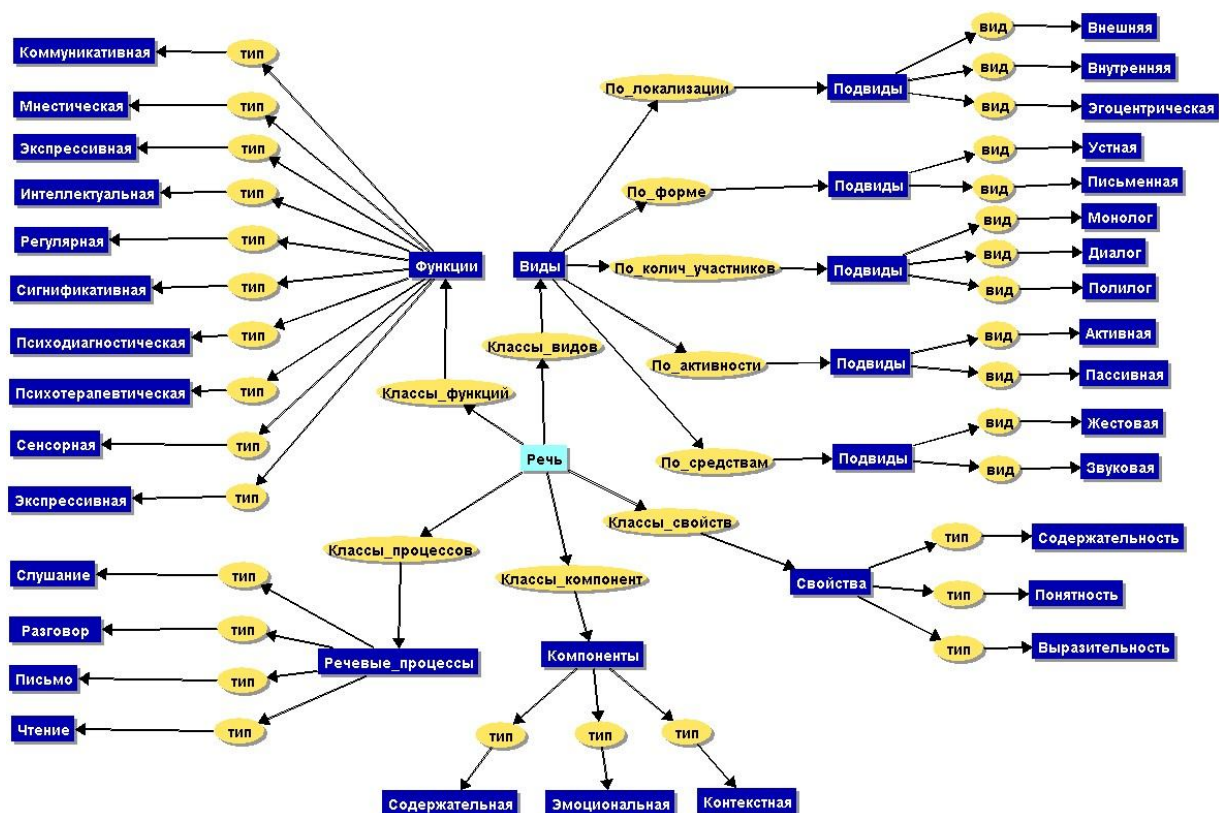


Рис. 7. Концептуальный граф когнитивного процесса «речь» субъекта agile-методологии

Fig. 7. Conceptual graph of the cognitive process “speech” of a subject of agile methodology

Речь в общем смысле по форме может быть устной или письменной, а по количеству участников речевой познавательный процесс реализуется в виде монолога, диалога или полилога, что реализуется в интеллектуальных чатах.

Концептуальная модель когнитивного пирингового P2P чата для работы в коллективном режиме; пиринговая инфраструктура чата. В традиционных чатах сообщения проходят через сервер, который может быть подвержен взлому или нелегальному мониторингу. В пиринговом P2P чате сообщения от-

правляются напрямую от одного пользователя к другому, поэтому P2P чаты могут работать быстрее и использовать меньше ресурсов, что делает их наиболее подходящими как для десктопных, так и для мобильных устройств.

P2P чат работает на основе децентрализованной сети узлов (рис. 8). Выбор пиринговой архитектуры P2P обусловлен тем, что она хорошо масштабируется. Добавление новых узлов не требует выполнения настройки на центральном сервере и не требует его наличия [31].

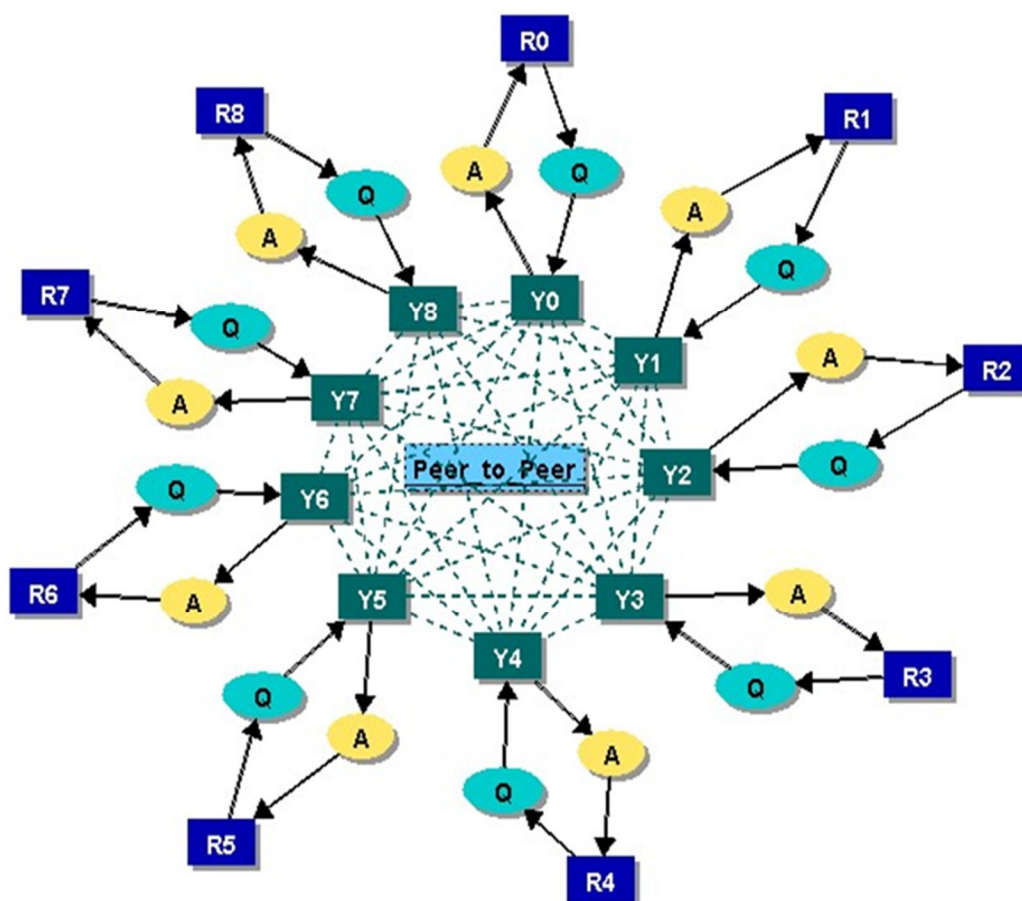


Рис. 8. Концептуальная модель когнитивной пиринговой инфраструктуры для организации коллективной работы над проектами на основе agile-методологии

Fig. 8. Conceptual model of a cognitive peering infrastructure for organizing teamwork on projects based on agile methodology

Пиринговая связь узлов соответствует логической структуре сетевых коммуникаций в компьютерной сети; физическая структура может быть реализована в глобальной или локальной сети с коммуникациями типа «сильно-связный граф», не обязательно полный. На рис. 8 символами $Y_0, Y_1, \dots, Y_8$ обозначены пиринговые узлы, символами $R_0, R_1, \dots, R_9$ – когнитивные ресурсы инфраструктуры для организации коллективной работы над проектами на основе agile-методологии, символами Q и A обозначены связи для передачи во-

просов и ответов соответственно. Пунктирными линиями обозначены логические связи пиринговых узлов.

Концептуальная модель отдельной когнитивной ячейки. Интеллект каждой нейронной сети в данной инфраструктуре следует считать коллективным, так как ее обучение сводится к накоплению профессиональных знаний и опыта многих людей. На рис. 9 представлена концептуальная модель отдельной когнитивной ячейки R распределенного коллективного интеллекта. Модель построена с использованием редактора CharGer [15].

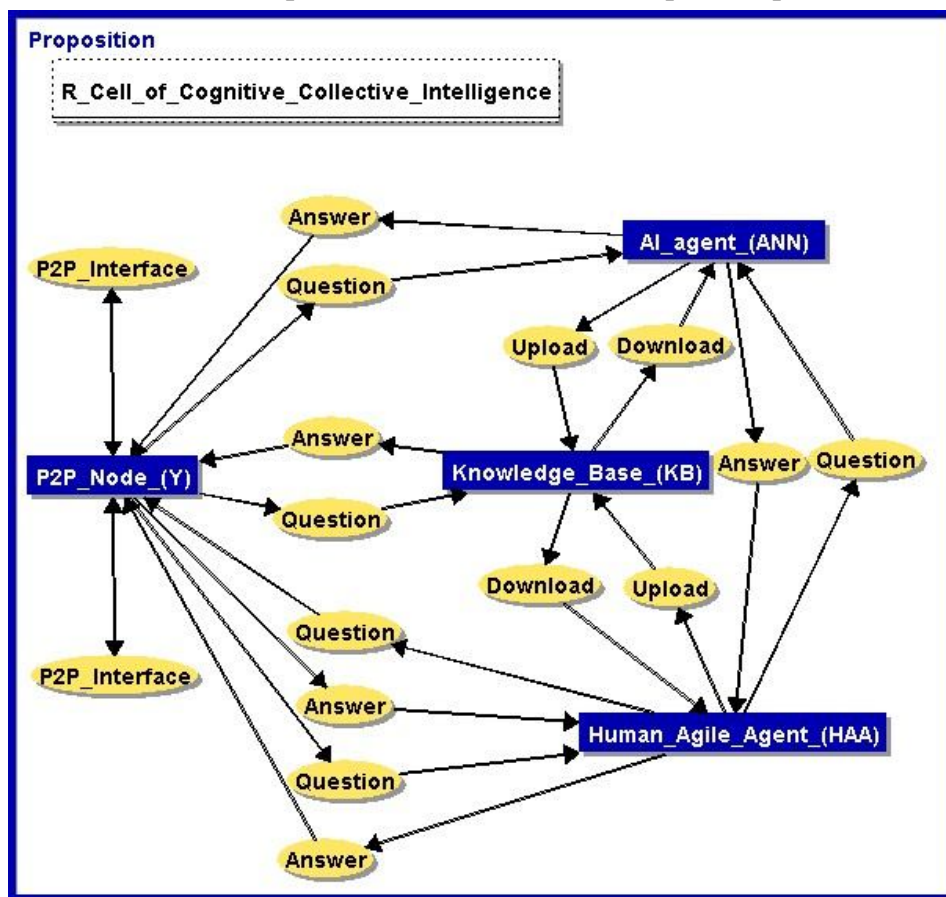


Рис. 9. Концептуальная модель ячейки R когнитивного коллективного интеллекта, объединяющая элементы собственно коллективного интеллекта agile-агентов (Human Agile Agent – HAA-агентов), с искусственным интеллектом AI-агентов на базе нейронной сети ANN

Fig. 9. Conceptual model of cell R of cognitive collective intelligence, combining elements of the collective intelligence of agile agents (Human Agile Agents – HAA-agents) with the artificial intelligence of AI agents based on the ANN neural network

Здесь имя Human Agile Agent (HAA-агент) присвоено участнику-агенту (человеку) agile-команды, Artificial Intelligent Agent (AI-агент – интеллектуальный агент на основе искусственной нейронной сети ANN), Knowledge Base (KB) – база знаний, реализуемая на основе системы управления базами данных MongoDB. Через коммуникационные интерфейсы каждый из трех упомянутых объектов связан с собственным узлом пиринговой сети P2P_Node_Y, а через него – со всеми остальными узлами и интеллектуальными ячейками. Через связи Question и Answer передается фрагменты тегированной оценки текстовой информации чата по всей сети, а через связи Upload и Download – фрагменты информации, выгружаемой или загружаемой в базу знаний от agile-агента или AI-агента. Agile-агент и AI-агент общаются друг с другом напрямую.

Результаты и их обсуждение

Достигнутая цель исследования. Когнитивная обработка информации основана на идее моделирования процессов человеческого мышления в компьютерных системах. В рассматриваемой системе это включает в себя обработку естественного языка, распознавание письменной речи, связанные с пониманием информации путем программной имитации человеческого интеллекта. Принятая концепция предполагает реализацию коллективного интеллекта не искусственным путем, а путем организации удобного взаимодействия участни-

ков интеллектуального чата. Искусственный интеллект реализуется при помощи первоначально обученной и обучаемой далее нейронной сети; в статье определены условия, позволяющие интеллект искусственной нейронной сети рассматривать как коллективный.

Предполагается, что искусственные нейронные сети доступны всем участникам agile-команды и реализуют функции коллективного искусственного интеллекта при условии, что при их обучении использован профессионализм и опыт работы человека в естественной социальной или профессиональной среде. Мыслительные операции, такие как анализ, разбиение (модуляризация), сравнение, абстрагирование, синтез, обобщение, классификация, конкретизация, известные из курсов общей психологии, интерпретируются не только как результат мыслительной деятельности человека, но и как функционал компьютерной программы. Аналогично реализуются некоторые элементы процессов познавательной сферы «память» и «речь».

Реализованная архитектура и программное обеспечение когнитивного коллективного интеллекта. Для написания P2P чата на языке Python потребовались следующие библиотеки: библиотеки для создания и управления графическим пользовательским интерфейсом (GUI) в приложениях для интерактивного взаимодействия с пользователем; библиотека, позволяющая программам на языке Python взаимодействовать с сетевыми интерфейсами; библиотека для созда-

ния многопоточных приложений; библиотека программ-адаптеров для подключения к базе данных MongoDB и последующего создания, чтения, обновления и удаления данных, управления транзакциями и обработки сложных запросов [32, 33, 34].

Узел P2P сети, ставший по приоритету хостом, позволяет другому пользователю подключиться к чату напрямую, без использования промежуточного сервера. В функциях сохранения данных необходимо реализовать два потока: один для отправки сообщений и второй для получения. Таким образом, приложение сможет одновременно принимать и отправлять сообщения.

Разработан программный интерфейс с нейросетью, позволяющий подключаться клиентам-экспертам к серверу нейросети (AI-агенту) другого пользователя, а так же выставлять оценки на ответы AI-агента.

Созданная система общения с AI-агентом – искусственной нейросетью организует подключение пользователей к серверу нейросети каждого пользователя пиринговой P2P сети, а также позволяет оценивать ответы AI-агента и реплики пользователей.

А) Интерфейс front-end «пользователь – чат-бот». В разработке интерфейса переднего плана *front-end* с пользователем-участником интеллектуального чата (чат-бота) использовалась популярная JavaScript-библиотека React [35]. Она позволяет разрабатывать интерактивные приложения, реагирующие

на действия пользователя без необходимости перезагрузки страницы.

Рассмотрим более подробно описание интерфейсных компонентов интеллектуального чат-бота, разработанного с использованием библиотеки React. Интерфейс переднего плана состоит из нескольких ключевых компонент, включая BotChat, MessageArea, LoadingAnimation и другие вспомогательные компоненты.

Компонента BotChat является основной и служит контейнером для всего чата. Она отвечает за управление состоянием чат-бота, включая хранение сообщений, обработку ввода пользователя и отправку сообщений на сервер.

Компонента MessageArea отображает сообщения чат-бота. Она принимает массив сообщений и разделяет их на сообщения пользователя и сообщения чат-бота.

Компонента LoadingAnimation реализует визуальный индикатор загрузки, который можно отображать во время выполнения асинхронных операций, например, при ожидании ответа от сервера. Она содержит графический элемент, который показывает пользователю, что происходит процесс загрузки. Эта компонента используется в BotChat для отображения индикатора загрузки (в форме анимации) при отправке сообщения, представляя обратную связь о состоянии системы.

Компонента Sidebar отвечает за отображение боковой панели в интерфейсе чат-бота. Эта панель включает в свой состав список доступных диалогов

(историй чатов) и кнопку для доступа к настройкам подключения. Панель может быть раскрыта или скрыта пользователем.

Б) *Интерфейс back-end_1 «чат-бот – нейросеть»*. Интерфейс заднего плана «чат-бот – нейросеть» *back-end_1* разработан при помощи инструментария Flask –легковесного микрофреймворка для создания веб-приложений на основе языка Python [36]. Он хорошо подходит для разработки интерфейса приложений API, который может обрабатывать запросы от интерфейса переднего плана, работать с данными и возвращать результаты.

Основные элементы интерфейса заднего плана *back-end_1*:

- функция `handle_messages`: это обработчик для маршрута `/chat`, извлекающий данные из запроса, обрабатывающий их и возвращающий ответ в формате JSON;

- функция обработки `process_message_with_neural_network`: это функция, которая обращается к нейросети (выбирается опционально) для генерации ответа на сообщение пользователя;

- функция формирования ответа `response_generation_function` создает словарь с содержимым ответа и идентификатором беседы для отправки обратно пользователю;

- функция для оценки сообщений `rate_message()` `'/rate'`: это обработчик, позволяющий пользователям оценивать ответы чат-бота, отправляя `id`

пары сообщений и булево значение рейтинга, что позволяет улучшить качество ответов чат-бота за счет обучения на основе обратной связи от пользователей;

- функция для получения списка диалогов `get_conversations()` `'/conversations'` предназначена для получения списка всех доступных диалогов или бесед; используется для отображения истории диалогов в пользовательском интерфейсе;

- функция для получения сообщений по `id` диалога `get_messages_by_conversation(conversation_id)` `'/messages/'`

- `<conversation_id>` – это обработчик, возвращающий все сообщения в рамках указанного диалога, позволяя пользователям просматривать историю общения;

- функция `save_rating` предназначена для сохранения рейтинга в базу данных; она получает оценку, выставленную пользователем на ответ Ассистента и сохраняет ее в базу данных с привязкой по `id` к сообщению.

В) *Интерфейс back-end_2 «чат-бот – база данных»*. Интерфейс заднего плана *back-end_2* «чат-бот – база данных» реализован для сопряжения узла пиринговой сети с системой управления базами данных (СУБД) MongoDB. СУБД MongoDB [34] – это документо-ориентированная система управления базами данных, не требующая описания схем таблиц, классическая NoSQL-система, использующая JSON-подобные документы. MongoDB подходит для реги-

страции и хранения информации о событиях, реализации систем управления документами и контентом, организации мониторинга, хранения веб-страниц.

Рассмотрим ключевые аспекты использования (СУБД) MongoDB в приложении на основе предоставленных фрагментов кода:

А) Подключение к MongoDB. Подключение к базе данных MongoDB осуществляется через MongoClient, предоставляемый пакетом pymongo. В коде это выглядит так:

```
from pymongo import MongoClient
client = MongoClient(
    "mongodb://localhost:27017/")
db = client["Agile-agent"]
```

Здесь создается подключение к локальному серверу MongoDB (localhost на порту 27017), и выбирается база данных agile-агента.

Б) Работа с коллекциями. В приложении используются две коллекции MongoDB: messages для хранения сообщений и ratings для хранения оценок пользователей. Коллекция сообщений (messages): содержит сообщения пользователей и agile-агента. Каждое сообщение включает в себя поля, такие как role (роль отправителя), content (содержание сообщения) и _id (уникальный идентификатор сообщения, который также используется как pair_id для оценок). Коллекция оценок (ratings) содержит оценки пользователей для сообщений agile-агента. Каждая запись включает pair_id (ссылается на идентификатор сообщения ассистента в коллекции

messages), rating (оценка сообщения) и username (имя пользователя, который оставил оценку).

В) Примеры операций с базой данных:

– добавление сообщения: когда agile-агент отправляет сообщение, оно сохраняется в коллекцию messages с помощью метода insert_one:

```
message_document = {
    "_id": res["pair_id"],
    "conversation_id": conv_idS,
    "user": message,
    "assistant": res["content"],
}
messages_collection.insert_one(message_document)
```

– добавление оценки: оценка пользователя для сообщения ассистента добавляется в коллекцию ratings:

```
ratings_collection.insert_one({
    "pair_id": pair_id,
    "rating": rating,
    "username": username,
})
```

– получение сообщений по идентификатору разговора: для получения всех сообщений, связанных с определенным разговором, используется метод find с сортировкой по полю _id для сохранения хронологического порядка поступления сообщений:

```
messages = messages_collection.find(
    {"conversation_id": conversation_id},
).sort("_id", 1)
```

Г) Список оценочных когнитивных тегов из программы:

```
// Список тегов «эмодзи»
```

```
const tagsWithEmojis = [
  { tag: "#Внимание", emoji: "___" },
  { tag: "#Восприятие", emoji: "___" },
  { tag: "#Любопытство", emoji: "___" },
  { tag: "#Удивление", emoji: "___" },
  { tag: "#Заинтересованность", emoji:
    "___" },
  { tag: "#Замечность", emoji: "___" },
  { tag: "#Оптимизм", emoji: "___" },
  { tag: "#Радость", emoji: "___" },
  { tag: "#Эйфория", emoji: "___" },
  { tag: "#Сомнение", emoji: "___" },
  { tag: "#Озадаченность", emoji: "___" },
  { tag: "#Возбуждение", emoji: "___" },
  { tag: "#Тревога", emoji: "___" },
  { tag: "#Неудовольствие", emoji: "___" },
  { tag: "#Страх", emoji: "___" },
  { tag: "#Ужас", emoji: "___" },
  { tag: "#Злость", emoji: "___" },
  { tag: "#Стресс", emoji: "___" },
  { tag: "#Аффектация", emoji: "___" },
  { tag: "#Скука", emoji: "___" },
  { tag: "#Утомление", emoji: "___" },
  { tag: "#Апатия", emoji: "___" },
  { tag: "#Узнетенность", emoji: "___" },
];
```

Конкретные пиктограммы-теги и соответствующие им веса выбираются согласованно участниками agile-проекта. Графические пиктограммы и порядок их расположения в палитре подсказок могут быть установлены опционально.

Фрагменты диалога в процессе создания agile-командой и agile-агентами текстового документа. Каждому из членов agile-команды предоставлен равноправный доступ к ресурсам инфраструктуры. Более высокий приоритет может быть присвоен руководителю или администратору интеллектуального

чата. В режиме «Хост» (рис. 10) участник может вносить свои предложения, добавлять новый материал и ставить оценки. В режиме «Клиент» участник может только просматривать записи и выставять оценки. Очередность при выборе режима устанавливается опционально: по кольцу, по приоритету или случайным образом в пределах выделенного интервала времени. Если в agile-команде выделен руководитель, то ему всегда предоставляется режим «Хост» по окончании работы других участников.

Далее приведены фрагменты интеллектуального диалога. На рис. 11 проиллюстрировано начало диалога по инициативе AI-агента – программы на основе искусственной нейронной сети. Выдана вводная фраза и палитра инструментов для когнитивных оценок участников интеллектуального диалога. На оценку Agile-агента следует подтверждение (рис. 12). Фрагмент с метаинформацией о хранимых в базе оцененных знаниях дан на рис. 13. За хранение отвечает база знаний, управляемая СУБД MongoDB.

Фрагмент работы, представленный на рис. 14, иллюстрирует вопрос от Agile-агента #user1 к AI-агенту #ann: «#user1 to #ann». Согласно выбранной опции, AI-агент отвечает всем Agile-агентам: «#ann to #all». Оценку и ответ «#user1 #узнать #применить #agile #любопытство» в данном режиме выставляет Agile-агент #user1, задавший вопрос, выражая при этом «любопытство».

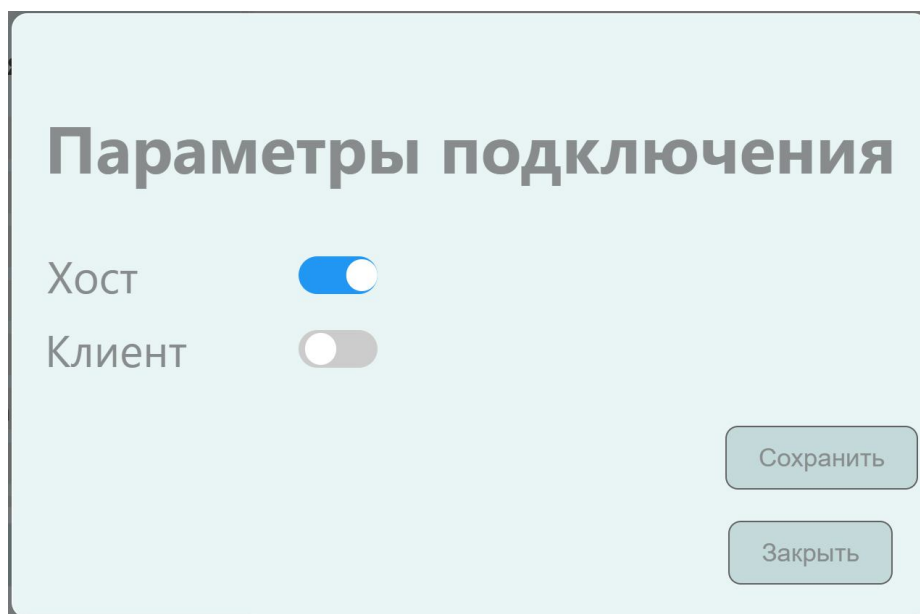


Рис. 10. Выбор функциональности узла интеллектуального пирингового чата

Fig. 10. Selecting the functionality of the smart peer-to-peer chat node

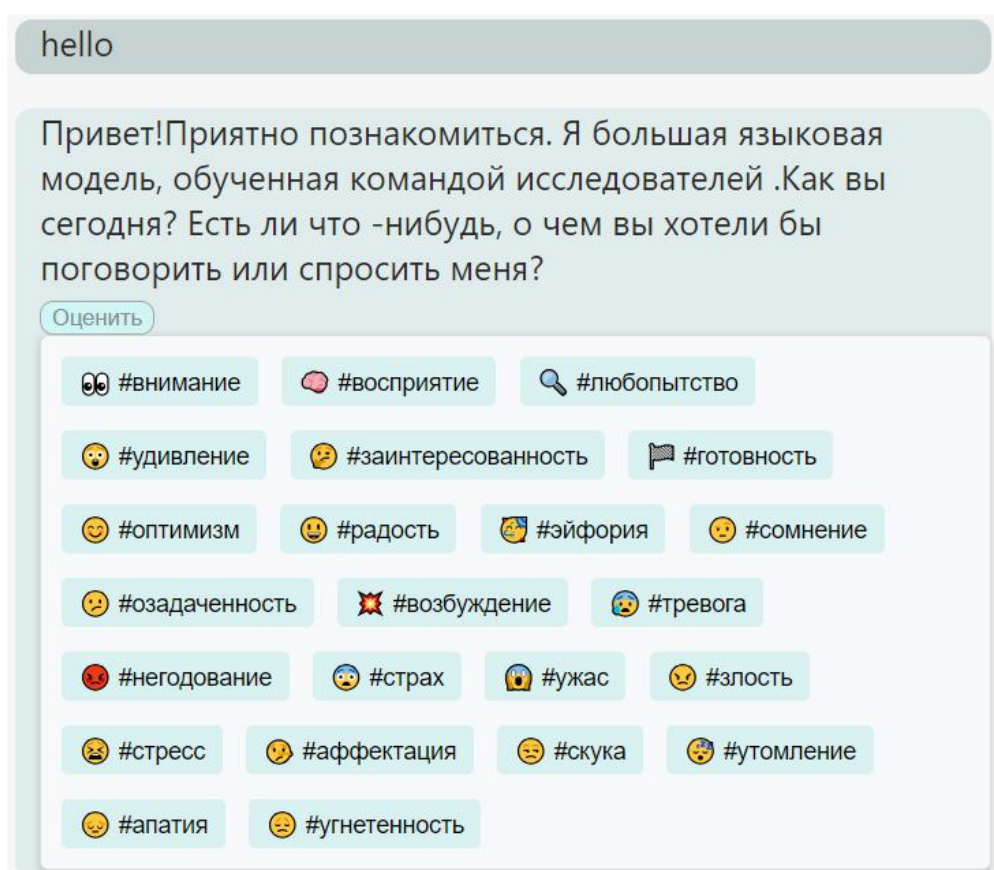


Рис. 11. Начало диалога: фрагменты текста от AI-агента и панель когнитивных оценок от Agile-агента

Fig. 11. Start of dialogue: text fragments from the AI-agent and a panel of cognitive assessments from the Agile-agent

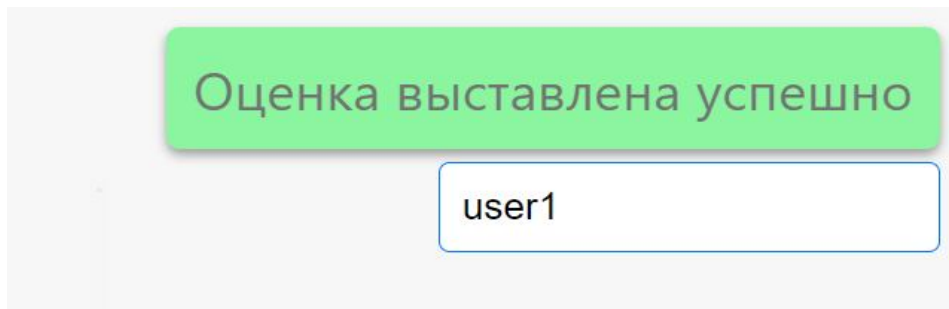


Рис. 12. Подтверждение принятия оценки

Fig. 12. Confirmation of acceptance of the assessment

<pre>_id: ObjectId('660172b76631cd87f7c1cefb') pair_id: "65ded9d08e5db804442bd047" rating: "#эйфория" username: ""</pre>
<pre>_id: ObjectId('660188ca5938045013f99485') pair_id: "660176630f3679fb61b2e839" rating: "#готовность" username: "пользователь1"</pre>
<pre>_id: ObjectId('66018a4b5938045013f99486') pair_id: "660165064bf1151af1e67b7b" rating: "#ужас" username: "##sssss"</pre>
<pre>_id: ObjectId('66018a6a5938045013f99487') pair_id: "660165064bf1151af1e67b7b" rating: "#заинтересованность" username: "#sssss"</pre>

Рис. 13. Фрагмент с метаинформацией о хранимых в базе оцененных знаниях

Fig. 13. Fragment with meta-information about the assessed knowledge stored in the database

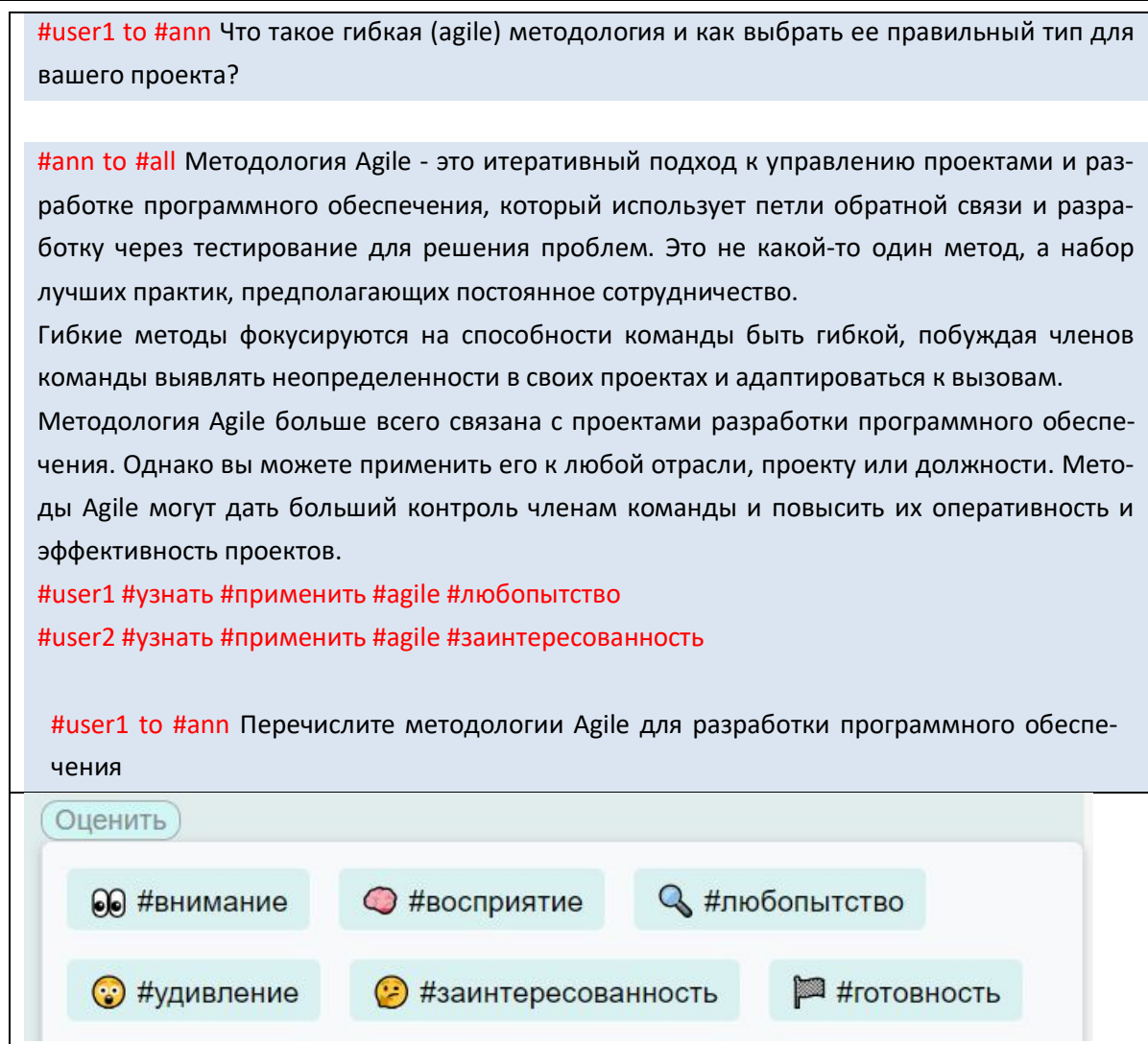


Рис. 14. Фрагмент диалога Agile-агентов #user1 и #user2 с AI-агентом #ann

Fig. 14. Fragment of dialogue between Agile-agents #user1 and #user2 with AI-agent #ann

Согласно этой оценке, ответ AI-агента #ann (то есть искусственной нейронной сети) может быть модифицирован агентом #user1 и сохранен в базе знаний. Аналогичные действия выполняет и Agile-агент #user2: «#user2 #узнать #применить #agile #заинтересованность», выражая «заинтересованность» в данном варианте ответа, что приводит к соответствующим действиям.

Рекомендация по отбору членов agile-команды. В работе [37] был пред-

ложен и реализован программно интеллектуальный агентный модуль для определения семантической близости текстовой информации с использованием технологий машинного обучения. Этим модулем рекомендуется воспользоваться для отбора кандидатов в члены agile-команды по конкретному проекту с целью формирования коллективного естественного интеллекта agile-агентов. Для этого обученная искусственная нейронная сеть определяет семантическую

близость документа с требованиями к участнику при учете поручаемой ему роли к документу-досье кандидата на эту роль.

Коллективная работа со структурированными знаниями, представленными концептуальными графами. В процессе работы члены agile-команды могут обмениваться не только когнитивной информацией, но и структурированной и формализованной информацией, основанной на знаниях, правилах и семантике предметной области. Основой графического представления структур психических процессов в настоящей работе являются концептуальные графы (КГ) и более сложные структуры – семантические сети (СеС), что позволило визуализировать формулы первопорядковой логики предикатов [38, 39].

Данная визуализация здесь касается только бинарных предикатов. В книге [38] показано, как можно переинтерпретировать n -арный предикат в конъюнкцию бинарных предикатов. Дуги концептуального графа связывают имена бинарных предикатов с их аргументами, которые используются для представления атрибутов, событий и состояний. Узел концептуального графа, указывающий имя предиката, называется связывающим узлом, а связываемые им узлы называются узлами-концептами. Концептуальные графы с концептами-событиями называются сценариями и используются для представления динамики предметной области.

Участники agile-команды получают возможность коллективного редактирования концептуального графа, передавая по пиринговой сети его представление в формате XML. Демонстрационный пример построения концептуального графа (сценария) в интеллектуальном чате пиринговой сети для условного agile-агента, выполняющего роль генератора идей, представлен на рис. 15. Опционально возможен также переход от концептуального графа к фактам и правилам языка Пролог:

```

Возраст('Владимир', '25_лет').
должность('Владимир', программист).
конец(событие_1, '16_00').
конец(событие_2, '17_00').
конец(событие_3, '18_00').
место(событие_1, лаборатория).
место(событие_2, дом).
место(событие_3, спортзал).
начало(событие_1, '8_00').
начало(событие_2, '16_00').
начало(событие_3, '17_00').
роль('Владимир', генератор_идей).
след(событие_1, событие_2).
след(событие_2, событие_3).
участник(событие_1, 'Владимир').
участник(событие_2, 'Владимир').
участник(событие_3, 'Владимир').

```

Обсуждение перспектив использования результатов работы. В настоящее время многие ученые предполагают, что когнитивная и поведенческая нейронаука, изучающая функции мозга высокого уровня (исследование познавательной и эмоционально-волевой сфер, психических свойств, состояний и образований), станет наиболее важным компонентом в моделировании мозга.

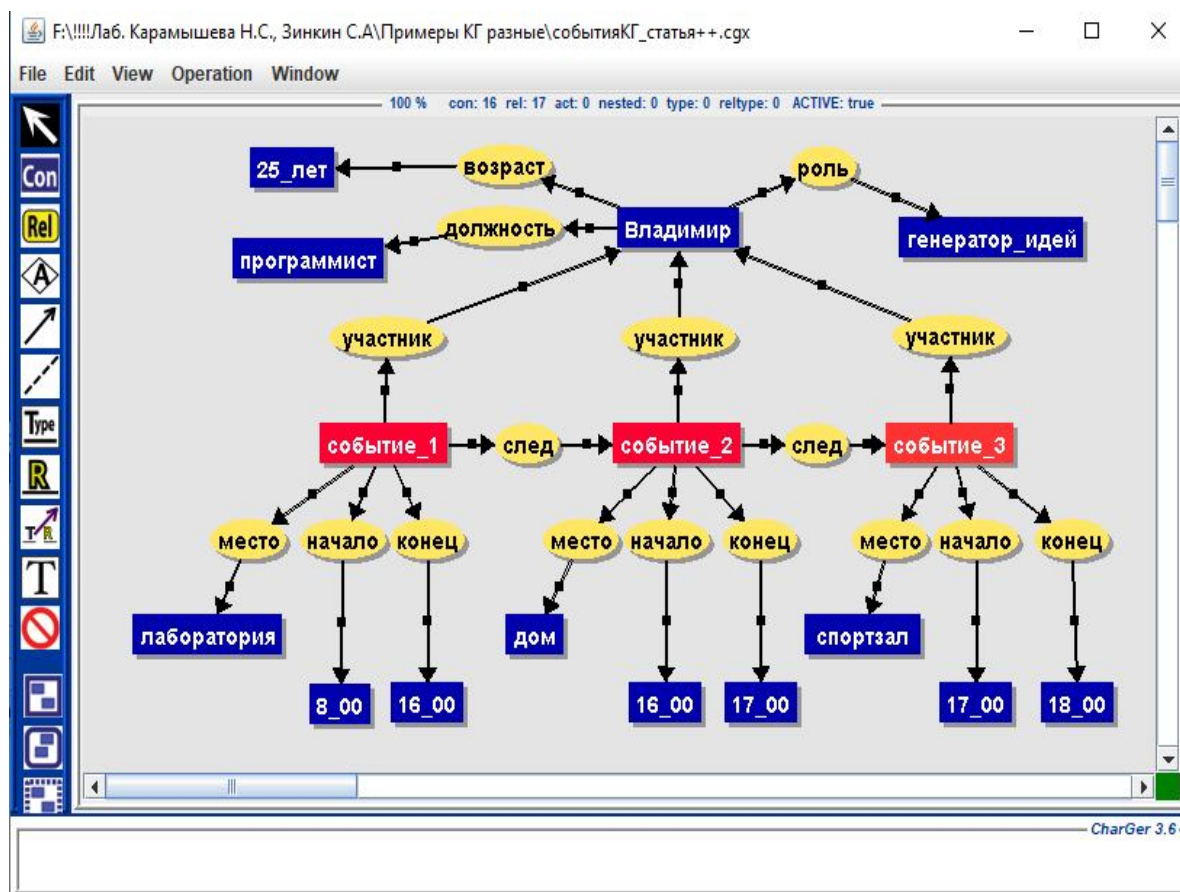


Рис. 15. Демонстрационный пример концептуального графа (сценария), подготовленного в результате коллективной работы участниками agile-команды

Fig. 15. Demonstration example of a conceptual graph (scenario) prepared as a result of collective work by members of an agile team

Однако чтобы это произошло, необходимо осуществить многоуровневую реконструкцию и моделирование мозга: то есть сначала нужно организовать саму платформу (модель нижних уровней мозга) в рамках проекта «Человеческий мозг» – «Human Brain Project» [9]. Без такой организации названия для психических процессов личности могут рассматриваться как красивые метафоры, имеющие опосредованное отношение к личности и используемые для усиления смыслового содержания и вызова эмоциональной реакции пользователя. Однако уже на основании полученных результа-

тов в области создания искусственных когнитивных архитектур и соответствующего программного обеспечения можно считать, что есть перспективы для скорого воплощения отдельных когнитивных теорий [40]. С другой стороны, отдельные высокоуровневые функции мозга могут рассматриваться как мнемонические указания на то, как трактуются логические (не модальные) модели процессов познавательного поведения человека и его «аватара», воплощенного в виде программы для компьютера или киберфизической системы.

Выводы

Предложена, обоснована и реализована когнитивная пиринговая инфраструктура, позволяющая улучшить условия для коллективной работы над проектами на основе agile-методологии. Когнитивная архитектура определяется как структура, обеспечивающая реализацию антропоморфных и нейроморфных функций в естественных или искусственных системах. Предлагаемый подход основан на организации взаимодействия коллективного интеллекта членов agile-команды и искусственного интеллекта, представленного обученными искусственными нейронными сетями. При формировании agile-команды предлагается учитывать познавательную сферу в структуре психических процессов когнитивного, то есть способного к познавательной деятельности агента-человека.

Система реализована на основе пиринговой компьютерной сети, обеспечивающей коммуникации между всеми искусственными и естественными участниками когнитивного познавательного процесса в процессе проектирования. Предложена концептуальная модель ячейки когнитивного коллективного интеллекта, объединяющая элементы собственно коллективного интеллекта agile-агентов с коллективным искусственным интеллектом агентов на базе нейронных сетей. При экспертной оценке качества отдельных этапов проектирования предложено использовать тегирование на основе эмоционально-волевых и мотивационных психических процессов личностей. Принятая концепция предполагает реализацию коллективного интеллекта не только искусственным путем, но и путем организации удобного взаимодействия участников интеллектуального чата.

Список литературы

1. Manifesto for Agile Software. URL: Development <http://www.agilemanifesto.org/> (дата обращения 01.03.2024).
2. Фарли Д. Современная программная инженерия. Программное обеспечение в эпоху эджайла и непрерывного развертывания. СПб.: Питер, 2023. 288 с.
3. Форд Н., Парсонс Р., Куа П. Эволюционная архитектура. Поддержка непрерывных изменений. СПб.: Питер, 2019. 272 с.
4. Федотова О. С. Когнитивное моделирование как метод познания и изучения объекта в научных исследованиях // Филологические науки. Вопросы теории и практики. 2015. № 4 (46): в 2 ч. Ч. II. С. 199-202.
5. Dąbrowska E. Cognitive Linguistics' seven deadly sins // Cognitive Linguistics. 2016. Vol. 27, no. 4. P. 479-491. <https://doi.org/10.1515/cog-2016-0059>.
6. Краткий словарь когнитивных терминов / под ред. Е.С. Кубряковой. М.: Изд.-во МГУ, 1996. 245 с.

7. Маслова В. А. Введение в когнитивную лингвистику. Изд-е 5-е. М.: Изд.-во Флинта; Наука, 2018. 296 с.
8. Langley P., Laird J. E., Rogers S. Cognitive architectures: Research issues and challenges // Cognitive Systems Research. June 2009. Vol. 10, is. 2. P. 141-160.
9. Human Brain Project. URL: <https://www.humanbrainproject.eu/en/> (дата обращения 1.03.2024).
10. Access to Neuromorphic Computing. URL: <https://www.humanbrainproject.eu/en/#neuromorphiccomputing-220623-10> (дата обращения 01.03.2024).
11. Agile Project Management: Best Practices and Methodologies. URL: <https://www.altexsoft.com/whitepapers/agile-project-management-best-practices-and-methodologies> (дата обращения 01.03.2024).
12. Agile Project Management Methods. URL: <https://www.altexsoft.com/infographics/agile-project-management-methods> (дата обращения 01.03.2024).
13. Никулина И. В. Эмоциональный интеллект: инструменты развития. Самара: Изд-во Самарского государственного университета, 2022. 82 с.
14. Гоулман Д. Эмоциональный интеллект. М.: АСТ, 2009. 478 с.
15. Delugach H. S. Implementation and Visualization of Conceptual Graphs in CharGer // International Journal of Conceptual Structures and Smart Applications. 2014. 2(2). P. 1-19. DOI:10.4018/IJCSSA.2014070101.
16. Корниенко В. И. Командообразование. М.: Изд-во Юрайт, 2021. 291 с.
17. Микони С.В. Подход к оцениванию уровня интеллектуальности информационной системы // Онтология проектирования. 2023. Т.13, №1(47). С.29-43. <https://doi.org/10.18287/2223-9537-2023-13-1-29-43>.
18. Метод Дельфи. URL: <https://wiki.loginom.ru/articles/delphi-technique.html> (дата обращения 01.03.2024).
19. Веприкова М.Я. Коллективные методы принятия решений в современных организациях, их эффективность // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2018. Т. 8, № 9А. С. 353-360.
20. Быльева Д. С. Коллективный и искусственный интеллект // Вестник Мининского университета. 2023. Т. 11, № 2. С. 13. <https://doi.org/10.26795/2307-1281-2023-11-2-13>.
21. Белбин Р. М. Типы ролей в командах менеджеров: [пер. с англ.]. М.: НИРО, 2003. 232с.
22. Ученые описали особенности появления коллективного ИИ. URL: <https://rspectr.com/novosti> (дата обращения 01.03.2024).
23. David Ha, Yujin Tang. Collective Intelligence for Deep Learning: A Survey of Recent Developments. Cornell University. Computer Science. Neural and Evolutionary Computing. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.14377>.
24. Маклаков А. Г. Общая психология. СПб.: Питер Пресс, 2017. 582 с.
25. Кулагина И. Ю., Колюцкий В. Н. Психология развития и возрастная психология: полный жизненный цикл развития человека. М.: Академический проект, 2020. 420 с.

26. Психология / под общ. ред. В. Н. Дружинина. СПб.: Издательский дом «Питер», 2009. 652 с.
27. Бережливое мышление. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Lean_thinking (дата обращения 1.03.2024).
28. Wang Y., Wang Y. Cognitive Informatics Models of the Brain // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 2006. 36(2). P. 203-207.
29. Wang Y., Wang Y., Patel S., Patel D. A Layered Reference Model of the Brain (LRMB) // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics (C) 2006. 36(2). P. 124-133.
30. Современные образовательные технологии: Психология и педагогика. Познавательные психические процессы. Мышление и интеллект. URL: https://intuit.ru/studies/professional_retraining/16257/courses/707/lecture/16756?page=2&ysclid=lvv7vfr93p274714474 (дата обращения 01.03.2024).
31. Deciphering P2P: The Basics and Benefits of Peer-to-Peer Technology. URL: <https://www.cachefly.com/news/deciphering-p2p-the-basics-and-benefits-of-peer-to-peer-technology> (дата обращения 01.03.2024).
32. Чан У. Python: создание приложений. Библиотека профессионала. М.: Вильямс, 2015. 816 с.
33. Князева М. Д., Карамышева Н. С., Григорьева Д. Д. От алгоритма к программе и искусственному интеллекту. С примерами на языках Python и Prolog / под ред. д-ра техн. наук, проф. С. А. Зинкина. Пенза: Изд-во ПГУ, 2024. 412 с.
34. MongoDB: The Developer Data Platform. URL: <https://www.mongodb.com> (дата обращения 01.03.2024).
35. React. JavaScript-библиотека для создания пользовательских интерфейсов. URL: <https://ru.react.js.org> (дата обращения 01.03.2024).
36. Создание веб-приложения с использованием Python Flask. URL: <https://timeweb.cloud/tutorials/python/sozдание-veb-prilozheniya-s-ispolzovaniem-python-flask> (дата обращения 01.03.2024).
37. О программной реализации когнитивных интероперабельных агентно-базированных систем / Н.С. Карамышева, А.С. Милованов, М.А. Митрохин, С.А. Зинкин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №1. С. 100-122. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-100-122>.
38. Логический подход к искусственному интеллекту: от классической логики к логическому программированию / А. Тейз, П. Грибомон, Ж. Луи [и др.]. М.: Мир, 1990. 429 с.
39. Sowa J. F. Knowledge Representation: Logical, Philosophical, and Computational Foundations. Brooks Cole Publishing Co., Pacific Grove, CA, 2000. 594 p.
40. Unified Theories of Cognition. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/ Unified_Theories_of_Cognition](https://en.wikipedia.org/wiki/Unified_Theories_of_Cognition) (дата обращения 01.03.2024).

References

1. Manifesto for Agile Software. Available at: Development <http://www.agilemanifesto.org/> (accessed: 01.03.2024).
2. Farli D. Modern software engineering. Software in the age of agile and continuous deployment]. St. Petersburg: Piter; 2023. 288 p.
3. Ford N., Parsons R., Kua P. Evolutionary architecture. Support for continuous change. St. Petersburg: Piter; 2019. 272 p. (In Russ.).
4. Fedotova O. S. Cognitive modeling as a method of cognition and study of an object in scientific research. *Filologicheskie nauki. Voprosy teorii i praktiki = Philological Sciences. Questions of theory and practice*. 2015; 4(2): 199-202 (In Russ.).
5. Dąbrowska E. Cognitive Linguistics' seven deadly sins. *Cognitive Linguistics*. 2016; 27 (4): 479-491. <https://doi.org/https://doi.org/10.1515/cog-2016-0059>.
6. Kubryakova E.S. Brief dictionary of cognitive terms. Moscow: MGU Publ.: 1996. 245 p. (In Russ.).
7. Maslova V. A. Introduction to Cognitive Linguistics. Moscow: Flinta; Nauka: 2018. 296 p. (In Russ.).
8. Langley P., Laird J. E., Rogers S. Cognitive architectures: Research issues and challenges. *Cognitive Systems Research*. 2009, 10(2): 141-160.
9. Human Brain Project. Available at: <https://www.humanbrainproject.eu/en/> (accessed: 01.03.2024).
10. Access to Neuromorphic Computing. Available at: <https://www.humanbrainproject.eu/en/#neuromorphiccomputing-220623-10> (accessed: 01.03.2024).
11. Agile Project Management: Best Practices and Methodologies. Available at: <https://www.altexsoft.com/whitepapers/agile-project-management-best-practices-and-methodologies> (accessed: 01.03.2024).
12. Agile Project Management Methods. Available at: <https://www.altexsoft.com/in-fographics/agile-project-management-methods> (accessed: 01.03.2024).
13. Nikulina I. V. Emotional intelligence: development tools. Samara: Izd-vo Samarskogo gosudarstvennogo universiteta; 2022. 82 p. (In Russ.).
14. Goulman D. Emotional intellect. Moscow: ACT; 2009. 478 p. (In Russ.).
15. Delugach H. S. Implementation and Visualization of Conceptual Graphs in CharGer. *International Journal of Conceptual Structures and Smart Applications*. 2014; 2 (2): 1-19. DOI:10.4018/IJCSSA.2014070101.
16. Kornienko V. I. Team building. Moscow: Yurajt; 2021. 291 p. (In Russ.).
17. Mikoni S.V. An approach to assessing the level of intelligence of an information system. *Ontologiya proektirovaniya = Design Ontology*. 2023; 13(1): 29-43 (In Russ.). <https://doi.org/10.18287/2223-9537-2023-13-1-29-43>.

18. Delphi method. (In Russ.). Available at: <https://wiki.loginom.ru/articles/delphi-technique.html> (accessed: 01.03.2024).
19. Veprikova M.Ya. Collective methods of decision-making in modern organizations, their effectiveness. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra = Economics: yesterday, today, tomorrow*. 2018; 8 (9): 353-360 (In Russ.).
20. Byl'eva D. S. Collective and artificial intelligence. *Vestnik Mininskogo universiteta = Bulletin of Minin University*. 2023; 11(2): 2-13 (In Russ.). <https://doi.org/10.26795/2307-1281-2023-11-2-13>.
21. Belbin R. M. Types of roles in management teams. Moscow: HIPPO; 2003. 232 p. (In Russ.).
22. Scientists have described the features of the emergence of collective AI. (In Russ.). Available at: <https://rspectr.com/novosti> (accessed: 01.03.2024).
23. David Ha, Yujin Tang. Collective Intelligence for Deep Learning: A Survey of Recent Developments. *Cornell University. Computer Science. Neural and Evolutionary Computing*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.14377>.
24. Maklakov A. G. General psychology. Saint Petersburg: Piter Press; 2017. 582 p. (In Russ.).
25. Kulagina I. Yu., Kolyuckij V. N. Developmental psychology and age psychology: the full life cycle of human development. Moscow: Akademicheskij proekt, 2020. 420 p. (In Russ.).
26. Druzhinina V. N. Psychology. Saint Petersburg: Piter, 2009. 652 p. (In Russ.).
27. Lean Thinking. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Lean_thinking (accessed: 01.03.2024).
28. Wang, Y., Wang, Y.: Cognitive Informatics Models of the Brain. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 2006, 36 (2): 203-207.
29. Wang, Y., Wang, Y., Patel, S., Patel, D. A Layered Reference Model of the Brain (LRMB). *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 2006. 36 (2): 124-133.
30. Modern educational technologies: Psychology and pedagogy. Cognitive mental processes. Thinking and intelligence. (In Russ.). Available at: https://intuit.ru/studies/professional_retraining/16257/courses/707/lecture/16756?page=2&ysclid=lvv7vfr93p274714474operacii (accessed: 01.03.2024).
31. Deciphering P2P: The Basics and Benefits of Peer-to-Peer Technology. Available at: <https://www.cachefly.com/news/deciphering-p2p-the-basics-and-benefits-of-peer-to-peer-technology> (accessed: 01.03.2024).
32. Chan U. Python: Creating Applications. Professional's library. Moscow: Vil'yams; 2015. 816 p. (In Russ.).
33. Knyazeva M. D., Karamysheva N. S., Grigor'eva D. D. From algorithm to program and artificial intelligence. With examples in Python and Prolog. Penza: PGU; 2024. 412 p. (In Russ.).

34. MongoDB: The Developer Data Platform. Available at: <https://www.mongodb.com> (accessed: 01.03.2024).
35. React. JavaScript library for creating user interfaces. (In Russ.). Available at: <https://ru.react.js.org> (accessed: 01.03.2024).
36. Creating a Web Application Using Python Flask. (In Russ.). Available at: <https://timeweb.cloud/tutorials/python/sozdanie-veb-prilozheniya-s-ispolzovaniem-python-flask> (accessed: 01.03.2024).
37. Karamysheva N. S., Milovanov A. S., Mitrokhin M. A., Zinkin S. A. On the Software Implementation of Cognitive Interoperable Agent-Based Systems]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(1): 100-122 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-100-122>.
38. Tejz A., Gribomon P., Lui Zh., et al. Logical approach to artificial intelligence: from classical logic to logic programming. Moscow: Mir; 1990. 429 p. (In Russ.).
39. Sowa J. F. Knowledge Representation: Logical, Philosophical, and Computational Foundations. Brooks Cole Publishing Co., Pacific Grove, CA, 2000. 594 p.
40. Unified Theories of Cognition. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Unified_Theories_of_Cognition (accessed: 01.03.2024).

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

Александров Владимир Сергеевич, студент, Пензенский государственный университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: vt@pnzgu.ru

Vladimir S. Aleksandrov, Student, Penza State University, Penza, Russian Federation, e-mail: vt@pnzgu.ru

Кирюткин Илья Алексеевич, студент, Пензенский государственный университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: vt@pnzgu.ru

Ilya A. Kiryutkin, Student, 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

УДК 681.58

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-164-183>

Математическое моделирование работы технологической линии многофункциональной установки подготовки топливного газа (МУПГ) для совершенствования ее безаварийного функционирования

В. Н. Березняк¹ ✉, А.Г. Бажанов¹

¹ Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова
ул. Костюкова, д.46, г. Белгород 308012, Российская Федерация

✉ e-mail: bereznyak_vlni@edu.bstu.ru

Резюме

Цель исследования – комплексное исследование технологической линии многофункциональной установки подготовки топливного газа (МУПГ), создание математической модели, способной предсказывать и контролировать сухость газа в процессе работы МУПГ, а также определение оптимальных параметров работы установки для совершенствования безаварийного функционирования и высокой производительности оборудования, использующего очищенный газ.

Методы. Осуществлено математическое моделирование с использованием модели множественной регрессии для предсказания температуры точки росы и ее влияния на безаварийную эксплуатацию установки. Адекватность модели подтверждена коэффициентом детерминации и критерием Фишера. Также представлен анализ ограничивающих факторов для безаварийной работы МУПГ, включая температуру, давление и состав газа. Оценка точности численного моделирования безаварийной работы технологической линии МУПГ на основании разработанной модели множественной регрессии сухости газа произведена при помощи парных коэффициентов корреляции, коэффициентов эластичности.

Результаты. В ходе работы было произведено моделирование безаварийной работы технологической линии МУПГ на основании разработанной модели множественной регрессии сухости газа. Возможна следующая интерпретация параметров модели: увеличение фактора X_1 на 1 приводит к уменьшению Y в среднем на 0,279; увеличение фактора X_2 на 1 приводит к увеличению Y в среднем на 0,46; увеличение фактора X_3 на 1 приводит к увеличению Y в среднем на 0,000418; увеличение фактора X_4 на 1 приводит к увеличению Y в среднем на 13,288; увеличение фактора X_5 на 1 приводит к уменьшению Y в среднем на 13,337; увеличение фактора X_6 на 1 приводит к уменьшению Y в среднем на 0. По максимальному коэффициенту $\beta_2=0,384$ можно сделать вывод, что наибольшее влияние на результат Y оказывает фактор X_2 . Статистическая значимость уравнения проверена с помощью коэффициента детерминации и критерия Фишера. По оценке точности численного моделирования безаварийной работы технологической линии МУПГ на основании разработанной модели множественной регрессии сухости газа была определена сильная линейная связь между X_1 и Y , низкая линейная связь между X_2 и Y , низкая линейная связь между X_3 и Y , умеренная линейная связь между X_4 и Y , умеренная линейная связь между X_5 и Y , умеренная линейная связь между X_6 и Y .

Заключение. Установлено, что в исследуемой ситуации: «в возможности предсказания и контроля сухости газа: обоснование гипотезы о возможности предсказания температуры точки росы и ее влияния на безаварийную работу» параметры модели статистически значимы.

Ключевые слова: многофункциональная установка подготовки газа; сатуратор; сепаратор двухфазный; нагреватель; дроссельный клапан (регулятор давления); математическая модель; модель множественной регрессии; корреляция; детерминация; критерий Фишера; точка росы; сухость газа; эластичность.

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

Для цитирования: Березняк В. Н., Бажанов А. Г. Математическое моделирование работы технологической линии многофункциональной установки подготовки топливного газа (МУПГ) для совершенствования ее безаварийного функционирования // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №3. С. 164-183. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-164-183>.

Поступила в редакцию 19.07.2024

Подписана в печать 09.08.2024

Опубликована 30.09.2024

Mathematical modelling of the process line of a multifunctional fuel gas preparation unit (MGPU) to improve its accident-free operation

Vladimir N. Bereznyak ¹ ✉, Alexander G. Bazhanov ¹

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

✉ e-mail: bereznyak_vlni@edu.bstu.ru

Abstract

The purpose of the research is a comprehensive study of the process line of a multifunctional fuel gas preparation unit (MGPU), creation of a mathematical model capable of predicting and controlling gas dryness in the process of MGPU operation, as well as determination of optimal parameters of the unit operation to improve accident-free operation and high productivity of the equipment using treated gas.

Methods. Mathematical modeling with the use of multiple regression model for prediction of dew point temperature and its influence on accident-free operation of the plant was carried out. The adequacy of the model was confirmed by the coefficient of determination and Fisher's criterion. An analysis of the limiting factors for the accident-free operation of the MGPU, including temperature, pressure and gas composition, is also presented. The accuracy of numerical modeling of the trouble-free operation of the MUPG process line based on the developed model of multiple regression of gas dryness was estimated using paired correlation coefficients and elasticity coefficients.

Results. In the course of the work, the accident-free operation of the process line of MGPU was modeled based on the developed multiple regression model of gas dryness. The following interpretation of the model parameters is possible: increasing factor X_1 by 1 leads to an average decrease in Y by 0.279; increasing factor X_2 by 1 leads to an average increase in Y by 0.46; increasing factor X_3 by 1 leads to an average increase in Y by 0.000418; increasing factor X_4 by 1 leads to an average increase in Y by 13.288; increasing factor X_5 by 1 leads to an average decrease in Y by 13.337; increasing factor X_6 by 1 leads to an average decrease in Y by 0. According to the maximum coefficient $\beta_2=0.384$ we can conclude that the factor X_2 has the greatest influence on the result Y . Statistical significance of the equation was tested using the coefficient of determination and Fisher's criterion. According to the assessment of the accuracy of numerical modeling of the trouble-free operation of the MUPG process line, based on the developed model of multiple regression of gas dryness, a strong linear relationship between X_1 and Y , a low linear relationship between X_2 and Y , a low linear relationship between X_3 and Y , a moderate linear relationship between X_4 and Y , a moderate linear relationship between X_5 and Y , moderate linear relationship between X_6 and Y .

Conclusion. It was found that in the investigated situation: "in the possibility of prediction and control of gas dryness: justification of the hypothesis about the possibility of prediction of dew point temperature and its influence on accident-free operation" the parameters of the model are statistically significant.

Keywords: multifunctional gas preparation unit; saturator; two-phase separator; heater; throttle valve (pressure regulator); mathematical model; multiple regression model; correlation; determination; Fisher criterion; dew point; dryness of gas; elasticity.

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

For citation: Bereznyak V. N., Bazhanov A. G. Mathematical modelling of the process line of a multifunctional fuel gas preparation unit (MGPU) to improve its accident-free operation. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(3): 164-183 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-164-183>.

Received 19.07.2024

Accepted 09.08.2024

Published 30.09.2024

Введение

Объектом математического моделирования является функционирование и происходящие процессы в модуле подготовки топливного газа, который также на практике часто называется: системой кондиционирования газа (СКГ), системой фильтрации газа (СФГ), многофункциональной установкой подготовки газа (МУПГ)¹ [1].

МУПГ предназначены для качественной очистки топливного газа для последующей его подачи и использования в газовых турбинах и двигателях, а также для обработки, очистки попутного нефтяного газа перед его транспортировкой, распределением. Предварительная обработка газа, а именно его кондиционирование, сегодня на практике является важным технологическим процессом очистки газа для дальнейшего его использования [2], к примеру, в газовых турбинах, так как данный процесс его очистки позволяет повысить

долговечность и производительность использующего очищенный газ оборудования² [1].

Таким образом, основная функциональность МУПГ заключается в обеспечении различного газового оборудования, к примеру газовых турбин, генераторов и технологических печей, чистым обработанным газом. Переработанный газ также может использоваться как уплотняющий, продувочный либо бытовой газ.

Для выполнения основного технологического процесса очистки газа обычная МУПГ имеет структуру, в которую входят такие функциональные блоки, как:

- скруббер (барабанный сепаратор);
- коалесцирующий фильтр;
- электронагреватели;
- редукционные клапаны;
- предохранительные клапаны;
- управляющие клапаны³ [3].

² Зубарев В. И. Моделирование технологических процессов подготовки природного газа нечеткими системами: дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 150 с.

³ Романов И. С. Разработка математических моделей абсорбционной осушки и гидратообразования при подготовке газа: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2012. 175 с.

¹ Бирюков А.В. Моноблочная установка очистки природного газа от механических примесей: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2017. 137 с.

Также в зависимости от измерительных приборов параметров топливного газа на входе МУПГ могут быть оборудованы функциональными блоками нагревателей, либо охладителей¹.

Для общего описания технологического процесса очистки топливного газа в МУПГ важно выделить: чтобы на практике обеспечить снижение такого параметра газа до нужного уровня, как давление, в МУПГ применяются клапаны-регуляторы давления. В результате их работы адиабатический охлаждающий эффект приводит или может привести к образованию конденсата [4]. Жидкости, присутствующие в газе, проходят сквозь скрубберы, исключая возможность попадания их остатков в последующее оборудование. Газ проходит через коалесцирующий фильтр, который дальше удаляет как остатки любых жидкостей, так и твердые частицы².

В некоторых случаях для снижения давления газа на практике применяют его предварительное нагревание³. Таким образом, возможно перегревание топливного газа, что приведет к уровню температуры выше точки росы, благо-

даря чему газ сможет поступить в турбину или последующий генератор [1].

Материалы и методы

Построение функциональной схемы объекта математического моделирования

Предлагаемая функциональная схема МУПГ – это схема установки, которая автоматизирует технологический процесс очистки топливного газа для последующей его подачи и использования. Выше была определена предварительная структура и состав блоков МУПГ для выполнения основного технологического процесса очистки газа.

Функциональная схема МУПГ (рис. 1) представляет собой математическую модель технологической линии подготовки топливного газа МУПГ перед подачей к потребителю, которая содержит такие блоки, как:

1. SAT-100 – сатуратор, который предназначен для задания влажности потока.

2. V-100 – сепаратор двухфазный, который предназначен для разделения газожидкостного потока и глубокой очистки топливного газа от газового конденсата, капельной мелкодисперсной, аэрозольной влаги и механических примесей и разделения жидкостной фракции по плотности – на легкую (газоконденсат) и тяжелую (вода)⁴ [1, 3].

¹ Петрова Е. А. Математическое моделирование управляемых технологических процессов дегидратации природного газа: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2018. 140 с.

² Смирнов А. П. Разработка и исследование математических моделей технологического процесса абсорбционной осушки газа: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2015. 160 с.

³ Кузнецов В. Н. Математическое моделирование и оптимизация технологических процессов подготовки газа к транспорту: дис. ... д-ра техн. наук. Томск, 2013. 200 с.

⁴ Романов И. С. Разработка математических моделей абсорбционной осушки и гидратообразования при подготовке газа: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2012. 175 с.

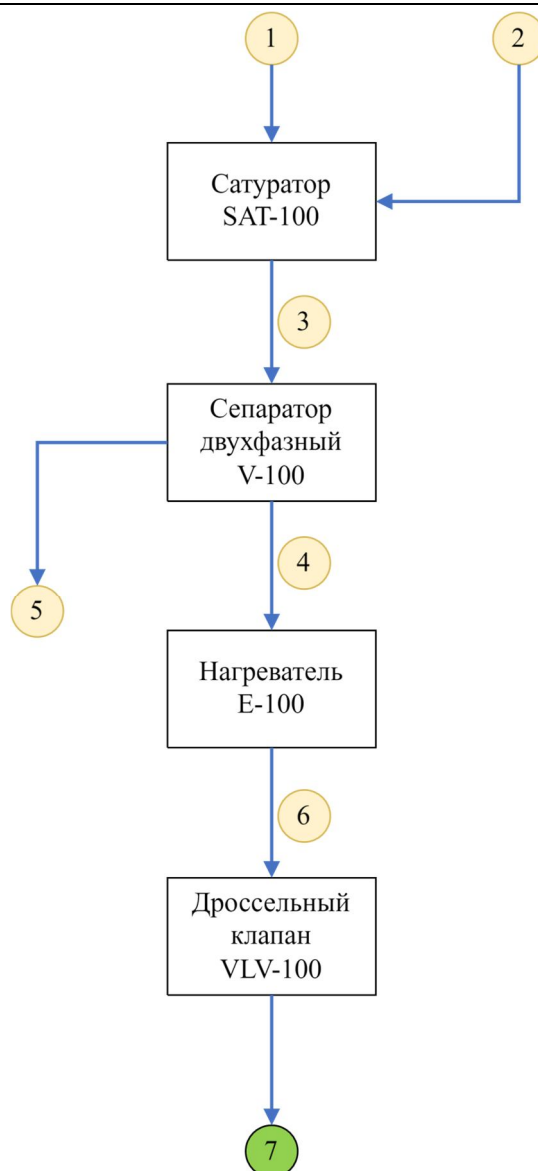


Рис. 1. Функциональная схема технологической линии подготовки топливного газа

Fig. 1. Functional diagram of the process line of the fuel gas preparation units

3. E-100 – нагреватель.

4. VLV-100 – дроссельный клапан (регулятор давления), который представляет из себя устройство, позволяющее регулировать просвет в точке воздуховода с целью изменения производительности и устанавливаемое в разрыв канала, регулирующее поток газозоудшной смеси путем изменения угла поворота заслонки (лопатки).

Анализ пороговых значений ограничивающих факторов (с применением численного эксперимента) для безаварийной работы технологической линии МУПГ

Выделяют такие основные ограничивающие факторы для МУПГ, как:

1. Для потока газа, который обозначен на рис. 1 в виде круга с единицей: температура; давление; расход газа; состав газа.

2. Для потока газа, который обозначен на рис. 1 в виде круга с цифрой 7: температура; давление.

Так, для расчета схемы на практике задают параметры потоку 1 (температура, давление, расход, состав), а также давление и температуру потоку 7.

Также значения основных ограничивающих факторов для МУПГ для всех узлов, представленных на рис. 1, при проведении численного эксперимента перед математическим моделированием с

целью улучшения безаварийной работы технологической линии МУПГ представлены в табл. 1.

Абсолютный анализ изменений значений основных ограничивающих факторов для МУПГ для всех узлов при проведении численного эксперимента перед математическим моделированием с целью улучшения безаварийной работы технологической линии МУПГ представлен в табл. 2.

Таблица 1. Значения основных ограничивающих факторов для МУПГ для всех узлов

Table 1. The values of the main limiting factors for MGPU for all nodes

Фактор / Factor	Узел / Unit						
	1	2	3	4	5	6	7
Температура, C^0 / Temperature, C^0	20,00	277,10	20,00	20,00	20,00	37,91	11,10
Давление, $кг/с^2$ / Pressure, $кг/с^2$	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	5,98	0,60
Расход газа, $кг/ч$ / Gas flow, $кг/ч$	7934	4,25	7947	7947	0,21	7947	7947
Состав газа / Gas composition	0,01	5,28	0,01	0,01	0,26	0,01	0,01

Таблица 2. Абсолютный анализ значений основных ограничивающих факторов для МУПГ для всех узлов

Table 2. Absolute analysis of the values of the main limiting factors for the MGPU for all nodes

Фактор / Factor	Узел / Unit						
	1	2	3	4	5	6	7
Температура, C^0 / Temperature, C^0	+0,00	+257,10	-257,10	+0,00	+0,00	+17,91	-26,81
Давление, $кг/с^2$ / Pressure, $кг/с^2$	+0,00	+0,00	+0,00	+0,00	+0,00	-0,02	-5,38
Расход газа, $кг/ч$ / Gas flow, $кг/ч$	+0,00	-7929,25	+7944,75	+0,00	-7946,79	+7946,79	+0,00
Состав газа / Gas composition	+0,00	+5,27	-5,27	+0,00	+0,25	-0,25	+0,00

Постановка задачи математического моделирования безаварийной работы технологической линии МУПГ

При постановке задачи математического моделирования основного технологического процесса в МУПГ была выдвинута гипотеза, которая заключается в возможности предсказания и контроля сухости газа: обоснование гипотезы о возможности предсказания температуры точки росы¹ и ее влияния на безаварийную работу; рассмотрение методов определения установки температуры нагревателя для гарантированного соблюдения сухости газа.

Математическая модель (модель множественной регрессии сухости газа) безаварийной работы технологической линии МУПГ

Для подтверждения выдвинутой гипотезы, которая заключается в возможности предсказания и контроля сухости газа, предлагается применить модель множественной регрессии с учетом влияния всех факторов, а также последующую оптимизационную модель сравнения результирующего показателя с влажностью и точкой росы (итерационное сравнение). Так, с целью более точного подтверждения выдвинутой гипотезы в модель множественной ре-

грессии добавлены еще два расчетных фактора: влажность газа и точка росы, которые рассчитываются отдельно для каждого узла МУПГ и встраиваются в модель множественной регрессии для оценки их влияния на сухость газа².

При определении влажности природных газов [5, 6] с относительной плотностью 0,6 при разных температурах и давлениях можно использовать уравнение Р.Ф. Бюкачека (формулы 1, 2):

$$W = \frac{A}{P} + B, \quad (1)$$

где A – влагосодержание идеального газа; P – абсолютное давление газа (кг/см^2); B – коэффициент, учитывающий не идеальность газа.

$$A = \frac{P_{\text{H}_2\text{O}} * M * 1033}{0,048 * (273 + 20) * Z}, \quad (2)$$

где $P_{\text{H}_2\text{O}}$ – паров воды при данной температуре, МПа; M – молекулярная масса паров; Z – коэффициент сжимаемости.

Формула для приблизительного расчета точки росы представлена выражениями:

$$T_p = \frac{b \gamma(T, \varphi)}{a - \gamma(T, \varphi)}, \quad (3)$$

$$\gamma(T, \varphi) = \frac{aT}{b + T} + \ln \varphi, \quad (4)$$

где T – температура в градусах Цельсия; φ – относительная влажность в объемных долях ($0 < \varphi < 1,0$); $a = 17,27$; $b = 237,7^\circ\text{C}$.

¹ Смирнов А. П. Разработка и исследование математических моделей технологического процесса абсорбционной осушки газа: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2015. 160 с.; Романов И. С. Разработка математических моделей абсорбционной осушки и гидратообразования при подготовке газа: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2012. 175 с.

² Попадин Н. В. Моделирование процессов промышленной подготовки газов и газовых конденсатов: дис. ... канд. техн. наук. Астрахань, 2002. 190 с.

Таким образом, в модели множественной регрессии безаварийной работы технологической линии МУПГ на результирующую оценку Y (сухость газа) было учтено влияние таких факторов, как:

X_1 – нормированное (умноженное на определенный корректировочный коэффициент модели) значение температуры;

X_2 – нормированное значение давления;

X_3 – нормированное значение расхода газа;

X_4 – нормированное значение состава газа;

X_5 – нормированное значение влажности газа;

X_6 – нормированное значение точки росы.

Обозначения факторов, влияющих на математическую модель (модель множественной регрессии сухости газа) безаварийной работы технологической линии МУПГ, представлены в табл. 3.

Таблица 3. Факторы модели множественной регрессии сухости газа безаварийной работы технологической линии МУПГ (для всех узлов)

Table 3. Factors of the model of multiple regression of dryness of the gas of trouble-free operation of the technological line of the MGPU (for all nodes)

Фактор / Factor	Итерация / Iteration						
	1	2	3	4	5	6	7
X_1	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}
X_2	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	X_{26}	X_{27}
X_3	X_{31}	X_{32}	X_{33}	X_{34}	X_{35}	X_{36}	X_{37}
X_4	X_{41}	X_{42}	X_{43}	X_{44}	X_{45}	X_{46}	X_{47}
X_5	X_{51}	X_{52}	X_{53}	X_{54}	X_{55}	X_{56}	X_{57}
X_6	X_{61}	X_{62}	X_{63}	X_{64}	X_{65}	X_{66}	X_{67}

Уравнение множественной регрессии [9] может быть представлено в виде выражения:

$$Y = f(\beta, X) + \varepsilon, \quad (5)$$

где $X = X(X_1, X_2, \dots, X_m)$ – вектор независимых (объясняющих) переменных; β – вектор параметров (подлежащих определению); ε – случайная ошибка (отклонение); Y – зависимая (объясняемая) переменная.

Теоретическое линейное уравнение множественной регрессии имеет вид

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_m X_m + \varepsilon, \quad (6)$$

где β_0 – свободный член, определяющий значение Y , в случае, когда все объясняющие переменные X_j равны 0¹ [10, 11].

¹ Петрова Е. А. Математическое моделирование управляемых технологических процессов дегидратации природного газа: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2018. 140 с.

Для оценки влияния факторов на модель множественной регрессии сухости газа безаварийной работы технологической линии МУПГ (для всех узлов) определяется вектор оценок коэффициентов регрессии. Так, согласно методу наименьших квадратов, вектор получается из выражения:

$$S = (X^T * X)^{-1} * X^T * Y, \quad (7)$$

где X – матрица значений факторов по узлам МУПГ; X^T – транспонированная матрица значений факторов по узлам МУПГ; Y – матрица значений результирующего фактора (сухость газа), на который оказывают влияние факторы $X_1, X_2 \dots, X_6$ по узлам МУПГ¹.

Результаты и их обсуждение

Результаты численного моделирования безаварийной работы технологической линии МУПГ на основании разработанной модели множественной регрессии сухости газа

Для оценки разработанной модели множественной регрессии сухости газа для прогноза безаварийной работы технологической линии МУПГ в работе был определен вектор оценок коэффициентов регрессии по выражению (7).

К матрице с переменными X_j был добавлен единичный столбец:

1	2	0,6	793,4	0,001	1	1
1	27,71	0,6	0,425	0,528	0,5	0,5
1	2	0,6	794,7	0,001	1	1
1	2	0,6	794,7	0,001	1	1
1	2	0,6	0,021	0,026	1	1
1	3,79	0,598	794,7	0,001	1	1
1	1,11	0,06	794,7	0,001	1	1

Матрица Y имеет следующий вид:

1
0,5
1
1
1
0,5
1

Матрица X^T имеет вид:

1	1	1	1	1	1	1
2	27,71	2	2	2	3,79	1,11
0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,598	0,06
793,4	0,425	794,7	794,7	0,021	794,7	794,7
0,001	0,528	0,001	0,001	0,026	0,001	0,001
1	0,5	1	1	1	1	1
1	0,5	1	1	1	1	1

В матрице $(X^T X)$ число 7, лежащее на пересечении 1-й строки и 1-го столбца, получено как сумма произведений элементов 1-й строки матрицы X^T и 1-го столбца матрицы X .

¹ Зубарев В. И. Моделирование технологических процессов подготовки природного газа нечеткими системами: дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 150 с.

Матрица $(X^T X)$ имеет следующий вид:

7	40,61	3,658	3972,646	0,559	6,5	6,5
40,61	799,4403	23,75902	8671,44875	14,69378	26,755	26,755
3,658	23,75902	2,161204	1952,8602	0,334858	3,358	3,358
3972,646	8671,44875	1952,8602	3155676,101066	4,197146	3972,4335	3972,4335
0,559	14,69378	0,334858	4,197146	0,279465	0,295	0,295
6,5	26,755	3,358	3972,4335	0,295	6,25	6,25
6,5	26,755	3,358	3972,4335	0,295	6,25	6,25

Матрица $(X^T Y)$ имеет вид:

6
24,86
3,059
3575,0835
0,2945
5,75
5,75

Обратная матрица $(X^T X)^{-1}$ имеет следующий вид:

2,9307	0,3372	-3,4106	-0,00248	-19,4676	0	0
0,3372	0,4143	-1,0229	-0,000902	-21,2171	0	0
-3,4106	-1,0229	6,8212	0,00281	52,3914	0	0
-0,00248	-0,000902	0,00281	4,0E-6	0,04893	0	0
-19,4676	-21,2171	52,3914	0,04893	1094,5673	0	0
-925762156,1467	-6784,5295	33850,0347	28300,5932	899107542,0767	0	902378066,9384
-1,0259	-8,0E-6	3,8E-5	3,1E-5	0,9964	1	0

Вектор оценок коэффициентов регрессии вычисляется по выражению

$$Y(X) = (X^T X)^{-1} * X^T * Y, \quad (8)$$

0,9363
-0,2789
0,46
0,000418
13,2884
-13,3367
0

Уравнение регрессии (оценка уравнения регрессии) принимает вид

$$Y = 0,9363 - 0,2789X_1 + 0,46X_2 + 0,000418X_3 + 13,2884X_4 - 13,3367X_5. \quad (9)$$

Интерпретация коэффициентов регрессии разработанной модели множественной регрессии сухости газа для прогноза безаварийной работы технологической линии МУПГ заключается в следующем:

Константа оценивает агрегированное влияние прочих (кроме учтенных в модели X_i) факторов на результат Y и означает, что Y при отсутствии X_i составила бы 0,9363. Коэффициент b_1 указывает, что с увеличением X_1 на 1, Y снижается на 0,2789. Коэффициент b_2 указывает, что с увеличением X_2 на 1, Y увеличивается на 0,46. Коэффициент b_3 указывает, что с увеличением X_3 на 1, Y увеличивается на 0,000418. Коэффициент b_4 указывает, что с увеличением X_4 на 1, Y увеличивается на 13,2884. Коэффициент b_5 указывает, что с увеличением X_5 на 1, Y снижается на 13,3367. Коэффициент b_6 указывает, что с увеличением X_6 на 1, Y снижается на 0.

Оценка точности численного моделирования безаварийной работы технологической линии МУПГ на основании разработанной модели множественной регрессии сухости газа

Оценка точности уравнения множественной регрессии сухости газа для безаварийной работы технологической линии МУПГ осуществлялась на основании построения матрицы парных коэффициентов корреляции R .

Изначально было выбрано число наблюдений n , равное 7. Число независимых переменных в разработанной модели множественной регрессии сухости газа известно и равно 6, число регрессоров с учетом единичного вектора равно числу неизвестных коэффициентов. С учетом признака Y размерность матрицы парных коэффициентов корреляции R стала равной 8, а матрица независимых переменных X имеет размерность 7×8 .

Матрица A , составленная из Y и X , имеет следующий вид:

1	1	2	0,6	793,4	0,001	1	1
1	0,5	27,71	0,6	0,425	0,528	0,5	0,5
1	1	2	0,6	794,7	0,001	1	1
1	1	2	0,6	794,7	0,001	1	1
1	1	2	0,6	0,021	0,026	1	1
1	0,5	3,79	0,598	794,7	0,001	1	1
1	1	1,11	0,06	794,7	0,001	1	1

Транспонированная матрица имеет следующий вид:

1	1	1	1	1	1	1
1	0,5	1	1	1	0,5	1
2	27,71	2	2	2	3,79	1,11
0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,598	0,06
793,4	0,425	794,7	794,7	0,021	794,7	794,7
0,001	0,528	0,001	0,001	0,026	0,001	0,001
1	0,5	1	1	1	1	1
1	0,5	1	1	1	1	1

Матрица $X^T \cdot X$ имеет вид:

7	6	40,61	3,658	3972,646	0,559	6,5	6,5
6	5,5	24,86	3,059	3575,084	0,295	5,75	5,75
40,61	24,86	799,44	23,759	8671,449	14,694	26,755	26,755
3,658	3,059	23,759	2,161	1952,86	0,335	3,358	3,358
3972,646	3575,084	8671,449	1952,86	3155676,101	4,197	3972,434	3972,434
0,559	0,295	14,694	0,335	4,197	0,279	0,295	0,295
6,5	5,75	26,755	3,358	3972,434	0,295	6,25	6,25
6,5	5,75	26,755	3,358	3972,434	0,295	6,25	6,25

Полученная матрица имеет следующее соответствие:

$\sum n$	$\sum y$	$\sum x_1$	$\sum x_2$	$\sum x_3$	$\sum x_4$	$\sum x_5$	$\sum x_6$
$\sum y$	$\sum y^2$	$\sum x_1 y$	$\sum x_2 y$	$\sum x_3 y$	$\sum x_4 y$	$\sum x_5 y$	$\sum x_6 y$
$\sum x_1$	$\sum y x_1$	$\sum x_1^2$	$\sum x_2 x_1$	$\sum x_3 x_1$	$\sum x_4 x_1$	$\sum x_5 x_1$	$\sum x_6 x_1$
$\sum x_2$	$\sum y x_2$	$\sum x_1 x_2$	$\sum x_2^2$	$\sum x_3 x_2$	$\sum x_4 x_2$	$\sum x_5 x_2$	$\sum x_6 x_2$
$\sum x_3$	$\sum y x_3$	$\sum x_1 x_3$	$\sum x_2 x_3$	$\sum x_3^2$	$\sum x_4 x_3$	$\sum x_5 x_3$	$\sum x_6 x_3$
$\sum x_4$	$\sum y x_4$	$\sum x_1 x_4$	$\sum x_2 x_4$	$\sum x_3 x_4$	$\sum x_4^2$	$\sum x_5 x_4$	$\sum x_6 x_4$
$\sum x_5$	$\sum y x_5$	$\sum x_1 x_5$	$\sum x_2 x_5$	$\sum x_3 x_5$	$\sum x_4 x_5$	$\sum x_5^2$	$\sum x_6 x_5$
$\sum x_6$	$\sum y x_6$	$\sum x_1 x_6$	$\sum x_2 x_6$	$\sum x_3 x_6$	$\sum x_4 x_6$	$\sum x_5 x_6$	$\sum x_6^2$

Парные коэффициенты корреляции
вычисляются по выражению

$$r_{xy} = \frac{\overline{x \cdot y} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{s(x) \cdot s(y)} \quad (10)$$

Расчетные значения для вычисления парных коэффициентов корреляции модели множественной регрессии сухости газа представлены в табл. 4.

Таблица 4. Расчетные значения для вычисления парных коэффициентов корреляции модели множественной регрессии сухости газа

Table 4. Calculated values for calculating the paired correlation coefficients of the multiple regression model of gas dryness

Признаки x и y / Signs x and y	$\sum x^i$	$\bar{x} = \frac{\sum x^i}{n}$	$\sum y^i$	$\bar{y} = \frac{\sum y^i}{n}$	$\sum x^i \cdot y^i$	$\overline{x \cdot y} = \frac{\sum x^i \cdot y^i}{n}$
Для y и x ₁	40,61	5,801	6	0,857	24,86	3,551
Для y и x ₂	3,658	0,523	6	0,857	3,059	0,437
Для y и x ₃	3972,646	567,521	6	0,857	3575,084	510,726
Для y и x ₄	0,559	0,0799	6	0,857	0,295	0,0421
Для y и x ₅	6,5	0,929	6	0,857	5,75	0,821
Для y и x ₆	6,5	0,929	6	0,857	5,75	0,821
Для x ₁ и x ₂	3,658	0,523	40,61	5,801	23,759	3,394
Для x ₁ и x ₃	3972,646	567,521	40,61	5,801	8671,449	1238,778
Для x ₁ и x ₄	0,559	0,0799	40,61	5,801	14,694	2,099
Для x ₁ и x ₅	6,5	0,929	40,61	5,801	26,755	3,822
Для x ₁ и x ₆	6,5	0,929	40,61	5,801	26,755	3,822
Для x ₂ и x ₃	3972,646	567,521	3,658	0,523	1952,86	278,98
Для x ₂ и x ₄	0,559	0,0799	3,658	0,523	0,335	0,0478
Для x ₂ и x ₅	6,5	0,929	3,658	0,523	3,358	0,48
Для x ₂ и x ₆	6,5	0,929	3,658	0,523	3,358	0,48

Признаки x и y / Signs x and y	$\sum x^i$	$\bar{x} = \frac{\sum x^i}{n}$	$\sum y^i$	$\bar{y} = \frac{\sum y^i}{n}$	$\sum x^i \cdot y^i$	$\overline{x \cdot y} = \frac{\sum x^i \cdot y^i}{n}$
Для x ₃ и x ₄	0,559	0,0799	3972,646	567,521	4,197	0,6
Для x ₃ и x ₅	6,5	0,929	3972,646	567,521	3972,434	567,491
Для x ₃ и x ₆	6,5	0,929	3972,646	567,521	3972,434	567,491
Для x ₄ и x ₅	6,5	0,929	0,559	0,0799	0,295	0,0421
Для x ₄ и x ₆	6,5	0,929	0,559	0,0799	0,295	0,0421
Для x ₅ и x ₆	6,5	0,929	6,5	0,929	6,25	0,893

Таким образом, парные коэффициенты корреляции имеют следующие значения и обоснования.

Значение данного парного коэффициента корреляции свидетельствует о сильной линейной связи между x₁ и y:

$$r_{yx_1} = \frac{3,551 - 5,801 * 0,857}{8,975 * 0,226} = -0,701.$$

Значение данного парного коэффициента корреляции свидетельствует о низкой линейной связи между x₂ и y:

$$r_{yx_2} = \frac{0,437 - 0,523 * 0,857}{0,189 * 0,226} = -0,256.$$

Значение данного парного коэффициента корреляции свидетельствует о низкой линейной связи между x₃ и y:

$$r_{yx_3} = \frac{510,726 - 567,521 * 0,857}{358,791 * 0,226} = 0,3.$$

Значение данного парного коэффициента корреляции свидетельствует о умеренной линейной связи между x₄ и y:

$$r_{yx_4} = \frac{0,0421 - 0,0799 * 0,857}{0,183 * 0,226} = -0,638.$$

Значение данного парного коэффициента корреляции свидетельствует о умеренной линейной связи между x₅ и y:

$$r_{yx_5} = \frac{0,821 - 0,929 * 0,857}{0,175 * 0,226} = 0,645.$$

Значение данного парного коэффициента корреляции свидетельствует о умеренной линейной связи между x₆ и y:

$$r_{yx_6} = \frac{0,821 - 0,929 * 0,857}{0,175 * 0,226} = 0,645.$$

Другие вычисления значений парных коэффициентов корреляции представлены матрицей парных коэффициентов корреляции R:

-	y	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆
y	1	-0.7011	-0.256	0.2996	-0.6376	0.6455	0.6455
x ₁	-0.7011	1	0.2139	-0.6378	0.9951	-0.9966	-0.9966
x ₂	-0.256	0.2139	1	-0.2596	0.1765	-0.1674	-0.1674
x ₃	0.2996	-0.6378	-0.2596	1	-0.6805	0.6453	0.6453
x ₄	-0.6376	0.9951	0.1765	-0.6805	1	-0.9989	-0.9989
x ₅	0.6455	-0.9966	-0.1674	0.6453	-0.9989	1	1
x ₆	0.6455	-0.9966	-0.1674	0.6453	-0.9989	1	1

В табл. 5 представлены также численные парные значения дисперсии и

среднеквадратического отклонения модели множественной регрессии сухости.

Таблица 5. Парные значения дисперсии и среднеквадратического отклонения модели множественной регрессии сухости

Table 5. Paired values of variance and standard deviation of the multiple regression model of dryness

Признаки x и y / Signs x and y	$D(x) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - \bar{x}^2$	$D(y) = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} - \bar{y}^2$	$s(x) = \sqrt{D(x)}$	$s(y) = \sqrt{D(y)}$
Для y и x ₁	80,549	0,051	8,975	0,226
Для y и x ₂	0,0357	0,051	0,189	0,226
Для y и x ₃	128730,948	0,051	358,791	0,226
Для y и x ₄	0,0335	0,051	0,183	0,226
Для y и x ₅	0,0306	0,051	0,175	0,226
Для y и x ₆	0,0306	0,051	0,175	0,226
Для x ₁ и x ₂	0,0357	80,549	0,189	8,975
Для x ₁ и x ₃	128730,948	80,549	358,791	8,975
Для x ₁ и x ₄	0,0335	80,549	0,183	8,975
Для x ₁ и x ₅	0,0306	80,549	0,175	8,975
Для x ₁ и x ₆	0,0306	80,549	0,175	8,975
Для x ₂ и x ₃	128730,948	0,0357	358,791	0,189
Для x ₂ и x ₄	0,0335	0,0357	0,183	0,189
Для x ₂ и x ₅	0,0306	0,0357	0,175	0,189
Для x ₂ и x ₆	0,0306	0,0357	0,175	0,189
Для x ₃ и x ₄	0,0335	128730,948	0,183	358,791
Для x ₃ и x ₅	0,0306	128730,948	0,175	358,791
Для x ₃ и x ₆	0,0306	128730,948	0,175	358,791
Для x ₄ и x ₅	0,0306	0,0335	0,175	0,183
Для x ₄ и x ₆	0,0306	0,0335	0,175	0,183
Для x ₅ и x ₆	0,0306	0,0306	0,175	0,175

В работе также был произведен анализ параметров уравнения множественной регрессии сухости газа для безаварийной работы технологической линии МУПГ.

Так, статистический анализ полученного уравнения регрессии на практике всегда сводится к проверке значи-

мости уравнения и его коэффициентов, исследованию абсолютных и относительных ошибок аппроксимации¹ [12].

¹ Бородюк В. П. Методология и опыт применения моделей множественной регрессии в задачах идентификации производственных процессов по данным пассивного эксперимента: дис. ... д-ра техн. наук. М., 1981. 488 с.

Вычисляют несмещенную ошибку дисперсии (абсолютную ошибку аппроксимации) по выражению

$$\varepsilon = Y - Y(x) = Y - X * s. \quad (11)$$

Так, дополнительные вычисления для несмещенной оценки дисперсии представлены в табл. 6.

Таблица 6. Дополнительные вычисления для несмещенной оценки дисперсии

Table 6. Additional calculations for unbiased variance estimation

Y	Y(x)	$\varepsilon = Y - Y(x)$	ε^2	$(Y - \bar{Y})^2$	$ \varepsilon: Y $
1	-12.337	13.337	177.878	0.0204	13.337
0.5	-6.168	6.668	44.467	0.128	13.337
1	-12.337	13.337	177.863	0.0204	13.337
1	-12.337	13.337	177.863	0.0204	13.337
1	-12.337	13.337	177.868	0.0204	13.337
0.5	-12.837	13.337	177.868	0.128	26.673
1	-12.337	13.337	177.868	0.0204	13.337
			1111.677	0.357	106.694

Средняя ошибка аппроксимации множественной регрессии сухости газа для безаварийной работы технологической линии МУПГ представлена выражением

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n |\frac{\varepsilon}{Y}|}{n} \cdot 100\% = \frac{106,694}{7} \cdot 100\% = 1524,2\%. \quad (12)$$

Оценка дисперсии представлена выражением

$$s_e^2 = (Y - Y(X))^T (Y - Y(X)) = 1111,677. \quad (13)$$

Несмещенная оценка дисперсии представлена выражением

$$s^2 = \frac{1}{n-m-1} \cdot s_e^2 = \frac{1}{7-6-1} \cdot 1111,677 = 1111,6765. \quad (14)$$

Оценка среднеквадратичного отклонения (стандартная ошибка для оценки Y) представлена выражением

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{1111,6765} = 33,342. \quad (15)$$

Анализ эластичности численного моделирования безаварийной работы технологической линии МУПГ на основании разработанной модели множественной регрессии сухости газа

Также с целью расширения возможностей содержательного анализа модели множественной регрессии сухости газа для безаварийной работы технологической линии МУПГ регрессии в работе был произведен расчет частных коэффициентов эластичности, которые определяются по выражению

$$E_i = b_i \cdot \frac{\bar{x}_i}{\bar{y}}. \quad (16)$$

На практике частный коэффициент эластичности показывает, насколько процентов в среднем изменяется признак-результат с увеличением признака-фактора x_j на 1% от своего среднего уровня при фиксированном положении других факторов модели.

Таким образом, частные коэффициенты эластичности имеют следующие значения и обоснования.

При изменении фактора X_1 на 1%, Y изменится на -1,888%. Частный коэффициент эластичности $|E_1| > 1$, следовательно, он существенно влияет на результативный признак Y :

$$E_1 = -0,279 \cdot \frac{5,801}{0,86} = -1,888.$$

При изменении фактора X_2 на 1%, Y изменится на 0,28%. Частный коэффициент эластичности $|E_2| < 1$, следовательно, его влияние на результативный признак Y незначительно:

$$E_2 = 0,46 \cdot \frac{0,523}{0,86} = 0,28.$$

При изменении фактора X_3 на 1%, Y изменится на 0,277%. Частный коэффициент эластичности $|E_3| < 1$, следовательно, его влияние на результативный признак Y незначительно:

$$E_3 = 0,000418 \cdot \frac{567,521}{0,86} = 0,277.$$

При изменении фактора X_4 на 1%, Y изменится на 1,238%. Частный коэффициент эластичности $|E_4| > 1$, следовательно, он существенно влияет на результативный признак Y :

$$E_4 = 13,288 \cdot \frac{0,0799}{0,86} = 1,228.$$

При изменении фактора X_5 на 1%, Y изменится на -14,448%. Частный коэффициент эластичности $|E_5| > 1$, следовательно, он существенно влияет на результативный признак Y :

$$E_5 = -13,337 \cdot \frac{0,929}{0,86} = -14,448.$$

При изменении фактора X_6 на 1%, Y изменится на 0%. Частный коэффициент эластичности $|E_6| < 1$, следовательно, его влияние на результативный признак Y незначительно:

$$E_6 = 0 = 0.$$

Оценка влияния факторов на результат численного моделирования безаварийной работы технологической линии МУПГ на основании разработанной модели множественной регрессии сухости газа

На практике тесноту совместного влияния факторов на результат оценивают с помощью индекса множественной корреляции (R). В отличие от парного коэффициента корреляции, который может принимать отрицательные значения, он принимает значения от 0 до 1. Поэтому R не может быть использован для интерпретации направления связи. Чем плотнее фактические значения y_i располагаются относительно линии регрессии, тем меньше остаточная дисперсия и, следовательно, больше величина $R_{y(x_1, \dots, x_m)}$.

Таким образом, при значении R , близком к 1, уравнение регрессии лучше описывает фактические данные, и факторы сильнее влияют на результат. При значении R , близком к 0, уравнение регрессии плохо описывает фактические данные, и факторы оказывают слабое воздействие на результат.

Коэффициент корреляции уравнения множественной регрессии сухости газа для безаварийной работы технологической линии МУПГ рассчитывается по выражению

$$R^2 = 1 - \frac{s_e^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = 0,3111. \quad (17)$$

Значимость численного моделирования безаварийной работы технологической линии МУПГ на основании разработанной модели множественной регрессии сухости газа (для заинтересованных сторон)

Проверка общего качества уравнения множественной регрессии сухости газа для безаварийной работы технологической линии МУПГ осуществлялась на основании проверки гипотезы об общей значимости – гипотезы об одновременном равенстве нулю всех коэффициентов регрессии при объясняющих переменных:

$$H_0: R^2 = 0; \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_m = 0, \quad (18)$$

$$H_1: R^2 \neq 0, \quad (19)$$

где R – коэффициент корреляции.

Проверка этой гипотезы осуществляется с помощью F -статистики распределения Фишера (правосторонняя проверка) заключается в следующем:

Если $F < F_{kp} = F_{\alpha; n-m-1}$, то нет оснований для отклонения гипотезы H_0 .

Значение F определяется по выражению

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} * \frac{n-m-1}{m} = \frac{0}{3111,6942 - 1 - 3111,6942} * \frac{7-6-1}{6} = 0. \quad (20)$$

Табличное значение при степенях свободы $k_1 = 6$ и $k_2 = n - m - 1 = 7 - 6 - 1 = 0$, $F_{kp}(6;0) = 0$.

Поскольку фактическое значение $F > F_{kp}$, то коэффициент детерминации статистически значим и уравнение регрессии статистически надежно (а именно коэффициенты b_i совместно значимы).

Выводы

В ходе работы было произведено моделирование безаварийной работы технологической линии МУПГ на основании разработанной модели множественной регрессии сухости газа:

$$Y = 0,9363 - 0,2789X_1 + 0,46X_2 + 0,000418X_3 + 13,2884X_4 - 13,3367X_5.$$

Возможна следующая интерпретация параметров модели: увеличение фактора X_1 на 1 приводит к уменьшению Y в среднем на 0,279; увеличение фактора X_2 на 1 приводит к увеличению Y в среднем на 0,46; увеличение фактора X_3 на 1 приводит к увеличению Y в среднем на 0,000418; увеличение фактора X_4 на 1 приводит к увеличению Y в среднем на 13,288; увеличение фактора X_5 на 1 приводит к уменьшению Y в

среднем на 13,337; увеличение фактора X_6 на 1 приводит к уменьшению Y в среднем на 0.

По максимальному коэффициенту $\beta_2=0,384$ можно сделать вывод, что наибольшее влияние на результат Y оказывает фактор X_2 . Статистическая значимость уравнения проверена с помощью коэффициента детерминации и критерия Фишера. Установлено, что в исследуемой ситуации: «в возможности предсказания и контроля сухости газа: обоснование гипотезы о возможности предсказания температуры точки росы и ее влияния на

безаварийную работу» параметры модели статистически значимы.

По оценке точности численного моделирования безаварийной работы технологической линии МУПГ на основании разработанной модели множественной регрессии сухости газа была определена сильная линейная связь между X_1 и Y , низкая линейная связь между X_2 и Y , низкая линейная связь между X_3 и Y , умеренная линейная связь между X_4 и Y , умеренная линейная связь между X_5 и Y , умеренная линейная связь между X_6 и Y .

Список литературы

1. Рубанов А. Энергаз внедряет многофункциональные установки подготовки газа // СФЕРА. Нефть и Газ: отраслевой журнал. 2019. №4. С. 38–45.
2. Ежов В.С., Семичева Н.Е. Методы решения проблемы образования кристаллогидратов в системах газоснабжения // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2016. №1. С. 79-82.
3. Вяхирев Р. И. Российская газовая энциклопедия. М.: Большая Российская энциклопедия, 2004. 529 с.
4. Щедрина Г.Г., Гнездилова О.А. Энергоэффективные методы нормализации параметров природного газа // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2012. №2. С. 31-35.
5. Жданова Н. В., Халиф А. Л. Осушка углеводородных газов. М.: Химия, 1984. 192 с.
6. Бурцев С. И., Цветков Ю. Н. Влажный воздух. Состав и свойства. СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 1998. 146 с.
7. Лурье М. В. Проектирование и эксплуатация газопроводов = Project and operations of gas pipelines: лекции о проектировании и эксплуатации газопроводов. М.: РГУ, 2023. 276 с.
8. Зарубежные газоперекачивающие агрегаты / А. Г. Ермошкин, И. И. Радчик, В. В. Федосеев [и др.]. М.: Недра, 1979. 247 с.

9. Чалганова А. А. Построение множественной регрессии и оценка качества модели с использованием табличного процессора Excel. СПб.: РГГМУ, 2022. 106 с.
10. Лозовская А. Н. Введение в эконометрику. Модели множественной линейной регрессии. М.: РЭУ, 2021. 55 с.
11. Новиков А. И. Эконометрика. М.: ИНФРА-М, 2003. 104 с.
12. Гателюк О. В., Круковская Т. Ю. Эконометрика. Модели парной и множественной регрессии. Омск: ОмГУПС, 2023. 44 с.

References

1. Rubanov A. Energas Implements Multifunctional Gas Preparation Units. *SFERA. Neft' i Gaz = SPHERE: Oil and Gas*. 2019; (4): 38-45 (In Russ.).
2. Yezhov V.S., Semicheva N.E. Methods of the solution of the problem of formation of crystalline hydrates in systems of gas supply. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2016; (1): 79-82 (In Russ.).
3. Vyakhirev R. I. Russian Gas Encyclopedia. Moscow: Big Russian Encyclopedia; 2004. 529 p. (In Russ.).
4. Shchedrina G.G., Gnezdilova O.A. Energy efficient method of normalization parameters of natural gas. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2012; (2): 31-35 (In Russ.).
5. Zhdanova N. V., Khalif A. L. Drying of Hydrocarbon Gases. Moscow: Khimiya; 1984. 192 p. (In Russ.).
6. Burtsov S. I., Tsvetkov Yu. N. Moist Air: Composition and Properties. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Industrial Technology and Design; 1998. 146 p. (In Russ.).
7. Lurie M. V. Project and operations of gas pipelines. Moscow; 2023. 276 p. (In Russ.).
8. Yermoshkin A. G., Radchik I. I., Fedoseev V. V., et al. Foreign Gas Compressor Units. Moscow: Nedra; 1979. 247 p. (In Russ.).
9. Chalganova A. A. Building Multiple Regression Models and Assessing Model Quality Using Excel. St. Petersburg: RGGU; 2022. 106 p. (In Russ.).
10. Lozovskaya A. N. Introduction to econometrics. Multiple linear regression models. Moscow: PRUE; 2021. 55 p. (In Russ.).
11. Novikov A. I. Econometrics. Moscow: INFRA-M; 2003. 104 p. (In Russ.).
12. Gateliuk O. V., Krukovskaya T. Y. Econometrics. Paired and multiple regression models. Omsk: OmGUPS; 2023. 44 p. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Березняк Владимир Николаевич, аспирант кафедры технической кибернетики, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4971-9839>, e-mail: bereznyak_vlni@edu.bstu.ru

Vladimir N. Bereznyak, Post-Graduate Student of the Technical Cybernetics Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4971-9839>, e-mail: bereznyak_vlni@edu.bstu.ru

Бажанов Александр Геральдович, кандидат технических наук, доцент кафедры технической кибернетики, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5229-0412>, e-mail: all_exe@mail.ru

Alexander G. Bazhanov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Technical Cybernetics Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russian Federation, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5229-0412>, e-mail: all_exe@mail.ru

УДК 614.842/.847

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-184-200>

Алгоритмизация ведения боевых действий по тушению пожаров в инфекционных отделениях медицинских учреждений

А.Н. Денисов¹, И.И. Садыков¹, М.М. Данилов¹, А.Ю. Кляузов¹,
М.В. Шевцов¹ ✉, М.А. Мареев²

¹ Академия Государственной противопожарной службы МЧС России
ул. Бориса Галушкина, д.4, г. Москва 129626, Российская Федерация

² Главное управление пожарной охраны МЧС России
ул. Пречистенка, д.22/2, стр. 1, г. Москва 119034, Российская Федерация

✉ e-mail: shevtsovmv@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Анализ проблемы и задач при ведении боевых действий в инфекционных отделениях медицинских учреждений страны позволяет говорить о серьезных вызовах, стоящих перед личным составом пожарно-спасательных подразделений. Для выработки подходов к решению данных вызовов необходимо определить временные отрезки для проведения дезинфекции, а также формализовать нормативный алгоритм определения параметров средств индивидуальной защиты органов дыхания для интеграции в систему поддержки принятия решений при управлении звеньями газодымозащитной службы (ГДЗС) при тушении пожаров.

Методы. Анализ описаний пожаров в медицинских учреждениях, численные методы математического моделирования, а также экспериментальные исследования позволили установить средние временные значения давления в баллонах дыхательных аппаратов газодымозащитников, осуществляющих боевые действия по тушению пожаров в условиях возможного заражения инфекционными болезнями, а также количество времени, необходимое личному составу на проведение соответствующих дезинфекционных мероприятий.

Результаты. В ходе исследования авторами установлено, что: средние значения давления в баллонах дыхательных аппаратов, которые газодымозащитники звена газодымозащитной службы могут максимально израсходовать при следовании к очагу пожара и работе на месте, составляют 170 МПа; наименьшее давление в баллонах дыхательных аппаратов при включении в составе звена значение – 2600 Мпа; время, необходимое для реализации дезинфекционных мероприятий, колеблется в интервале от 81 секунды до 429 секунд.

Заключение. Алгоритмизация расчета запаса воздуха в средствах индивидуальной защиты органов дыхания и зрения (СИЗОД), гармоничное сочетание технологий искусственного интеллекта и компьютерного зрения создает дополнительные предпосылки к созданию новых форм и возможностей для интеграции в комплексную систему поддержки принятия управленческого решения лицу, принимающему решения на месте пожара.

Ключевые слова: дезинфекция; инфекционное отделение; боевые действия; COVID-19; алгоритм; инфекция; медицинское учреждение; боевая одежда пожарного; методы; способы; управление; газодымозащитник; аварийно-спасательное оборудование.

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

Для цитирования: Алгоритмизация ведения боевых действий по тушению пожаров в инфекционных отделениях медицинских учреждений / А.Н. Денисов, И.И. Садыков, М.М. Данилов, А.Ю. Кляузов, М.В. Шевцов, М.А. Мареев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №3. С. 184-200. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-184-200>.

Поступила в редакцию 12.05.2024

Подписана в печать 27.08.2024

Опубликована 30.09.2024

Algorithmization of combat operations to extinguish fires in infectious diseases departments of medical institutions

Alexey N. Denisov ¹, Ildar I. Sadykov ¹, Mihail M. Danilov ¹,
Alexander Yu. Klyauzov ¹, Maksim V. Shevtsov ¹ ✉, Mihail A. Mareev ²

¹ Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia
4, Boris Galushkin str, Moscow 129626, Russian Federation

² Main Fire Department of the Ministry of Emergency Situations of Russia
22/2, build. 1, Prechistenka str., Moscow 119034, Russian Federation

✉ e-mail: shevtsovmv@mail.ru

Abstract

Purpose of research. An analysis of the problems and tasks in conducting combat operations in infectious diseases departments of medical institutions of the country allows us to talk about serious challenges facing the personnel of fire and rescue units. To develop approaches to solving these challenges, it is necessary to determine time periods for disinfection, as well as to formalize a regulatory algorithm for determining the parameters of personal respiratory protection equipment for integration into a decision support system when managing units of the gas and smoke protection service (GDSS) when extinguishing fires.

Methods. Analysis of descriptions of fires in medical institutions, numerical methods of mathematical modeling, as well as experimental studies made it possible to establish the average time pressure values in the cylinders of the breathing apparatus of gas and smoke protectors carrying out combat operations to extinguish fires in conditions of possible infection with infectious diseases, as well as the amount of time required for personnel to carrying out appropriate disinfection measures.

Results. In the course of the study, the authors found that: the average pressure values in the cylinders of breathing apparatus, which gas and smoke protection service members can use as much as possible when traveling to the fire and working on site, are 170 MPa; the lowest pressure in the cylinders of breathing apparatus when included in the unit is 2600 MPa; the time required to implement disinfection measures ranges from 81 seconds to 429 seconds.

Conclusion. Algorithmization of the calculation of air reserves in personal respiratory and vision protection equipment (RPE), a harmonious combination of artificial intelligence and computer vision technologies creates additional prerequisites for the creation of new forms and opportunities for integration into a comprehensive management decision support system for the decision maker at the fire site.

Keywords: disinfection; infectious diseases department; combat operations; COVID-19; algorithm; infection; medical facility; firefighter's combat clothing; methods; methods; management; gas and smoke protection; emergency rescue 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: Denisov A. N., Sadykov I. I., Danilov M. M., Klyauzov A. Yu., Shevtsov M. V., Mareev M. A. Algorithmization of combat operations to extinguish fires in infectious diseases departments of medical institutions. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(3): 184-200 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-184-200>.

Received 12.05.2024

Accepted 27.08.2024

Published 30.09.2024

Введение

Инфекционные болезни постоянно сопровождают человечество, в человеческой памяти остались несколько пандемий (оспа, чума, грипп (испанка), ВИЧ/СПИД, H1N1, COVID-19). Социальный, медицинский и экологический шок от пандемии меняет правила игры для государственного, муниципального и объектового управления, а также заставляет реагировать на крайне неспокойную окружающую обстановку. Столкнувшись с пандемией коронавирусной инфекции COVID-19, повсеместно открывались и/или переоборудовались (в спешном формате) коронавирусные госпитали и больницы, что повлекло за собой увеличение числа пожаров в медицинских учреждениях.

«На учете у надзорных органов МЧС России в настоящий момент находятся 13 тыс. объектов социальной защиты населения и здравоохранения с круглосуточным пребыванием людей. Из них 750 объектов – это закрытые организации, которые относятся к интернатам и диспансерам. По данной категории объектов с 2017 по 2021 год отмечается значительная тенденция роста пожаров – до 73%. Только с начала 2022 года по апрель, на таких объектах произошли уже 65 пожаров, при кото-

рых погибли четыре человека и трое получили травмы»¹.

Анализ возгораний в медучреждениях России последних лет показал, что из более полтысячи пожаров на долю инфекционных больниц приходится около 7,5 % (рис. 1, 2) [1, 2].

Актуальность данного исследования подтверждается, в том числе, суровой статистикой смертности и травмированности пациентов на пожарах (табл. 1).

Согласно работе² «при тушении пожаров в инфекционных отделениях необходимо использовать средства индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД) и кожного покрова, организовать, руководствуясь указаниями медицинского персонала, санитарную обработку личного состава, дезинфекцию боевой одежды пожарного и аварийно-спасательного оборудования, в последующем провести диспансеризацию личного состава».

¹ Заседания Экспертного совета и его секций / заместитель главного государственного инспектора РФ по пожарному надзору МЧС России Сергей Дмитриев [Электронный ресурс]. URL: https://ombudsmanrf.org/exp_sov/zasedaniya_sek_exp_sov (дата обращения: 07.01.2023).

² Сборник методик по тушению пожаров и проведению аварийно-спасательных работ подразделениями пожарной охраны на объектах различного функционального назначения. М.: ВНИИПО, 2022. 23 с.

Так как дезинфекция проводится до выключения из дыхательных аппаратов,

на это необходимо оставить определенный запас воздуха.

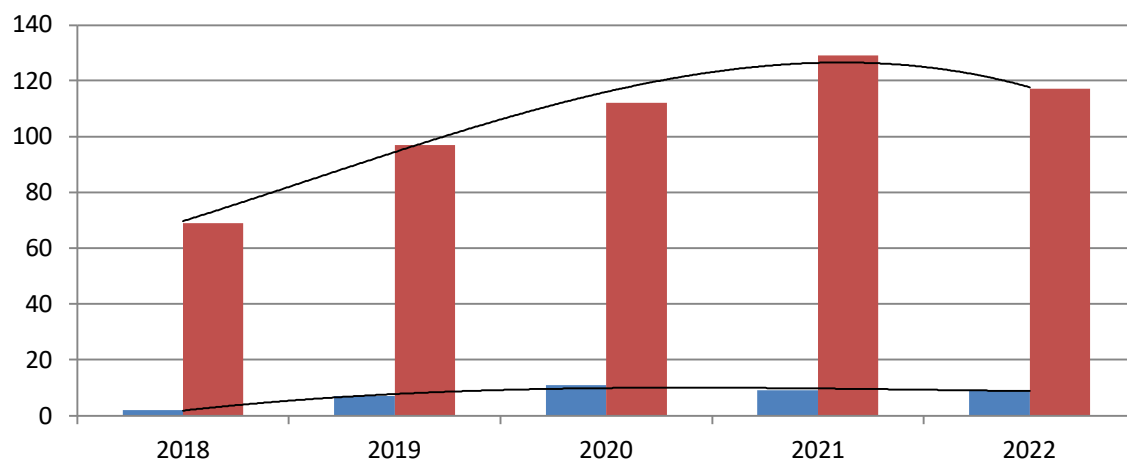


Рис. 1. Анализ возгораний в больницах РФ в период с 2018 по 2022 гг.

Fig. 1. Analysis of fires in Russian hospitals in the period from 2018 to 2022

Таблица 1. Выборка крупных пожаров в медучреждениях в мире за шесть лет

Table 1. A sampling of major fires in healthcare facilities around the world over six years

Дата, город (страна) / Date, city (country)	Место пожара / Place of fire	Погибло, пострадало / Killed, damaged	Приложение / Application
25.04.21, Багдад (Ирак)	Коронавирусный госпиталь «Ибн аль-Хатыб»	82 человека – гибель, 110 – травмы	
19.12.20, Газиантеп (Турция)	Коронавирусное отделение комплексного медицинского центра Санко	8 человек – гибель	Выход из строя кислородной установки
29.06.20, Александрия (Египет)	Частная больница	7 пациентов – гибель, 7 сотрудников больницы – травмы	
11.06.19, Одесса (Украина)	Одесский областной медицинский центр психического здоровья	6 пациентов и 1 сотрудник – гибель, 6 пациентов – травмы	
11.01.19, Гуаякиль (Эквадор)	Лечебный и реабилитационный центр больных наркоманией и алкоголизмом	16 человек – гибель	
17.12.18, Мумбаи (Индия)	Государственная больница	8 человек – гибель, 145 – травмы	

Дата, город (страна) / Date, city (country)	Место пожара / Place of fire	Погибло, постра- дало / Killed, damaged	Приложение / Application
13.08.18, Синьбэй (Тайвань)	Больница	9 человек – гибель, 16 – травмы	Возгорание произошло на седьмом этаже зда- ния больницы.
02.03.18, Баку (Азербайджан)	Республиканский наркологический центр	25 человек – гибель, 3 – травмы	Боевые действия велись при сильном ветре
26.01.18, Мильян Провинция Кёнсан-Намдо, г. Мирян (Южная Корея)	Международный медицинский центр им. Седжона	46 человек – гибель, 146 – травмы	Двухчасовое тушение пожаров при блокиро- вании 111 пациентов внутри лечебного учреждения
17.10.16, Бхуба- неш-вар, штат Орисса (Индия)	Специализированный медцентр SUM	24 человека – гибель, 100 – травмы	Пожар возник в отделе- нии гемодиализа
10.08.16, Багдад (Ирак)	Учебный госпиталь ме- дицинского колледжа Аль-Мустансирия	13 новорожденных – гибель	
24.12.15, Джизан (Саудовская Ара- вия)	Больница	25 человек – гибель, 107 – травмы	В ликвидации возгора- ния принимало участие 11 расчетов; несколько членов медперсонала погибли, выпрыгнув из окон горящего здания

Ряд исследователей описывали проблемы и задачи, стоящие перед личным составом спасательных подразделений при осуществлении действий по предназначению в учреждениях медицинского профиля. Так на основе анализа возможных путей заражения вирусными заболеваниями (табл. 2) автор [3] описывает примеры проведения дезинфекционных мероприятий средств индивидуальной защиты после ведения

боевых действий. Например, проектированию специальных защитных укрытий-бункеров с автономной системой жизнеобеспечения при создании концепции противопожарной защиты медорганизаций лечения больных с бронхо-лёгочными заболеваниями посвящена работа [4]. С нашей точки зрения, это способ, при этом задача организации дезинфекции спасателей, персонала и пациентов не рассматривается.

Таблица 2. Пути заражения вирусными заболеваниями**Table 2.** Ways of infection with viral diseases

Патология / Pathology	Воздушно-капельным путем / By airborne droplets	Через прикосновение/ контакт с экипировкой / Through touch/ contact with equipment
Герпес	Возможен	Возможен
Грипп/ОРВИ	Возможен	Возможен
Конъюнктивит	Невозможен	Возможен
Желудочный грипп	Невозможен	Возможен
Туберкулез	Возможен	Возможен
Грибок кожи/ногтя	Невозможен	Возможен
Полиомиелит	Невозможен	Возможен
Холера	Невозможен	Возможен
Столбняк	Невозможен	Возможен
COVID-19	Возможен	Возможен
Шигеллёз	Невозможен	Возможен
Брюшной тиф	Невозможен	Возможен
Болезнь Боткина	Невозможен	Возможен

Материалы и методы

Дезинфекция проводится антисептическими растворами, предоставляемыми администрацией организации, службами санэпидконтроля (в период ограничений, связанных с COVID-19, пожарно-спасательными подразделениями вывозились антисептические растворы), при отсутствии специализированных растворов и разрешении соответствующих служб – используется водный раствор пенообразователя, смываемый затем обычной водой [5]. Подача водного раствора пенообразователя осуществляется штатным пожарно-техническим оборудованием. Расширить возможности оборудования предлагается пневматическим

распылителем, подключённым к дыхательному аппарату со сжатым воздухом, что позволит проводить обработку личного состава после ведения боевых действий в медицинских учреждениях [6].

Проведение дезинфекции газодымозащитников при пожарах на медицинских объектах рассмотрено в статье [7].

Авторы предлагают нормативный расчет (приказ МЧС России «Об утверждении Правил использования средств индивидуальной защиты органов дыхания и зрения личным составом подразделений пожарной охраны») параметров СИЗОД (рис. 1) дополнить методикой определения показателя характеристики давления контрольного выхода $P_{\text{доп}}$.

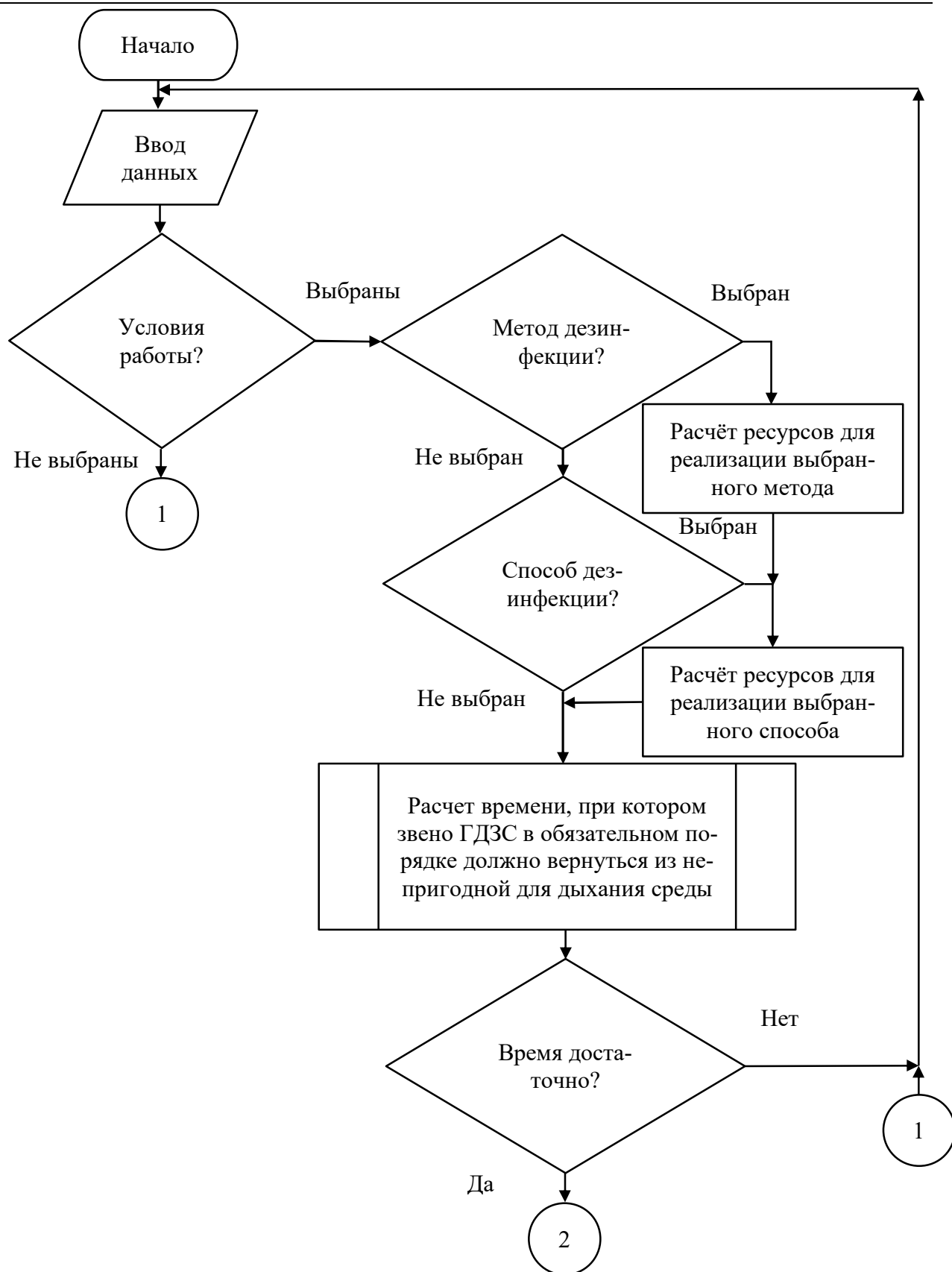
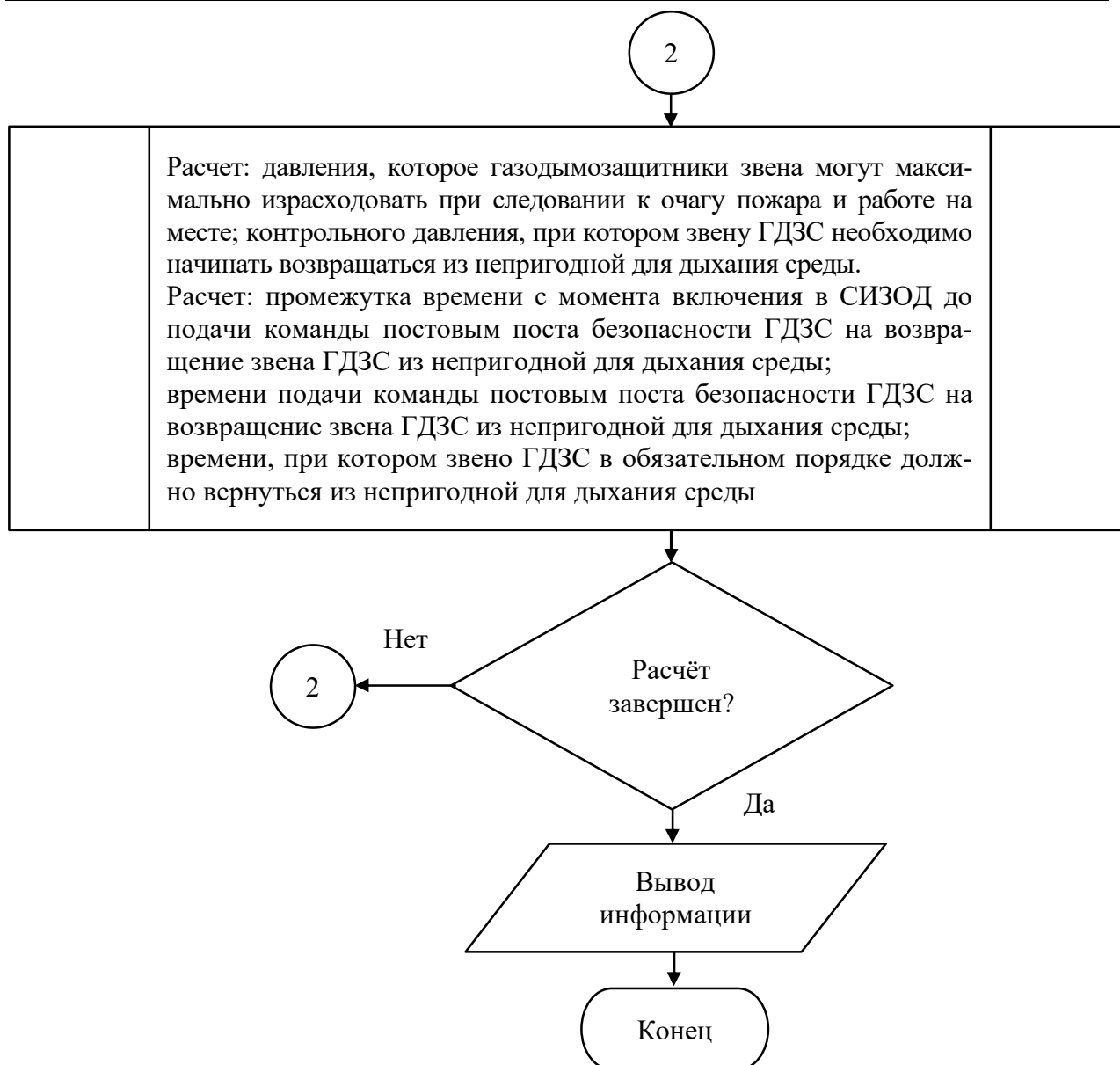


Рис. 2. Алгоритм определения параметров СИЗОД при дезинфекции (окончание на с. 191)

Fig. 2. Algorithm for determining the parameters of RPE during disinfection (ending on page 191)

**Рис. 2.** Окончание (начало на с. 190)**Fig. 2.** Ending (beginning on page 190)**Таблица 3.** Методы и способы дезинфекции, применимые на месте пожара**Table 3.** Disinfection methods and methods applicable at the fire site

Метод / Method	Способ / Method	Время выдержки, мин. / Exposure time, min.
Механический	мытьё	5-90
Физический	ультрафиолетовое излучение	20 (+5)
	воздух	45 (+5)
	пар	20 (+5)
Химический	погружение	15-60
	орошение	15-60
Комбинированный	-	-

При этом предполагается, что различные варианты реализации мер по дезинфекции будут напрямую влиять на основной временной параметр указанного дополнительного давления (табл. 3) [8-11]. Одним из критериев качества (показатель эффективности) дезинфекции является полнота обработки боевой одежды пожарного, пожарно-технического вооружения, оборудования и т.п., который устанавливается на основании данных контрольных измерений, что также влечет временные затраты.

Пример расчетного определения параметров контрольного давления средств индивидуальной защиты органов дыхания, при котором звену газодымозащитной службы необходимо начинать возвращаться из НДС, в данной работе рассматриваться не будет. Его можно посмотреть в [12]. В качестве исходных данных примем: $\overline{P_{max. \text{ пад.}}} = 170 \text{ МПа}$ и $\overline{P_{min. \text{ вкл.}}} = 2600 \text{ МПа}$ (на основе анализа открытых литературных источников и описаний пожаров в медицинских учреждениях в нашей стране и за рубежом при тушении пожаров и проведении спасательных работ за 5 лет). V_6 – вместимость баллона (ов) – 7 л. Условия работы – сложные.

Моделируя работу звена (3 газодымозащитника) в дыхательных аппаратах со сжатым воздухом, получим разброс времён на проведение дезинфекции: 1 мин. 21 сек. – 7 мин. 9 сек. Это зна-

чит, что на этапе предварительного планирования необходимо продумать методы и способы дезинфекции, а также оснащение звена.

Результаты и их обсуждение

Накопление статистической базы о работе звеньев ГДЗС позволит системно оценивать перспективы их использования и развития [13-14]. Информационно-аналитическая система (ИАС) формирует и обобщает систематизированные прогнозируемые величины, представляющие практический интерес для участников тушения пожара, в специальном аналитическом блоке (рис. 3). На следующем этапе происходит превращение ИАС в инструмент поддержки принятия решений руководителем тушения пожара и оперативным штабом. Затем полученные сведения систематизируются по категориям (признакам) как для модуля прогнозирования конкретной ситуации, так и для модуля-аналитика. Дальнейшей работой системы является поэтапное продуцирование вариаций запросов с предлагаемым вариантом конкретного решения. После этого модуль предварительной обработки сведений принимает классифицированные потоки данных. В случае получения некорректной искаженной информации указанные сведения временно не обрабатываются конечным получателем, а транслируются лицу, сформировавшему запрос, в виде ошибки.



Рис. 3. Структурно-функциональная схема информационно-аналитической системы поддержки принятия решений при управлении звеньями ГДЗС

Fig. 3. Structural and functional diagram of the information and analytical support system decision-making when managing units of the GDZS

Предварительная обработка сведений при работе аналитического блока ИАС необязательна, что позволяет одновременно производить расчеты и осуществлять предварительную подготовку. Все прогнозные модели должны проходить процедуры верификации на обоснованность и адекватность. Данные про-

цессы моделирования функции реализуются в модуле прогнозирования для блока «Ликвидация горения».

Качественная оценка параметров рассматриваемой модели может верифицироваться проверкой адекватности прогнозируемых значений путем инверсного подтверждения.

Таблица 4. Сравнительный анализ действий пожарно-спасательных подразделений на современном этапе и с учетом предлагаемых авторами мероприятий

Table 4. Comparative analysis of the actions of fire and rescue units at the present stage and taking into account the measures proposed by the authors

Мероприятия на данный момент времени / Current events /	Предлагаемые меры / Proposed measures
Расчет запаса воздуха, необходимого для тушения пожара и проведения аварийно-спасательных работ	Алгоритмизация расчета запаса воздуха в СИЗОД с учетом дезинфекционных мероприятий
В документах предварительного планирования отсутствует порядок действий, предусматривающий дезинфекцию личного состава, участвующего в тушении	Предусмотреть мероприятия по дезинфекции, а также оснащение звеньев ГДЗС на этапе разработки документов предварительного планирования
Недостаточное применение инновационных методов, информационных продуктов и технологий при планировании и прогнозировании боевых действий	Внедрение информационно-аналитической системы поддержки принятия решений при управлении звеньями ГДЗС

Таким образом, в рамках данной статьи проведен анализ пожаров на медицинских объектах за период с 2018 по 2022 годы, предложен вариант решения некоторых проблемных вопросов работы звеньев ГДЗС при тушении пожаров в медицинских учреждениях, таких как:

- алгоритмизация расчета запаса воздуха в СИЗОД, необходимого для возвращения звена ГДЗС из непригодной для дыхания среды, с учетом дезинфекционных мероприятий, проводи-

мых параллельно с боевыми действиями должностными лицами на месте вызова на объектах медицинской, фармацевтической, биологической инфраструктуры, а также в лечебных и реабилитационных учреждениях;

- отнесение деятельности в условиях тушения пожаров на указанных объектах к категории «сложной»;

- на этапе предварительного планирования необходимо продумать методы и способы дезинфекции, а также оснаще-

ние звеньев, создание на месте пожара зон ожидания (до и после дезинфекции) для участников тушения пожара.

Предложена структурно-функциональная схема информационно-аналитической системы поддержки принятия решений при управлении звеньями ГДЗС.

При этом ряд проблемных вопросов авторы в данной публикации не затронули:

- дезинфицирующие мероприятия отдельных сотрудников пожарно-спасательных подразделений, персонала, пациентов и посетителей объектов здравоохранения и фармацевтической деятельности;

- тактическую вентиляцию, как один из эффективных методов борьбы с опасными факторами пожара.

Выводы

Данное исследование – это только первый шаг. Для того, чтобы действительно получить отдачу от решения про-

блемных вопросов работы звеньев ГДЗС при тушении пожаров в медицинских учреждениях, службе требуется переключиться в инновационное состояние.

Для оценки результата потребуются новые показатели эффективности, отражающие существенные сдвиги в сторону решения проблемных вопросов.

Сочетание предлагаемых алгоритма и схемы, а также возможностей искусственного интеллекта (предиктивный, генеративный, разговорный), компьютерного зрения по требованию лица, принимающего решения (РТП), откроет возможности для интеграции в комплексную систему поддержки принятия управленческого решения на месте пожара [15-18].

Предлагается не фокусироваться на аспекте дезинфекции «для галочки», а разработать частные и универсальные практики с учётом конкретных методов и способов дезинфекции при типовых возбудителях болезней – на начальном этапе.

Список литературы

1. Сухарев В. А., Малов В. В. Анализ причин, приводящих к пожарам на объектах здравоохранения с ночным массовым пребыванием людей в Российской Федерации и за рубежом // Техносферная безопасность в XXI веке: материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Иркутск, 28–30 ноября 2023 года. Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2023. С. 259-265. EDN JRGJYF.
2. Крупные пожары в медицинских учреждениях в мире в 2010-2021 годах. URL: <https://ria.ru/20210425/pozhar-1729852051.html>.
3. Лежнин А. В. Здоровый пожарный. Почему важна правильная гигиеническая обработка СИЗ // Пожарное дело. 2019. № 8. С. 26-27. EDN XHAGKY.
4. Белый В. В. Анализ особенностей организации тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ в противотуберкулезных лечебных учреждениях здра-

воохранения с учетом мест сосредоточения пациентов и медицинского персонала. Разработка предложений по внедрению спасательных бункеров // Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций: сборник статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции, Железногорск, 26 апреля 2019 года. Железногорск, 2019. С. 585-592. EDN ITRAVD.

5. Белов Д. С., Чумаков Е. С. Организация и проведение дезинфицирующих мероприятий при тушении пожаров на объектах с пребыванием больных коронавирусной инфекцией // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. 2021. № 1(8). С. 46-50. EDN IQYJET.

6. Захаров Д. Ю., Волков О. Г. Проведение частичной специальной обработки с использованием дыхательного аппарата на сжатом воздухе // Пожарная и аварийная безопасность: сборник материалов XIV Международной научно-практической конференции, посвященной 370-й годовщине образования пожарной охраны России, Иваново, 12–13 сентября 2019 г. Иваново, 2019. С. 136-137. EDN SVQGHW.

7. Шурыгин М. А., Андреев Д. В. Особенности работы газодымозащитников в условиях необходимости проведения дезинфекции // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации: материалы VIII Международной научно-практической конференции: в 2 ч., Москва, 17–18 марта 2022 года. М.: Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2022. Ч. 1. С. 17-20. EDN IRTJJP.

8. Chavez-Yenter D, Lille HM, Gorissen S, John KK, Vega AS, Jensen JD. Spit, Disgust, and Parasite Stress Theory: A Message Experiment // J Health Commun. 2023 Aug 3; 28(8):498-506. doi: 10.1080/10810730.2023.2229772. Epub 2023 Jun 29. PMID: 37382498; PMCID: PMC10527420.

9. Talukdar R., Sahu S.K., Rajaram M. Implementation Status of Airborne Infection Control Measures in Primary and Secondary Public Health Facilities, Puducherry: A Mixed-Methods Study // Indian J Community Med. 2023 May-Jun. Vol. 48, № 3. P. 483-491. https://doi.org/10.4103/ijcm.ijcm_196_22. Epub 2023 May 30. PMID: 37469915; PMCID: PMC10353669.

10. Popov T., Popov G. Research of decontamination efficiency of contaminated camouflage clothing with applied methods and means in republic of bulgaria // Dishovsky C., Pivovarov A., Benschop H. (eds) Medical Treatment of Intoxications and Decontamination of Chemical Agent in the Area of Terrorist Attack. NATO Security Through Science Series, 2006. Vol 1. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/1-4020-4170-5_21.

11. MacIsaac S.A., Mullin T.J., Munoz S. et al. Immersive ultraviolet disinfection of E. coli and MS2 phage on woven cotton textiles // Sci Rep. 2022. 12, 13260. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17663-5>.

12. Габдуллин В. Б., Ищенко А. Д. Влияние периодов работы звеньев газодымозащитной службы на непрерывность тушения пожара // Технологии техносферной безопасности. 2020. Вып. 1 (87). С. 25-37. <https://doi.org/10.25257/TTS.2020.1.87.25-37>.

13. Садыков И.И., Харитонов А.В. Влияние времени защитного действия СИЗОД на тактические возможности звена ГДЗС // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации: материалы V Международной научно-практической конференции, Москва, 17–18 марта 2016 г. М., 2016. 378 с.

14. Оценка тактических возможностей звеньев газодымозащитной службы / И. В. Коршунов, А. В. Смагин, В. В. Теребнев, И. В. Массерова // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2024. № 1. С. 39-46. <https://doi.org/10.25257/FE.2024.1.39-46>. EDN AZUWQI.

15. Шевцов М. В. Формализация метода оценки усвоения получаемой информации при проведении разведки на пожаре // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2023. № 4(31). С. 132-139. <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2023.50.36.014>. EDN HNNMLV.

16. Метод синтеза математических моделей оценки пожарной обстановки и состояния людей, находящихся в зоне пожара / Н. А. Корневский, М. В. Шевцов, Л. В. Стародубцева, Г. В. Сипливый // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 3. С. 142-159. EDN NLAJHR.

17. Мобильная система мониторинга, раннего обнаружения и оценки пожарной опасности / М. В. Шевцов, В. В. Аксенов, Р. И. Сафронов [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 3. С. 8-25. EDN UATOJS.

18. Денисов А. Н., Степанов О. И. Алгоритм синтеза системы управления пожарными подразделениями на месте пожара // Техносферная безопасность. 2018. № 2(19). С. 51-59. EDN UWUHWI.

References

1. Sukharev V. A., Malov V. V. Analysis of the causes leading to fires at healthcare facilities with large numbers of people staying at night in the Russian Federation and abroad. In: *Tekhnosfernaya bezopasnost' v XXI veke. Materialy XIII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii magistrantov, aspirantov i molodykh uchenykh = Technosphere safety in the XXI century. Materials of the XIII All-Russian scientific and practical conference of undergraduates, graduate students and young scientists*. Irkutsk; 2023. P. 259-265 (In Russ.). EDN JRGJYF.

2. Major fires in medical institutions in the world in 2010-2021. (In Russ.). Available at: <https://ria.ru/20210425/pozhar-1729852051.html>.

3. Lezhnin A. V. Healthy firefighter. Why the correct hygienic treatment of PPE is important]. *Pozharnoe delo = Fire business*. 2019; (8): 26-27. (In Russ.). EDN XHAGKY.

4. Bely V. V. Analysis of the peculiarities of the organization of fire extinguishing and rescue operations in tuberculosis treatment health care institutions, taking into account the places of concentration of patients and medical personnel. Development of proposals for the introduction of rescue bunkers. In: *Aktual'nye problemy obespecheniya pozharnoi bezopasnosti i zashchity ot chrezvychainykh situatsii: Sbornik statei po materialam Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Actual problems of fire safety and protection from emergency situations. Collection of articles on the materials of the All-Russian scientific-practical conference*. Zheleznogorsk; 2019. P. 585-592. (In Russ.). EDN ITRAVD.

5. Belov D. S., Chumakov E. S. Organization and implementation of disinfection measures when extinguishing fires at facilities with presence of patients with coronavirus infection. *Pozharnaya i tekhnosfernaya bezopasnost': problemy i puti sovershenstvovaniya = Fire and technosphere safety: problems and ways of improvement*. 2021; (1): 46-50. EDN IQYJET.

6. Zakharov D. Yu., Volkov O. G. Carrying out partial special treatment using breathing apparatus on compressed air. In: *Pozharnaya i avariinaya bezopasnost'. Sbornik materialov XIV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 370-i godovshchine obrazovaniya pozharnoi okhrane Rossii = Fire and emergency safety. Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference dedicated to the 370th anniversary of the formation of the fire protection of Russia*. Ivanovo; 2019. P. 136-137. (In Russ.). EDN SVQGHW.

7. Shurygin M. A., Andreev D. V. Features of the work of gas smoke defenders in the need for disinfection. In: *Pozharotushenie: problemy, tekhnologii, innovatsii. Materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Firefighting: problems, technologies, innovations. Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference*. . Moscow; 2022. Part 1. P.17-20. (In Russ.). EDN IRTJJP.

8. Chavez-Yenter D., Lille H.M., Gorissen S., John K.K., Vega A.S., Jensen J.D. Spit, Disgust, and Parasite Stress Theory: A Message Experiment. *J Health Commun*. 2023 Aug 3;28(8):498-506. <https://doi.org/10.1080/10810730.2023.2229772>. Epub 2023 Jun 29. PMID: 37382498; PMCID: PMC10527420.

9. Talukdar R., Sahu S.K., Rajaram M. Implementation Status of Airborne Infection Control Measures in Primary and Secondary Public Health Facilities, Puducherry: A Mixed-Methods Study. *Indian J Community Med*. 2023 May-Jun; 48(3):483-491. https://doi.org/10.4103/ijcm.ijcm_196_22. Epub 2023 May 30. PMID: 37469915; PMCID: PMC10353669.

10. Popov T., Popov G. Research of decontamination efficiency of contaminated camouflage clothing with applied methods and means in republic of bulgaria. In: Dishovsky, C., Pivovarov, A., Benschop, H. (eds.). *Medical Treatment of Intoxications and Decontamination of Chemical Agent in the Area of Terrorist Attack. NATO Security Through Science Series*. 2006, vol 1. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/1-4020-4170-5_21.

11. MacIsaac S.A., Mullin T.J., Munoz S. et al. Immersive ultraviolet disinfection of E. coli and MS2 phage on woven cotton textiles. *Sci Rep.* 2022; 12: 13260. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17663-5>.

12. Gabdullin V. B., Ischenko A. D. Influence of the periods of work of gas smoke protection service units on the continuity of fire extinguishing. *Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti = Technosphere safety technologies.* 2020: (1): 25-37 (In Russ.). <https://doi.org/10.25257/TTS.2020.1.87.25-37>.

13. Sadykov I.I., Kharitonov A.V. Influence of the time of the protective effect of PPE on the tactical capabilities of the RDZS unit. In: *Pozharotushenie: problemy, tekhnologii, innovatsii. Materialy V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Firefighting: problems, technologies, innovations. Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference.* Moscow; 2016. 378 p. (In Russ.).

14. Korshunov I. V., Smagin A. V., Terebnev V. V., Masserova I. V. Assessing the tactical capabilities of gas and smoke protection service units. *Pozhary i chrezvychainye situatsii: prevdotvrashchenie, likvidatsiya = Fires and emergency situations: prevention, liquidation.* 2024; (1): 39-46. (In Russ.). <https://doi.org/10.25257/FE.2024.1.39-46>. EDN AZUWQI.

15. Shevtsov M. V. Formalization of the method for assessing the assimilation of received information during fire reconnaissance. *Sibirskii pozharno-spasatel'nyi vestnik = Siberian Fire and Rescue Bulletin.* 2023: (4): 132-139. (In Russ.). <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2023.50.36.014>. EDN HNNMLV.

16. Korenevsky N. A., Shevtsov M. V., Starodubtseva L. V., Siplivy G. V. Method of synthesis of mathematical models for assessing the fire situation and the condition of people in the fire zone. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2021; 11(3): 142-159. (In Russ.). EDN NLAJHR.

17. Shevtsov M. V., Aksenov V. V., Safronov R. I., et al. Mobile system for monitoring, early detection and assessment of fire danger. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2021; 11(3): 8-25. (In Russ.). EDN UATOJS.

18. Denisov A. N., Stepanov O. I. Algorithm for the synthesis of a control system for fire departments at a fire site. *Tekhnosfernaya bezopasnost' = Technospheric safety.* 2018; (2): 51-59. (In Russ.). EDN UWUHWI.

Информация об авторах / Information about the Authors

Денисов Алексей Николаевич, доктор технических наук, профессор, Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: dan_aleks@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2594-9389>, Author ID: 57221203824

Aleksey N. Denisov, Dr. of Sci. (Engineering), Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moscow, Russian Federation, e-mail: dan_aleks@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2594-9389>, Author ID: 57221203824

Садыков Ильдар Ильшатович, старший преподаватель, Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: I.Sadykov@academygps.ru, SPIN 7003-3740, ID: 1122334

Ildar I. Sadykov, Senior Lecturer, Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moscow, Russian Federation, e-mail: I.Sadykov@academygps.ru, SPIN 7003-3740, ID: 1122334

Данилов Михаил Михайлович, кандидат технических наук, доцент, Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: mdagps@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2732-7620>, SPIN-код: 1539-8110

Mikhail M. Danilov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moscow, Russian Federation, e-mail: mdagps@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2732-7620>, SPIN-код: 1539-8110

Кляузов Александр Юрьевич, доцент, Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: ptis316@mail.ru, SPIN-код: 2035-5126, AuthorID: 767064

Alexander Yu. Klyauzov, Associate Professor, Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moscow, Russian Federation, e-mail: ptis316@mail.ru, SPIN-код: 2035-5126, AuthorID: 767064

Шевцов Максим Викторович, кандидат технических наук, начальник учебно-методического центра, Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: shevtsovmv@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5537-2392>, SPIN-код: 2206-2472, AuthorID: 1132516

Maxim V. Shevtsov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of Training and Methodological Center, Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moscow, Russian Federation, e-mail: shevtsovmv@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5537-2392>, SPIN-код: 2206-2472, AuthorID: 1132516

Мареев Михаил Александрович, старший инспектор, Главное управление пожарной охраны МЧС России, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: mareev.mikhail@mail.ru, SPIN-код: 2799-9425, AuthorID: 1232680

Mikhail A. Mareev, Chief Inspector, Fire Main Office EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation, e-mail: mareev.mikhail@mail.ru, SPIN-код: 2799-9425, AuthorID: 1232680

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.81

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-201-213>

Совершенствование математических методов обеспечения безопасности на основе анализа видеоряда в реальном времени

М.В. Абрамов ¹, А. В. Аверченков ² ✉

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

² Институт конструкторско-технологической информатики РАН
Вадковский пер., д. 18, стр. 1А, г. Москва 127005, Российская Федерация

✉ e-mail: mahar@mail.ru

Резюме

Цель исследования. В настоящее время математические методы анализа видеоряда представляют собой структурированную совокупность подходов к распознаванию изображений на основе разности свечения различных областей изображений. Множество данных значений описываются с применением математических зависимостей, однако существующие подходы работают только для стандартных изображений, полученных при обработке видеоданных. Целью настоящего исследования является разработка нового подхода к анализу изображений, полученных, в том числе, с применением терагерцевого излучения, имеющего специфические характеристики, как физические, так и математические.

Методы. В настоящем исследовании применялись следующие теоретические и эмпирические научные методы: анализ (проведен анализ существующих на сегодняшний день известных математических методов обработки изображений с целью распознавания образов); синтез (предложен принципиально новый подход к системам безопасности, представляющий собой единую систему, состоящую из отдельных взаимосвязанных подсистем); моделирование (разработана информационная модель системы безопасности на базе СКУД с применением системы анализа и распознавания потенциально опасных предметов на основе видеопотока в реальном времени); математизация (система анализа изображений описана языком математических законов и формул).

Результаты. В результате исследования на основе анализа современных материалов, в перспективе предлагается концепция системы обеспечения безопасности на основе анализа видеоряда в реальном времени с применением перспективных технологий сканирования объектов. В качестве основного новшества предлагается усовершенствованный метод анализа изображений Виолы-Джонса с применением дополнительного множества, характеризующего признаковое пространство объектов в терагерцевом диапазоне излучения.

Заключение. Применение технологий высокочастотного сканирования с интеллектуальными системами распознавания образов объектов в режиме реального времени позволит в существенной мере снизить риски проникновения злоумышленников на охраняемые объекты, а также повысить безопасность граждан при сравнительно малых затратах на разработку и внедрение модернизированных систем безопасности.

Ключевые слова: анализ данных в реальном времени; СКУД; система распознавания образов; искусственный интеллект; терагерцевое излучение; метод Виолы-Джонса; системный анализ; математическое моделирование.

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

Для цитирования: Абрамов М.В., Аверченков А. В. Совершенствование математических методов обеспечения безопасности на основе анализа видеоряда в реальном времени // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №3. С. 201-213. [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2024-28-3-201-213](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-201-213).

Поступила в редакцию 04.06.2024

Подписана в печать 19.07.2024

Опубликована 30.09.2024

Improvement of mathematical methods for ensuring security based on real-time video sequence analysis

Maxim V. Abramov ¹, Andrey V. Averchenkov ² ✉

¹ Bryansk State University
3, ave. S. Dimitrova, Bryansk 241037, Russian Federation

² Institute of Design and Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences
18, building. 1A, Vadkovsky Lane, Moscow 127005, Russian Federation

✉ e-mail: mahar@mail.ru

Abstract

Purpose of research. Currently, mathematical methods of video sequence analysis represent a structured set of approaches to image recognition based on the difference in the glow of different image areas. Many of these values are described using mathematical dependencies, however, existing approaches work only for standard images obtained during video data processing. The purpose of this study is to develop a new approach to analyzing images obtained, including those using terahertz radiation, which has specific characteristics, both physical and mathematical.

Methods. The following theoretical and empirical scientific methods were used in this study. Analysis (the analysis of the currently known mathematical methods of image processing in order to recognize images is carried out). Synthesis (a fundamentally new approach to security systems is proposed, which is a single system consisting of separate interconnected subsystems). Modeling (an information model of a security system based on ACS has been developed using a system for analyzing and recognizing potentially dangerous objects based on a real-time video stream). Mathematization (the image analysis system is described in the language of mathematical laws and formulas).

Results. As a result of the research based on the analysis of modern materials, the concept of a security system based on real-time video sequence analysis with the use of advanced object scanning technologies is proposed in the future. As the main innovation, an improved Viola-Jones image analysis method is proposed using an additional set characterizing the feature space of objects in the terahertz radiation range.

Conclusion. The use of high-frequency scanning technologies with intelligent object image recognition systems in real time will significantly reduce the risks of intruders entering protected facilities, as well as increase the safety of citizens with relatively low costs for the development and implementation of upgraded security systems.

Keywords: real-time data analysis; ACS; pattern recognition system; artificial intelligence; terahertz radiation; Viola-Jones method; system analysis; mathematical 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: Abramov M. V., Averchenkov A. V. Improvement of mathematical methods for ensuring security based on real-time video sequence analysis. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(3): 201-213 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-201-213>.

Received 04.06.2024

Accepted 19.07.2024

Published 30.09.2024

Введение

Проблема распознавания образов на основе анализа видеоряда в реальном времени известна, имеет актуальность и научную значимость, её решением занимались исследователи в различных научных коллективах. За последние 15 лет предложен ряд оригинальных решений по созданию информационных систем для обработки видеоряда, однако стоит отметить, что на современном этапе развития технических и программных средств эти решения утратили свою актуальность. Также, в настоящее время возникли объективные сложности по ухудшению проблемы безопасности в обществе. В связи с этим возникает необходимость разработки принципиально новых подходов и методов распознавания не только лиц, но и образов, представляющих собой потенциально опасные предметы.

Математические методы анализа видеоряда в настоящее время представляют собой совокупность подходов к распознаванию изображений на основе разности свечения различных областей изображений. Множество данных значений описываются с применением математических зависимостей, однако существующие подходы работают только для стандартных изображений, полученных при обработке видеоданных. Новый подход, предложенный в данной работе, предполагает анализ изображений, по-

лученных, в том числе, с применением терагерцевого излучения, имеющего специфические характеристики, как физические, так и математические. Учет их является одним из важнейших параметров при анализе видеоряда на новых принципах для обеспечения безопасности объектов.

Материалы и методы

В настоящей работе в качестве объекта исследования выбрано обеспечение безопасности образовательных учреждений. Множество негативных примеров доказывает, что меры, принимаемые на сегодняшний день, являются недостаточными и малоэффективными. Видеонаблюдение не обеспечивает в полной мере необходимый уровень безопасности, даже с учетом компиляции с устройствами сканирования и обнаружения металлических предметов. Необходимы принципиально новые методы к подходу обеспечения безопасности, и одним из таких выступает разработка и внедрение новой системы контроля и управления доступом с применением видеокамер, способных не только распознавать образы потенциально опасных предметов, но и проводить сканирование сквозь верхнюю одежду и внутри ручной клади.

Предложенное решение проблемы можно формализовать методом «чёрного ящика» (рис. 1).



Рис. 1. Формализация задачи методом черного ящика

Fig. 1. Formalization of the task by the black box method

Входные параметры описываются следующим множеством:

$$Vin = \langle Res, Chas, BitR, BitK, SumPix, VidCom, Dp, XAP \rangle, \quad (1)$$

где *Res* – Экранное разрешение (Resolution) – количество точек (пикселей) по горизонтали и вертикали, из которых состоит изображение (видеокадр) на экране. [1, с. 42] Для решения поставленной задачи необходимо разрешение не менее 1920x1080 точек. От данного параметра напрямую зависит качество распознавания данных. $Res = f(Pt)$;

Chas – Частота кадров – величина, указывающая на то, какое количество

кадров сменяется за секунду¹. Стандартной скоростью воспроизведения видеосигнала 30 кадров/с;

BitR – Битрейт (ширина видеопотока) – показатель количества обрабатываемых бит видеоинформации за одну секунду времени. Для решения поставленной задачи необходим битрейт не менее 5 Мбит/с.

BitK – число битов в кадре.

SumPix – количество пикселей в кадре для каждой цветностной компоненты;

¹ Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // ArXiv: 1505.04597.

VidCom – формат видеокомпрессии;

Dp – диапазон терагерцевого излучения, исходящего от объекта. Максимально допустимый диапазон частот – Гц, диапазон длин волн – 3 – 0,03 мм. соответственно. $Dp = 10^{11} \dots 10^{13} \text{ Гц.}$;

$XAP = \frac{\Delta A}{\Delta I}(t)$ – диапазон частот терагерцевого излучения, определенный для наблюдений.

Стоит отметить, что последний указанный параметр задается отношением по причине неопределенности терагерцевого (ТГц, T-ray) диапазона. Достоверно установлен факт расположения ТГц на шкале электромагнитных излучений в диапазоне от микроволнового до инфракрасного излучения.

Необходимо подчеркнуть, что данный параметр является определяющим для организации всей системы безопасности, предлагаемой к разработке и внедрению.

Набор сигналов для принятия решений зададим множеством:

$$NSout = \langle Q(m, n), Us, PP \rangle, \quad (2)$$

где $PP = \langle (m_1, n_1; m_2, n_2; \dots m_n, n_n) \rangle$ – совокупность значений точек, формирующих результирующее изображение объекта;

$Q(m, n)$ – значение точки интегрального изображения, проанализированного нейронной сетью;

Us – управляющий сигнал на контроллер запорных механизмов.

Терагерцевое излучение в данной работе будем понимать как электромагнитное излучение, спектр частот которого расположен между инфракрасным

и микроволновым диапазонами. Включает в себя электромагнитные волны определяемого МСЭ диапазона частот 0,3 – 3 ТГц, хотя верхняя граница для терагерцевого излучения несколько условна и в некоторых источниках считается 30 ТГц. Определяемый МСЭ диапазон частот соответствует диапазону децимиллиметровых волн, 1 – 0,1 мм. Такое же определение диапазону волн даёт ГОСТ 24375-80 и относит эти волны к диапазону гипервысоких частот¹.

«Устройство работает по принципу «разные объекты светятся с разной яркостью», значит при расчете в зависимости от материала, из которого объект сделан. Таким образом, взрывоопасные и иные потенциально-опасные предметы могут быть отличны от иных. Прибор позволяет «смотреть» через ткань, керамику и даже дерево. Вода и металл являются экранами, не позволяющими просматривать сквозь них².

Непосредственное распознавание образов потенциально-опасных объектов будет осуществляться в работе посредством свёрточной нейронной сети по усовершенствованному методу Виолы-Джонса.

При наблюдении объекта под сравнительно малым углом (около 30°) указанный метод обнаруживает черты лица и хорошо работает [2, с. 12]. Однако в случае увеличении угла наклона свыше

¹ ГОСТ 24375-80 Радиосвязь. Термины и определения. М., 1980. С. 54.

² Kalchbrenner N., Danihelka I., Graves A. Grid Long Short-Term Memory // ArXiv: 1507.01526, с.8.

30° необходимо отметить, что вероятность распознавания в образе лица резко снижается [3, с. 123].

Данная особенность метода в базовой реализации не позволяет детектировать лицо человека, развернутое под произвольным углом, что в свою очередь значительно затрудняет и практически делает невозможным использование настоящего алгоритма в современных системах, особенно учитывая постоянно растущие потребности оных.

Для того, чтобы рассчитать яркость прямоугольного участка изображения, используют интегральное представление [4, с. 211]. Такое представление используется часто и в других методах, например, в вейвлет-преобразованиях, Speeded up robust feature (SURF), фильтрах Хаара и многих разработанных алгоритмах [5, с. 122]. Интегральное представление позволяет быстро рассчитывать суммарную яркость произвольного прямоугольника на данном изображении, причем время расчета не зависит от площади прямоугольника [6, с.32].

Интегральное представление изображения есть ничто иное как матрица, совпадающая по размерам с исходным базовым изображением [7, с. 143]. В каждом элементе матрицы определяется сумма интенсивностей всех ее составных элементов (пикселей), расположенных выше и левее заданного элемента. [8, с. 56] Элементы матрицы рассчитываются по следующей формуле

$$Q(m,n)=\sum_{m'\leq m,n'\leq n} q(m',n'), \quad (3)$$

где $Q(m,n)$ – значение точки (m,n) интегрального изображения;

$q(m,n)$ – значение интенсивности исходного изображения.

Таким образом, исходя из того, что ключевым определяющим фактором для настоящего исследования является то, что на базе применения данного метода, а именно метода применения интегрального представления изображения вычисление равновидовых признаков с разными геометрическими параметрами осуществляется за равный интервал времени, можно однозначно указать на эффективность названного метода.

Каждый отдельный элемент матрицы $Q(m,n)$ есть ни что иное как сумма пикселей в прямоугольнике от $q(0,0)$ до $q(m,n)$ [9, с. 80] Таким образом значение каждого элемента $Q(m,n)$ представляет собой сумму значений пикселей левее и выше определённого пикселя $q(m,n)$. [10, с. 142] Расчет матрицы занимает линейное время, пропорциональное числу пикселей в изображении, и его можно производить по следующей формуле:

$$Q(m,n)=q(m,n)-Q(m-1,n-1)+Q(m,n-1)+Q(m-1,n). \quad (4)$$

Интегральное представление содержит в себе немаловажную особенность. По интегральной матрице можно значительно быстрее определить сумму пикселей произвольного прямоугольника, что в свою очередь особенно важно для систем, работающих с потоком данных в режиме реального времени [11, с. 76].

С точки зрения необходимости использования наиболее производительных алгоритмов получения признаков, перспективным является использование Хаар-подобных характеристик, представляющих собой результат сравнения яркостей в двух прямоугольных областях изображения [12, с.57].

Определим, что задано некоторое множество объектов R и множество допустимых объектов S . Пусть $g:S \rightarrow R$ определяется как решающая функция. Настоящая функция g обязана допускать непосредственную эффективную реализацию с помощью компьютерной системы, вследствие чего она определяется как алгоритм. Признак (feature) f объекта r – отображение $f:R \rightarrow Df$, где Df – множество допустимых значений признака. А именно, некоторый алгоритм $g:S \rightarrow R$ тоже можно рассматривать как признак. При условии, что будет определён набор признаков $f_1, \dots, f_n$, то вектор $x=(f_1(r), \dots, f_n(r))$ обозначается как признаковое описание объекта $r \in R$. Непосредственно с самими объектами вполне допустимо отождествлять признаковые описания.

Однако при этом, при задании признакового пространства $R=Df_1 \times \dots \times Df_n$ стандартный метод учитывает интенсивность только стандартного видеосигнала. В связи с этим целесообразно ввести дополнительное множество $R'=Df_1' \times \dots \times Df_n'$, характеризующее признаковое пространство объектов в терагерцевом диапазоне излучения. Сове-

купность анализа двух признаковых множеств позволит в существенной мере повысить точность распознавания потенциально опасных объектов.

Таким образом результирующее признаковое пространство R_{RES} рассчитывается по формуле

$$R_{RES} = \sum Df_1 \times \dots \times Df_n + Df_1' \times \dots \times Df_n'. \quad (5)$$

Исходя из вышеизложенного, разработана принципиально новая схема обеспечения безопасности с использованием технологии T-ray и интеллектуальной системы распознавания образов потенциально опасных предметов, что, в свою очередь, позволит проводить анализ видеопотока в реальном времени и избавит от необходимости присутствия оператора. Схема решения представлена на рис. 2.

В соответствии с предлагаемой схемой человек, попадающий в поле зрения высокочастотного излучателя, становится объектом изучения. Формируемое изображение попадает в интеллектуальную систему распознавания образов, работающую на технологии свёрточной нейронной сети, на основе работы которой принимается решение о допуске или не допуске без дополнительной проверки человека на охраняемый объект. В случае обнаружения образа потенциально опасного объекта, система подает тревожный сигнал и блокирует доступ в помещение в автоматическом режиме. Схема развёртывания системы на базе учреждения представлена на рис. 3.

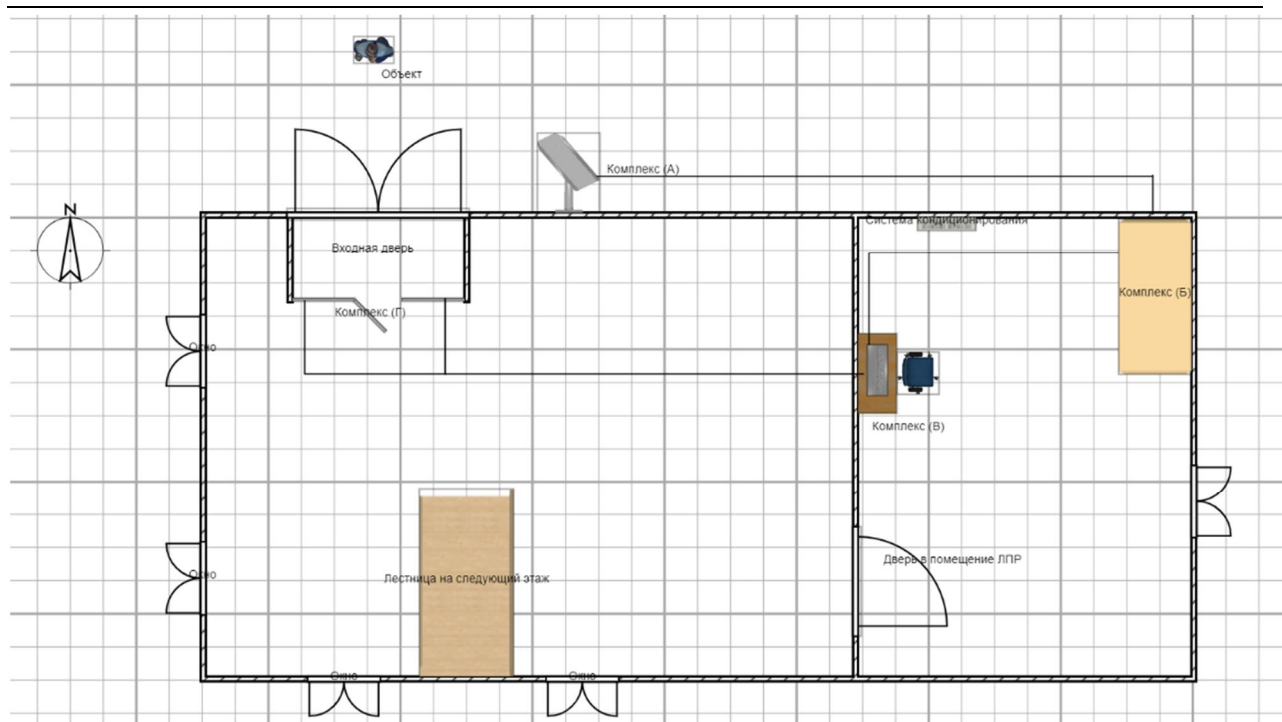


Рис. 2. Схема предлагаемого решения обеспечения безопасности: **А** – видеокамера с высоким разрешением и электромагнитным излучателем в диапазоне частот, определяемого МСЭ 0,3—3 ТГц, концептуальный аналог технологии T-ray; **Б** – сервер с базой данных образов потенциально опасных предметов; **В** – рабочая станция с интеллектуальной системой распознавания образов и анализа видеоряда в режиме реального времени, а также системой подачи тревожного сигнала; **Г** – автоматическая система блокировки доступа на охраняемый объект

Fig. 2. Scheme of the proposed security solution **A** – a high—resolution video camera and an electromagnetic emitter in the frequency range determined by ITU 0.3-3 THz, a conceptual analogue of T-ray technology; **Б** – a server with a database of images of potentially dangerous objects; **В** – a workstation with an intelligent image recognition and video sequence analysis system in real-time mode, as well as an alarm system; **Г** – an automatic system for blocking access to a protected object

Применение технологии свёрточной нейронной сети (CNN) обусловлено следующим:

1. CNN имеет возможность распознавать объекты на изображении независимо от их местоположения, что особенно актуально при анализе видеопотока в режиме реального времени, так как в данном случае объекты не статичны, а постоянно перемещаются в пространстве [2, с. 19].

2. Заданный на старте набор входных параметров применяется для всех частей входного изображения, что в свою очередь позволяет CNN быть более компактной и эффективной [13, с. 135].

3. Иерархические представления, используемые в CNN, позволяют моделировать сложные структуры данных, что особенно актуально при проектировании сложной многоуровневой системы обеспечения безопасности.

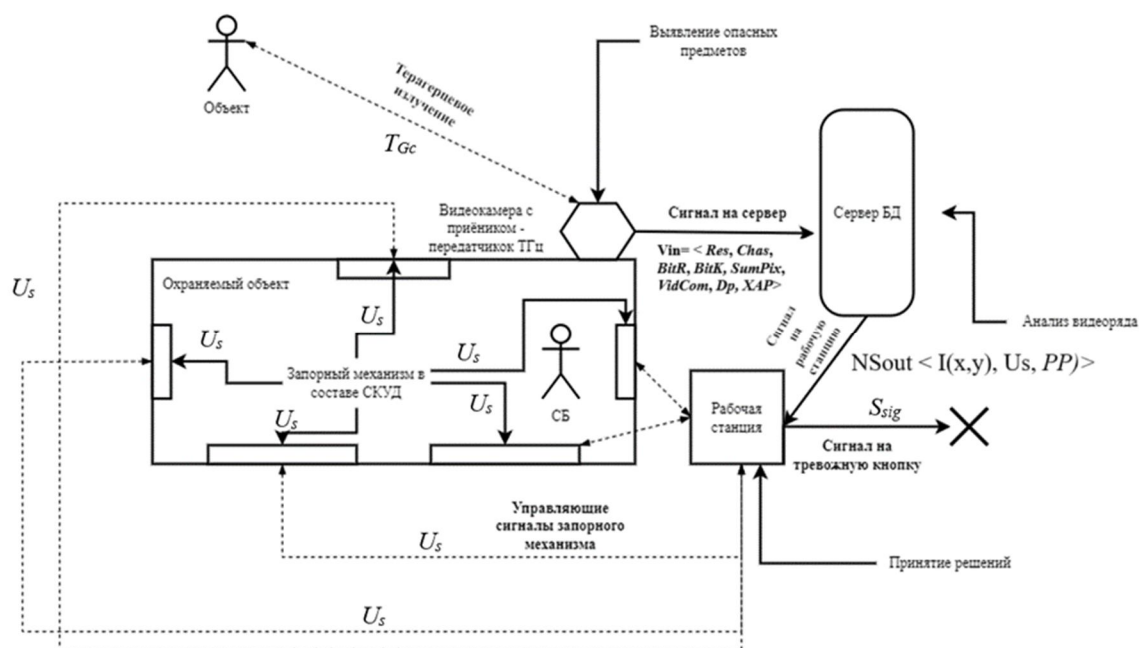


Рис. 3. Структурная схема предлагаемой системы безопасности

Fig. 3. The block diagram of the proposed security system

4. Возможность обучения end-to-end: обучение модели происходит на всём пути от входных данных до вывода, что ускоряет процесс обучения и повышает общую производительность сети.

Результаты и их обсуждение

Как было указано выше при задании признакового пространства $R = DfI \times \dots \times Dfn$ стандартный метод учитывает интенсивность только стандартного видеосигнала. В связи с этим фактом было предложено ввести дополнительное множество $R' = DfI' \times \dots \times Dfn'$, характеризующее признаковое пространство объектов в терагерцевом диапазоне излучения. Совокупность анализа двух признаковых множеств позволит в существенной мере повысить точность распознавания объектов.

Вместе с этим возникает необходимость применения дополнительных вы-

числительных мощностей и затрат времени, прямо пропорционально количеству обрабатываемых диапазонов входного сигнала. Соответственно, при необходимости обработки двух диапазонов, характеризующих стандартное признаковое при учете интенсивности видеосигнала, и признаковое пространство, характеризующие интенсивность сигнала в терагерцевом диапазоне, время обработки совокупности сигналов будет рассчитано по следующей формуле:

$$Tsum = T(DfI \times \dots \times Dfn) + T(DfI' \times \dots \times Dfn'). \quad (6)$$

Существующие на сегодняшний день модели анализа изображений, основанные в том числе на рассматриваемом методе Виолы-Джонса, применяются для распознавания образов объектов, доступных для устройств считывания изображений, не учитывая тот факт, что некоторые объекты, в том числе потен-

циально опасные для наблюдателя, могут быть скрыты от указанных устройств. При условии учета предлагаемого в работе усовершенствования метода анализа объектов и применении предложенной системы безопасности представляется возможным вывести на сравнительно новый качественный уровень обеспечение безопасности граждан в целом.

Выводы

В качестве вывода стоит отметить, что проблема повышения уровня безопасности граждан имеет новые решения через разработку метода выявления потенциально опасных предметов на основе анализа видеоряда в реальном времени с применением технологии терагерцевого излучения. В работе пред-

ложена схема развёртывания указанной системы, а также предложено введение дополнительного множества, характеризующего признаковое пространство объектов в терагерцевом диапазоне излучения, тем самым позволяющее усовершенствовать математический метод анализа изображений Виолы-Джонса.

Применение технологий высокочастотного сканирования с интеллектуальными системами распознавания образов объектов в режиме реального времени позволит в существенной мере снизить риски проникновения злоумышленников на охраняемые объекты, а также повысить безопасность граждан при сравнительно малых затратах на разработку и внедрение модернизированных систем безопасности.

Список литературы

1. Tiwari S., Singh A., Shukla V. Statistical moments based noise classification using feed forward back propagation neural network // Int. J. of Computer Applications. 2011. Vol. 18, № 2. P. 36-40.
2. Нейрокомпьютеры. От программной к аппаратной реализации / М. А. Аляутдинов, А. И. Галушкин, П. А. Казанцев, Г. П. Остапенко. М., 2016. 152 с.
3. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 2016. 458 с.
4. Бродецкий Г.Л. Системный анализ в логистике. Выбор при многих критериях. М.: Academia, 2015. 224 с.
5. Буй Тхи Тху Чанг, Фан Нгок Хоанг, Спицын В.Г. Распознавание лиц на основе применения метода Виолы-Джонса, Вейвлет-преобразования и метода главных компонент // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 319, № 6. С. 54–59.
6. Khan H, Yener B. Learning Filter Widths of Spectral Decompositions with Wavelets// Proc. of the NIPS Conf. 2018. P. 4601–4612.

7. Никитин А. А., Лиманова Н. И. Процесс распознавания изображения нейронной сетью // Молодой ученый. 2020. № 47 (337). С. 23-25.
8. Рекурсивный алгоритм формирования структурированных множеств информационных блоков для повышения скорости выполнения процедур определения их источника / М.О. Таныгин, Х.Я.А. Алшаиа, В.П. Добрица, О.Г. Добросердов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. Т. 25, № 2. С. 51-64. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-2-51-64>.
9. Трофимова Е. А., Плотников С. В., Гилев Д. В. Математические методы анализа / под общ. ред. Е. А. Трофимовой. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2015. 272 с.
10. Конарев Д. И., Гуламов А. А. Синтез архитектуры нейронной сети для распознавания образов морских судов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(1): 130-143. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-130-143>.
11. Вдовин В.М., Суркова Л.Е., Валентинов В.А. Теория систем и системный анализ. М.: Дашков и К, 2013. 644 с.
12. Numerical Removal of Water-Vapor Effects from Hz-TDS Measurements: Withawat Withayachumnankul, Bernd M. Fischer, Samuel P. Mickan, Member, IEEE, and Derek Abbott, Fellow, IEEE; Oct, 2007.
13. Архипов А. Е. Фильтрация сложных сигналов на основе двухуровневой нечетко-логической модели // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023. Т. 27, № 2. С. 140-154. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-140-154>.
14. T-Ray Imaging: Daniel M. Mittleman, Rune H. Jacobsen, and Martin C. Nuss, Member // IEEE; IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS. September 1996. Vol. 2, № 3.
15. Агафонов В.А. Системный анализ в стратегическом управлении. М.: Русайнс, 2016. 48 с.
16. Белов П.Г. Управление рисками, системный анализ и моделирование: в 3 ч. Люберцы: Юрайт, 2016. Ч. 1. 211 с.
17. Способ реализации адаптации робота к изменениям режима контактного взаимодействия с использованием глубоких полносвязных нейронных сетей / С.И. Савин, Л.Ю. Ворочаева, А.В. Мальчиков, А.М. Салихзянов, Э.М. Заляев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(1): 206-214. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-206-214>.

References

1. Tiwari S., Singh A., Shukla V. Statistical moments based noise classification using feed forward back propagation neural network. *Int. J. of Computer Applications*. 2011; 18 (2): 36-40.

2. Alyautdinov M. A., Galushkin A. I., Kazantsev P. A., Ostapenko G. P. Neurocomputers. From software to hardware implementation. Moscow; 2016. 152 p. (In Russ.)
3. Bellman R., Dreyfus S. Applied problems of dynamic programming. Moscow: Nauka; 2016. 458 p. (In Russ.)
4. Brodetsky G.L. System analysis in logistics. The choice under many criteria. Moscow: Academia; 2015. 224 p. (In Russ.)
5. Bui Thi Thu Chang, Phan Ngoc Hoang, Spitsyn V.G. Face recognition based on the Viola–Jones method. Wavelet transform and principal component method. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Tomsk Polytechnic University*. 2012; 319(6): 54-59 (In Russ.)
6. Khan H., Yener B. Learning Filter Widths of Spectral Decompositions with Wavelets. *Proc. of the NIPS Conf*. 2018: 4601-4612.
7. Nikitin A. A., Limanova N. I. The process of image recognition by a neural network. Text: direct. *Molodoi uchenyi = Young Scientist*, 2020; (47): 23-25. (In Russ.)
8. Tanygin M. O., Alshaea H. Y. A., Dobritsa V. P., Dobroserdov O. G. Recursive Algorithm for Forming Structured Sets of Information Blocks to Increase the Speed of Their Source Determination Procedures. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(2): 51-64 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-2-51-64>.
9. Trofimova E. A., Plotnikov S. V., Gilev D. V. Mathematical methods of analysis. Yekaterinburg: Ural University Press; 2015. 272 p. (In Russ.)
10. Konarev D. I., Gulamov A. A. Synthesis of Neural Network Architecture for Recognition of Sea-Going Ship Images. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(1): 130-143 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-130-143>
11. Vdovin V.M., Surkova L.E., Valentinov V.A. Theory of systems and system analysis. Moscow: Dashkov and K; 2013. 644 p. (In Russ.)
12. Numerical Removal of Water-Vapor Effects from Hz-TDS Measurements: Withawat Withayachumnankul, Bernd M. Fischer, Samuel P. Mickan, Member, IEEE, and Derek Abbott, Fellow, IEEE; Oct, 2007.
13. Arkhipov A. E. Filtering of complex signals based on a two-level fuzzy-logic model. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(2): 140-154 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-140-154>.
14. T-Ray Imaging: Daniel M. Mittleman, Rune H. Jacobsen, and Martin C. Nuss, Member. *IEEE; IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS*. September 1996; 2 (3).

15. Agafonov V.A. System analysis in strategic management. Moscow: Rusains; 2016. 48 p. (In Russ.)
16. Belov P.G. Risk management, system analysis and modeling]. Lyubertsy: Yurait; 2016. Part 1. 211 p. (In Russ.)
17. Savin S.I., Vorochaeva L.Yu., Malchikov A. V., Salikhzyanov A.M., Zalyaev E.M. Implementation Method of the Robot Adaptation to Contact Interaction Mode Changes Using Deep Fully Connected Neural Networks. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(1): 206-214 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-206-214>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Абрамов Максим Витальевич, Брянский государственный инженерно-технологический университет, г. Брянск, Российская Федерация, e-mail: brusnikin1994@gmail.com

Maxim V. Abramov, Bryansk State University of Engineering and Technology, Bryansk, Russian Federation, e-mail: brusnikin1994@gmail.com

Аверченков Андрей Владимирович, ведущий научный сотрудник, Институт конструкторско-технологической информатики РАН, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: mahar@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0196-1332>

Andrey V. Averchenkov, Leading Researcher, Institute of Design and Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: mahar@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0196-1332>

УДК 004.93

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-214-227>

Разработка метода локализации в замкнутой и насыщенной объектами среде

Н. А. Мостаков ¹, А. А. Захарова ¹

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

 e-mail: nikrus333@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Целью работы является исследование и разработка методов локализации сверхлегкого беспилотного летательного аппарата (БПЛА) в насыщенной объектами замкнутой среде, основанных на семантико-топологических данных, получаемых из окружения. Целью работы также является разработка программного обеспечения и выбор аппаратного комплекса для запуска и опробования разработанного решения.

Методы. Для реализации поставленной цели были проведен обзор и сравнение существующих решений. Оптимизация архитектуры нейронной сети для детектирования объектов. Разработка алгоритма составления графа объектов, отражающего их взаимосвязи. Разработка алгоритма сравнения графов для определения положения БПЛА. Внедрение решения по повышению точности определения геометрического центра задетектированных объектов. Использование методов определения ключевых точек (SIFT, SURF) для решения проблемы идентификации объектов одного класса.

Результаты. Результатом работы является разработанный метод локализации на основе семантико-топологических данных, получаемых из окружения. Также разработан пакет программного обеспечения, основанный на платформе ROS2 humble, и реализованный на аппаратной части, основанной на плате Rockchip 3588. Эксперименты проводились на готовых наборах данных (KUM dataset) и с использованием БПЛА в помещении.

Заключение. Разработанная система локализации представляет собой перспективный шаг в направлении создания эффективных и гибких систем, способных работать в сложных условиях. В будущем планируется интегрировать данный метод с другими датчиками для повышения робастности в динамичных условиях, добавить алгоритмы визуальной одометрии для повышения точности локализации БПЛА, и расширить применение системы на БПЛА, используемых в других отраслях (инспекция инфраструктуры, поиск и спасение).

Ключевые слова: компьютерное зрение; локализация; детектирование объектов; построение графов.

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

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-19-00342, <https://rscf.ru/en/project/23-19-00342/>

Для цитирования: Мостаков Н. А., Захарова А. А. Разработка метода локализации в замкнутой и насыщенной объектами среде // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №3. С. 214-227. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-214-227>.

Поступила в редакцию 26.07.2024

Подписана в печать 03.09.2024

Опубликована 30.09.2024

© Мостаков Н. А., Захарова А. А., 2024

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2024; 28(3): 214-227

Development of a method for localizing objects in a closed and saturated environment

Nikolay A. Mostakov ✉¹, Alena A. Zakharova¹

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

✉ e-mail: nikrus333@gmail.com

Abstract

The purpose of the work is to study and develop methods for localizing an ultra-light unmanned aerial vehicle (UAV) in a closed environment saturated with objects, based on semantic and topological data obtained from the environment. The purpose of the work is also to develop software and select a hardware complex for launching and testing the developed solution.

Methods. To achieve this goal, a review and comparison of existing solutions were conducted. Optimization of the neural network architecture for detecting objects. Development of an algorithm for compiling a graph of objects reflecting their relationships. Development of an algorithm for comparing graphs to determine the position of the UAV. Implementation of a solution to improve the accuracy of determining the geometric center of detected objects. Use of keypoint detection methods (SIFT, SURF) to solve the problem of identifying objects of the same class.

Results. The result of the work is a developed localization method based on semantic and topological data obtained from the environment. A software package based on the ROS2 humble platform and implemented on the hardware based on the Rockchip 3588 board was also developed. The experiments were conducted on ready-made datasets (KUM dataset) and using UAVs indoors.

Conclusion. The developed localization system is a promising step towards creating efficient and flexible systems capable of operating in complex conditions. In the future, it is planned to integrate this method with other sensors to improve robustness in dynamic conditions, add visual odometry algorithms to improve the accuracy of UAV localization, and expand the application of the system to UAVs used in other industries (infrastructure inspection, search and rescue).

Keywords: computer vision; localization; object detection; graph construction.

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 was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 23-19-00342, <https://rscf.ru/en/project/23-19-00342/>

For citation: Mostakov N. A., Zakharova A. A. One of the options for managing the heat supply system of buildings and structures using mathematical analysis methods. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(3): 214-227 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-214-227>.

Received 26.07.2024

Accepted 03.09.2024

Published 30.09.2024

Введение

С каждым годом беспилотные летательные аппараты (БПЛА) все активнее интегрируются в нашу жизнь, становясь

незаменимыми помощниками во множестве сфер. Особенно заметно их влияние на сельское хозяйство [1], где они эффективно выполняют задачи по мо-

нитингу полей [2], обработке почвы, внесению удобрений и даже сбору урожая. Еще одной областью применения БПЛА является инспекция помещений [3, 4] и промышленных объектов [5]. Беспилотники демонстрируют впечатляющие возможности, справляясь с серьезными задачами, требующими высокой точности.

Однако, несмотря на этот прогресс, в сегменте легких БПЛА, согласно ГОСТ Р 59517-2021 категория А, наблюдается острый дефицит программно-аппаратных решений, способных обеспечить эффективную работу в условиях ограничений по весу полезной нагрузки и стоимости оборудования. В то же время, в таких отраслях, как сельское хозяйство, инспекция инфраструктуры, охрана и др., существует значительный спрос на создание и разработку систем локализации для легких БПЛА [6].

Научные достижения в области искусственного интеллекта открывают новые возможности для реализации алгоритмов локализации, основанных на метрико-семантических и метрико-топологических методах картографирования. Это позволяет создавать более точные и адаптивные системы позиционирования, способные работать в сложных условиях, в том числе в средах с большим количеством объектов.

Таким образом, благодаря стремительному развитию искусственного интеллекта и компьютерного зрения, легкие БПЛА получают возможность работать в более сложных и насыщенных объектами

средах, раскрывая свой потенциал для решения широкого круга задач.

Материалы и методы

В настоящее время разработано множество методов для определения местоположения (локализации) и построения карт (картографирования) беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки, выбор оптимального решения зависит от конкретной задачи и условий эксплуатации. К классическим методам локализации можно отнести локализацию с помощью GNSS (GPS, ГЛОНАС). В работе [7] приводится описание использования GNSS технологии и набор фильтров для улучшения качества локализации. Однако в условиях городской среды, где сигнал спутников может иметь помехи, точность GNSS [8] значительно снижается. Еще одной группой классических методов являются SLAM (одновременная локализация и построение карты) методы [9, 10]. SLAM представляет собой способность робота строить карту окружающей среды и локализовываться в режиме реального времени [11]. Одним из популярных методов является метод RTAB-MAP [12]. Данное решение имеет большое количество реализаций и практических применений. Длительная работа алгоритма может привести к накоплению ошибки позиционирования. Для повышения точности используется детектирование замыкания петель (loop closure detection, LCD), которое позволяет "запомнить" пройден-

ное место и корректировать ошибки. Однако процесс запоминания уже пройденного места не всегда можно реализовать вследствие нескольких причин:

1) наличия недостаточного объема памяти и вычислительной мощности бортового компьютера БПЛА;

2) изменение внешнего вида локации, пройденной ранее (изменение освещенности, наличие других точек обзора, смена времени года).

Другая группа алгоритмов для локализации БПЛА основана на сравнении карты местности с изображениями, полученными с борта беспилотника. При успешном сопоставлении БПЛА может определить свое точное местоположение. Существуют различные варианты реализации данного алгоритма. От простого сравнения заранее готовой подложки со снимком при помощи классических методов компьютерного зрения (SIFT, SURF) [13, 14], до использования машинного обучения для сопоставления изображений. При использовании данного решения БПЛА полностью автономен и не нуждается в каналах связи с оператором на земле. Также данное решение имеет следующие недостатки: недостаточная робастность при изменении окружения (изменилось освещение, другое время года), низкая точность при использовании в качестве средств конечной локализации, необходимость иметь заранее подготовленный фотоплан, необходимость иметь на борту аппаратные средства повышенной производительности. Как можно заметить,

данный способ локализации имеет существенный ряд недостатков. Из-за недостаточной робастности системы, на практике, обычно совмещают ГНСС локализацию и локализацию по готовому фотоплану. Это позволяет БПЛА работать в зонах с отсутствием покрытия спутников и при выполнении задачи точно возвращаться в указанную зону.

Визуальная одометрия – это метод определения местоположения БПЛА путем анализа видеопотока с бортовой камеры (рис. 1). Алгоритм вычисляет вектор движения БПЛА, сравнивая последовательные кадры и определяя, как меняется расположение характерных точек на изображениях. Этот подход привлекателен своей автономностью – БПЛА не нуждается в заранее подготовленной карте или спутниковых сигналах. Однако у данного подхода есть недостатки. Во-первых, для работы требуется мощный процессор, способный обрабатывать видеопоток и выполнять сложные вычисления. Во-вторых, с течением времени точность локализации может снижаться из-за непрерывного накопления ошибок в определении движения между кадрами. И, наконец, система не может "сбросить" накопленную ошибку, если БПЛА не возвращается в уже посещенную точку.

Применение этого метода разнообразно – от автономной навигации и картографирования до робототехники. В будущем, с развитием технологий, визуальная одометрия станет еще более точной и надежной, увеличивая воз-

возможности использования БПЛА в различных областях.

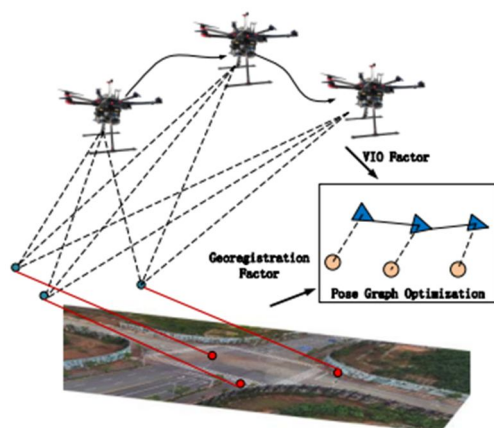


Рис. 1. Пример реализации визуальной одометрии (MAO Jun, ZHANG Lilian, HE Xiaofeng, QU Hao, HU Xiaoping, 2022 г.)

Fig. 1. An example of visual odometry implementation (MAO Jun, ZHANG Lilian, HE Xiaofeng, QU Hao, HU Xiaoping, 2022 г.)

Искусственный интеллект может стать интересной альтернативой традиционным методам локализации, представленным выше. В работе [15] рассматривается подход машинного обучения для решения проблемы локализации. Авторы получают относительное положение бортовой камеры относительно реперных маркеров (Aruco), а затем оценивают положение робота с помощью машинного обучения. Данный подход прошел апробацию и был реализован в рамках моделирования. Предлагаемое решение дает результаты такого же высокого уровня, как и аналитический подход.

Относительно новым подходом к локализации БПЛА является использование семантической информации, то

есть распознавания объектов и их взаимосвязи в окружающей среде. В работе [16] авторы предлагают следующий алгоритм:

1. Составление графа детектируемых объектов по одиночному изображению: на основе изображения, полученного с камеры БПЛА, проводится детекция объектов и построение графа (рис. 2), отражающего их взаимосвязь (расположение объектов относительно друг друга). При этом местоположение БПЛА должно быть известно.

2. Составление глобального графа окружения: создается глобальная карта, на которой представлены все значимые объекты в окружении БПЛА, а также их взаимосвязи.

3. Локализация на основе данных глобального графа и данных с камеры: БПЛА анализирует полученное с камеры изображение, распознает объекты и сравнивает полученный граф с глобальным графом окружения. По результатам сравнения определяется местоположение БПЛА.

В работе [16], к сожалению, не уделено внимание практическому применению алгоритма, не приводится описание аппаратной части, кроме того, в работе алгоритма не учитывается способ применения, а именно не учитывается скорость изменения видеопотока, данные с других датчиков БПЛА.

Данная работа призвана проверить робастность алгоритмов локализации сверх легких БПЛА в насыщенной объектами среде.

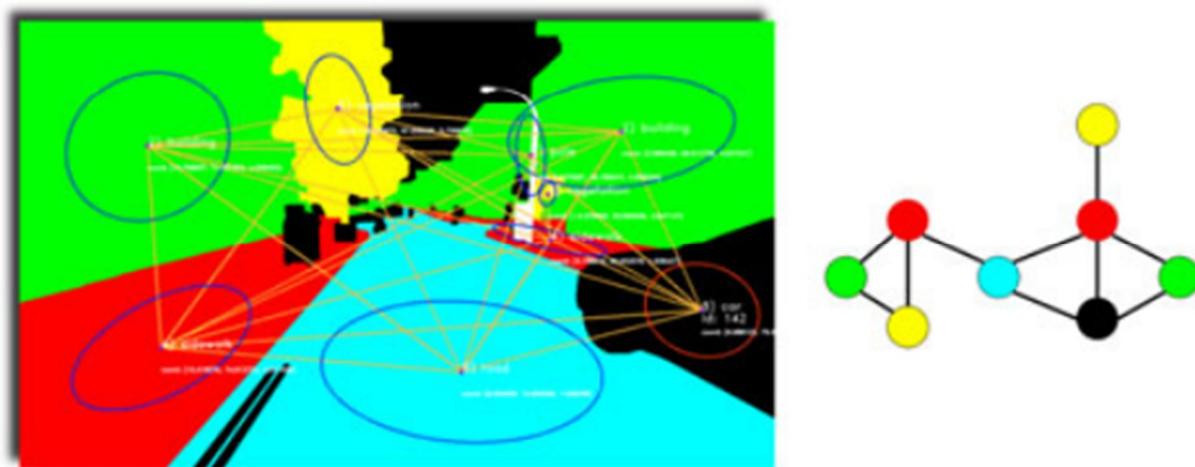


Рис. 2. Составление графа детектируемых объектов

Fig. 2. Compilation of a graph of detected objects

Построение графа объектов

В данном решении предполагается использовать граф объектов, полученный с помощью обработки RGB изображения. Полученный граф будет использоваться как ориентир для определения местоположения.

Первым этапом метода является детектирование объектов в видеопотоке, получаемом с устройства. Распознанные классы объектов и их координаты на RGBD изображении формируют граф объектов. В работе [17] авторы в качестве координат объекта используют центральный пиксель (1):

$$\begin{cases} Z_c = d(u_0, v_0) \\ X_c = \frac{u_0 - c_x}{f_x} \times Z_c \\ Y_c = \frac{v_0 - c_y}{f_y} \times Z_c, \end{cases} \quad (1)$$

где f_x, f_y, c_x, c_y – внутренние параметры камеры; X, Y, Z – координаты точки в глобальной системе координат; u_0 и v_0 –

координаты центральной точки в ограничивающей рамке.

Однако такое решение не будет работать корректно при использовании на БПЛА, в связи с возможными выбросами в данных, поступающих со стереокамеры. Для улучшения робастности системы предлагается брать среднее значение глубины в окрестности целевого пикселя. Окрестность представляет собой окружность с радиусом:

$$r = \frac{1}{3} \times u_0, \quad (2)$$

где u_0 – меньшая сторона бокса объекта.

Одним из преимуществ применения данного алгоритма на БПЛА является возможность использовать данные, поступающие с синхронизированного IMU сенсора и датчика высоты (датчик расстояния). Это позволит добавить в каждый граф дополнительный входной узел и дополнительные ребра для каждого графа. Примерный полученный граф изображен на рис. 3.

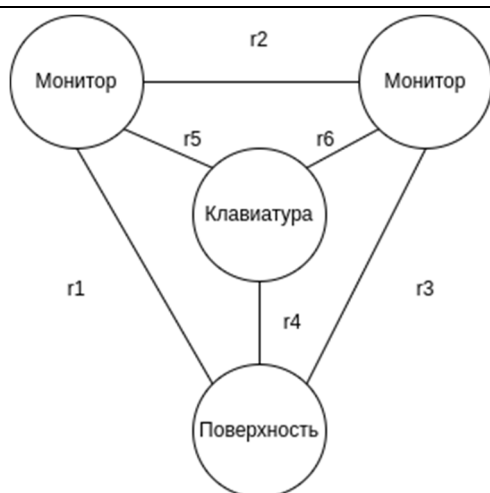


Рис. 3. Пример полученного графа

Fig. 3. Example of the resulting graph

Как можно заметить, в графе присутствует несколько узлов одного типа. Для задачи сопоставления узлов это не важный момент, но возможны случаи, когда будут появляться одинаковые графы в разных точках окружения. Для решения этой проблемы из каждого узла в этих двух графах будут вычисляться особые точки с помощью алгоритма SIFT. Процесс составления карты выглядит следующим образом:

1. Получение снимка с RGBD камеры.
2. Получение информации о расстоянии до поверхности.
3. Составление графа объектов.
4. Привязка графа объектов к позиции на карте с помощью других источников информации.

Выбор нейронной сети

В первую очередь необходимо было выбрать нейронную сеть для детектирования объектов. Выбранная сеть должна обеспечивать хорошую частоту кадров даже на слабых устройствах. Источник

[18] предоставляет список наиболее используемых и точных нейронных сетей. Наибольшую точность показывает сеть ViT-Adapter-L [19], следует отметить, что данная сеть требует больших вычислительных мощностей для работы, что не подходит под условия поставленной задачи. В связи с этим предлагается использовать более быструю модель из перечня¹ YOLOv8. Несомненным плюсом этой сети является ее распространенность и простота обучения сети. Это преимущество позволяет использовать данную нейронную сеть в решениях, которые можно установить на сверхлегкие БПЛА.

Выбор способа представления информации в графе

В данном случае возможно применить два варианта хранения информации о вершинах графа:

1. Хранить полные координаты объекта (вершины графа).

В данном случае для каждого объекта (вершины графа) хранятся координаты x, y, z относительно центра камеры.

2. Хранить расстояние между объектами (вершинами графа) и один объект с координатами.

Вариант с хранением информации данных в виде расстояния между объектами показал сопоставимое время вычисления местоположения наблюдателя и значительное меньшее количество требуемой памяти.

¹ Официальный сайт Ultralytics: URL: <https://www.ultralytics.com/>

Процесс пассивной локализации

После создания карты пространства из набора графов можно переходить к процессу локализации. При движении БПЛА в окружении каждую итерацию создается граф объектов, далее ищется сходство с графами в глобальной карте.

1. Алгоритм сопоставления графов выглядит следующим образом:

2. Получение снимка с RGBD камеры.

3. Получение информации о расстоянии до поверхности.

4. Составление графа объектов.

5. Сравнение текущего графа и графов в массиве карты. Сравнение происходит с помощью алгоритма поиска в ширину и поэтапному сравнению ребер и вершин.

6. При успешном нахождении совпадения текущего графа объектов и графа объектов из глобальной карты происходит процесс инициализации робота в окрестности найденного графа.

7. Нахождение локального местоположения робота происходит с помощью алгоритма ICP.

Результаты и их обсуждение

Цель экспериментальной части реализовать робастный алгоритм локализации БПЛА для различных сред (внутри помещения, городская среда). Экспериментальная часть будет разделена на два основных пункта:

1. Нахождение графа-объектов на глобальной карте.

2. Установка точного местоположения камеры относительно обнаруженного графа-объектов.

Для тестирования и проверки работы разработанного алгоритма будут использоваться следующие метрики локальной точности траектории за фиксированный интервал времени.

В качестве окружения был использован открытый набор данных KUM dataset, которые используют другие исследователи. Еще одним способом апробации разработанного алгоритма является тестирование в настоящем окружении (рис. 4).

Для проверки предложенных решений был разработан эксперимент, с целью проверить работоспособность разработанного алгоритма.

Использованное оборудование: Камера глубины - Azure Kinect; сверхлегкий БПЛА Ara mini; стационарная камера; набор Aruco-маркеров.

Ход проведения эксперимента:

1. Устанавливается и калибруется стационарная камера.

2. Установка маркеров в окружении и на камеру глубины.

3. Запуск разработанного метода локализации.

4. Фильтрация полученных данных.

По полученным результатам среднее отклонение вычисленного местоположения от истинного местоположения составляет 10 сантиметров. На рис. 5 показано отношение положения камеры из набора данных и восстановленное положение камеры с помощью разработанного алгоритма.

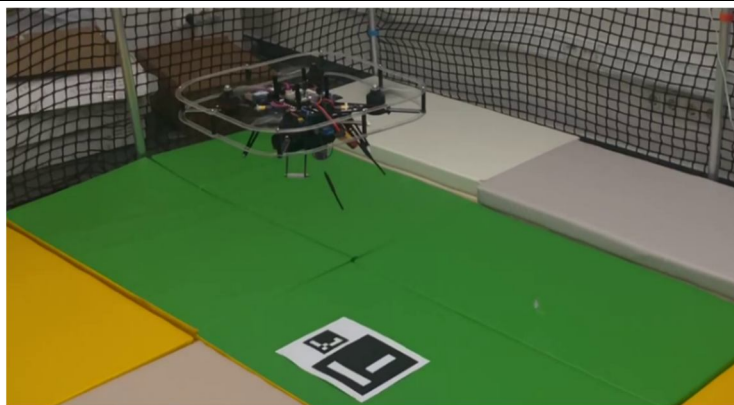


Рис. 4. Эксперимент с БПЛА Ara mini в закрытом помещении

Fig. 4. Experiment with UAV Ara mini in a closed room

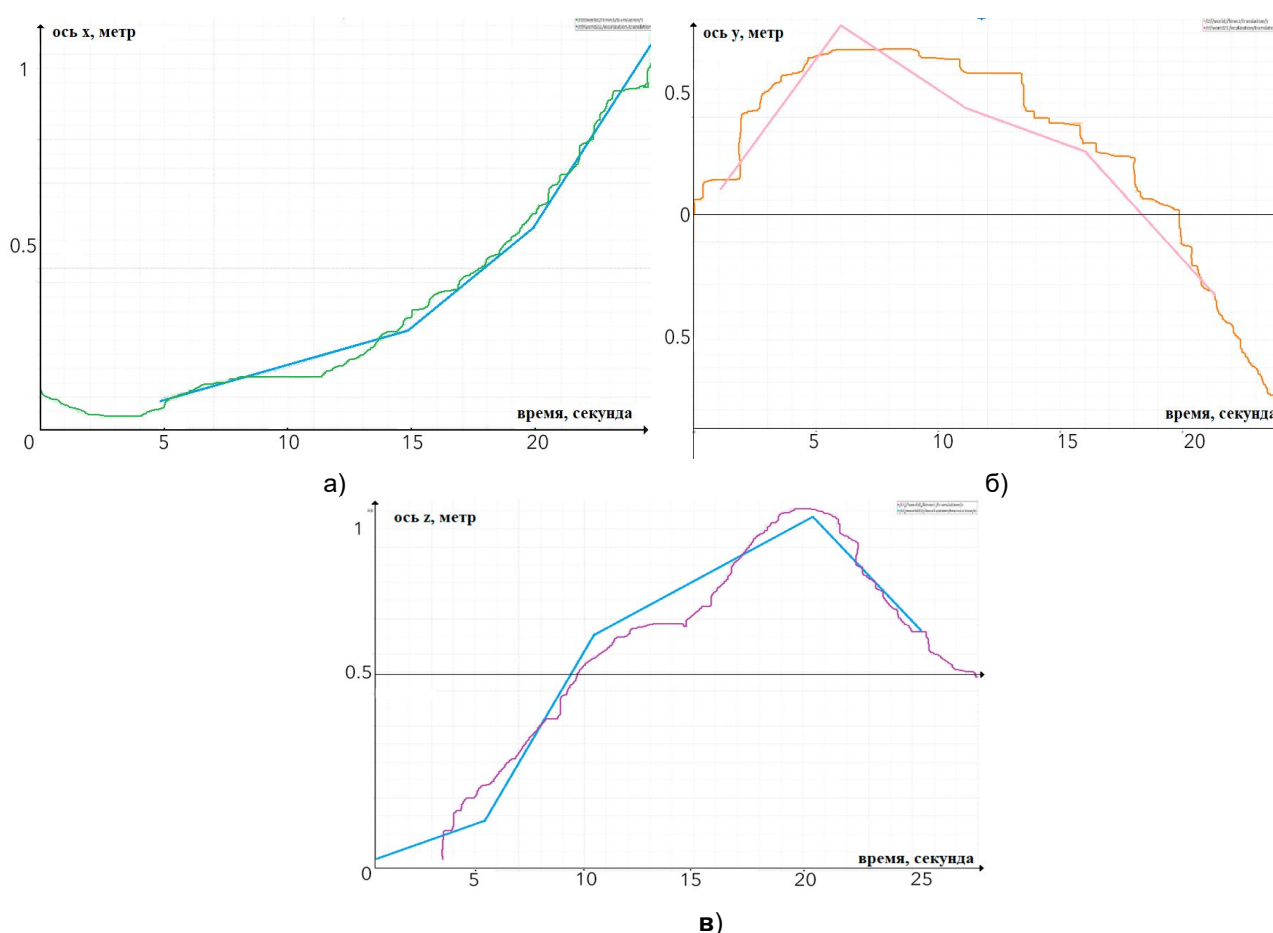


Рис. 5. Данные местоположения БПЛА во время эксперимента: **а** – зеленый цвет - координата x (метры) камеры из набора; синий цвет – восстановленная координата x (метры); **б** – красный цвет - координата y (метры) камеры из набора данных; фиолетовый цвет – восстановленная координата y (метры); **в** – фиолетовый цвет - координата z (метры) камеры из набора данных; синий цвет – восстановленная координата z (метры)

Fig. 5. UAV location data during the experiment: **а** – green color is the x coordinate (meters) of the camera from the set, blue color is the restored x coordinate (meters); **б** – Red is the y coordinate (meters) of the camera from the dataset; purple is the restored y coordinate (meters); **в** – the purple color is the z coordinate (meters) of the camera from the dataset; the blue color is the restored z coordinate (meters)

Было проведено несколько экспериментов с различным окружением. В каждом окружении было проведено не менее 5 экспериментов. Часть эксперимента проводилась на общедоступных наборах данных, а также в реальных сценах. В ходе эксперимента были получены следующие данные:

1. Тип окружения - Офис (замкнутая и насыщенная объектами среда):

- локальная точность траектории за фиксированный интервал времени – 82%;
- точность глобальной траектории – 0,6 метра.

2. Тип окружения – Жилое помещение (замкнутая и насыщенная объектами среда):

- локальная точность траектории за фиксированный интервал времени – 70%;
- точность глобальной траектории – 0,95 метра.

3. Тип окружения - Строительный объект (не насыщенная объектами среда): в данном типе окружения алгоритм работает некорректно вследствие отсутствия достаточного количества семантической информации.

Алгоритм показал хорошую точность глобальной траектории, сопоставимую с различными алгоритмами ви-

зуальной одометрии, также алгоритм более устойчив при резком перемещении/вращении стереопары.

Выводы

Из эксперимента можно сделать вывод что данный метод применим для задач определения местоположения объекта по заранее известной карте. Среднее отклонение вычисленного местоположения от истинного местоположения составляет 10 сантиметров. Разработанный метод показал хорошую работоспособность на маломощных вычислительных устройствах, что позволит использовать его на микро и мини БПЛА ближнего действия. В отличие от различных методов визуальной одометрии, данный метод позволяет восстановить местоположение БПЛА при резком перемещении БПЛА в пространстве. Несмотря на то, что алгоритм в данном виде показал избыточную частоту ложных срабатываний, в дальнейшем это предполагается исправить внедрением детектора ключевых точек для каждой вершины графа.

Разработанный алгоритм, в сочетании с алгоритмами визуальной одометрии, может значительно улучшить качество локализации автономных средств.

Список литературы

1. Evaluating Multispectral Images and Vegetation Indices for Precision Farming Applications from UAV Images / S. Candiago, F. Remondino, M De Giglio, M. Dubbini, M. Gattelli // Remote Sensing. 2015. <https://doi.org/10.3390/rs70404026>.
2. Duan T., Chapman S.C. Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle // Field Crops Research. 2017. URL:

https://www.researchgate.net/publication/317423059_Dynamic_monitoring_of_NDVI_in_wheat_agronomy_and_breeding_trials_using_an_unmanned_aerial_vehicle

3. Tan Yi., Li S. Automatic inspection data collection of building surface based on BIM and UAV // Automation in Construction. 2021. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580521003320?via%3Dihub>

4. Mader D., Blaskow R., Westfeld P. Potential of uav-based laser scanner and multispectral camera data in building inspection // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016. URL: <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLI-B1/1135/2016/>

5. Ibrahim Motawa, Alexandra Kardakou Unmanned aerial vehicles (UAVs) for inspection in construction and building industry // The 16th International Operation & Maintenance Conference, 2018. URL: <https://pure.ulster.ac.uk/en/publications/unmanned-aerial-vehicles-uavs-for-inspection-in-construction-and->

6. Motawa I., Kardakou A. Unmanned aerial vehicles (UAVs) for inspection in construction and building industry // The 16th International Operation & Maintenance Conference. 2018. URL: <https://pure.ulster.ac.uk/en/publications/unmanned-aerial-vehicles-uavs-for-inspection-in-construction-and->

7. Handley D.D., Yu P.L., Wechsler S.P. GPS-Denied UAV Localization Using Satellite Navigation and Inertial Sensors // International Conference on Robotics and Autonomous Systems. 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/335140533_GPS-Denied_UAV_Localization_using_Pre-existing_Satellite_Imagery

8. Hacoen S., Medina O. Improved GNSS Localization and Byzantine Detection in UAV Swarms // Sensors. 2020. <https://doi.org/10.3390/s20247239>.

9. Accurate Localisation Based on GNSS and Propagation Knowledge for Safe Applications in Guided Transport / J. Marais, S. Ambellouis, A. Flancquart, S. Lefebvre, C. Meurie, Y. Ruichek // Procedia - Social and Behavioral Sciences. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042812027930>

10. Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust-perception age / C. Cadena, L. Carlone, H. Carrillo, Y. Latif, D. Scaramuzza, J. Neira, I. Reid, J.J. Leonard // IEEE Trans. Robot. 2016. <https://doi.org/10.1109/TRO.2016.2528477>

11. Khairuddin A.R., Haron H. Review on simultaneous localization and mapping // 2015 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7482163>

12. Sumikura S., Shibuya M., Sakurada K. OpenVSLAM: A versatile visual SLAM framework // Proceedings of the 27th ACM International Conference on Multimedia. 2019.

13. Labb'e M., Michaud F. RTAB-Map as an open-source lidar and visual simultaneous localization and mapping library for large-scale and long-term online operation // Journal of Field Robotics.

14. Kinnari J., Verdoja F., Kyrki V. GNSS-denied geolocalization of UAVs by visual matching of onboard camera images with orthophotos // 2021 20th International Conference on Advanced Robotics (ICAR). URL: <https://arxiv.org/pdf/2103.14381.pdf>
15. Precise Visual-Inertial Localization for UAV with the Aid of A 2D Georeferenced Map. / J. Mao, L. Zhang, X. He, H. Qu, X. Hu // 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2107/2107.05851.pdf>
16. Klein L.C., Klein L.C., Klein L.C. A Machine Learning Approach to Robot Localization Using Fiducial Markers in RobotAtFactory 4.0 Competition // Sensors. 2023. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/6/3128>
17. Semantic loop closure detection based on graph matching in multi-objects scenes / Q. Cao, Y. Zhang, Y. Liu, G. Lv // Journal of Visual Communication and Image Representation. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2021.103072>
18. X-View: Graph-Based Semantic Multi-View Localization / A. Gawel, C., Del Don R. Siegwart, J. Nieto, C. Cadena // IEEE Robotics and Automation Letters. 2019. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8281068>
19. Object Detection on COCO test-dev Leaderboard. URL: <https://paperswithcode.com/sota/object-detection-on-coco>

References

1. Candiago S., Remondino F., De Giglio M., Dubbini M., Gattelli M. Evaluating Multi-spectral Images and Vegetation Indices for Precision Farming Applications from UAV Images. *Remote Sensing*. 2015. <https://doi.org/10.3390/rs70404026>.
2. Duan T., Chapman S.C. Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle. *Field Crops Research*. 2017. Available at: https://www.researchgate.net/publication/317423059_Dynamic_monitoring_of_NDVI_in_wheat_agronomy_and_breeding_trials_using_an_unmanned_aerial_vehicle
3. Tan Yi., Li S. Automatic inspection data collection of building surface based on BIM and UAV. *Automation in Construction*. 2021. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580521003320?via%3Dihub>
4. Mader D., Blaskow R., Westfeld P. Potential of uav-based laser scanner and multi-spectral camera data in building inspection. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2016. Available at: <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLI-B1/1135/2016/>
5. Ibrahim Motawa, Alexandra Kardakou. Unmanned aerial vehicles (UAVs) for inspection in construction and building industry. *The 16th International Operation & Maintenance Conference*. 2018. Available at: <https://pure.ulster.ac.uk/en/publications/unmanned-aerial-vehicles-uavs-for-inspection-in-construction-and->

6. Motawa I., Kardakou A. Unmanned aerial vehicles (UAVs) for inspection in construction and building industry. *The 16th International Operation & Maintenance Conference*. 2018. Available at: <https://pure.ulster.ac.uk/en/publications/unmanned-aerial-vehicles-uavs-for-inspection-in-construction-and->
7. Handley D.D., Yu P.L., Wechsler S.P. GPS-Denied UAV Localization Using Satellite Navigation and Inertial Sensors. *International Conference on Robotics and Autonomous Systems*. 2019. Available at: https://www.researchgate.net/publication/335140533_GPS-Denied_UAV_Localization_using_Pre-existing_Satellite_Imagery
8. Hacoen S., Medina O. Improved GNSS Localization and Byzantine Detection in UAV Swarms. *Sensors*. 2020. <https://doi.org/10.3390/s20247239>.
9. Marais J., Ambellouis S., Flancquart A., Lefebvre S., Meurie C., Ruichek Y. Accurate Localisation Based on GNSS and Propagation Knowledge for Safe Applications in Guided Transport. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042812027930>
10. Cadena C., Carlone L., Carrillo H., Latif Y., Scaramuzza D., Neira J., Reid I., Leonard J.J. Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust-perception age. *IEEE Trans. Robot.* 2016. <https://doi.org/10.1109/TRO.2016.2528477>
11. Khairuddin A.R., Haron H. Review on simultaneous localization and mapping. *2015 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE)*. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7482163>
12. Sumikura S., Shibuya M., Sakurada K. OpenVSLAM: A versatile visual SLAM framework. *Proceedings of the 27th ACM International Conference on Multimedia*. 2019.
13. Labb'e M., Michaud F. RTAB-Map as an open-source lidar and visual simultaneous localization and mapping library for large-scale and long-term online operation. *Journal of Field Robotics*.
14. Kinnari J., Verdoja F., Kyrki V. GNSS-denied geolocalization of UAVs by visual matching of onboard camera images with orthophotos. *20th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*. 2021. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2103.14381.pdf>
15. Mao J., Zhang L., He X., Qu H., Hu X. Precise Visual-Inertial Localization for UAV with the Aid of A 2D Georeferenced Map. *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Available at: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2107/2107.05851.pdf>
16. Klein L.C., Klein L.C., Klein L.C. A Machine Learning Approach to Robot Localization Using Fiducial Markers in RobotAtFactory 4.0 Competition. *Sensors*. 2023. Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/6/3128>
17. Cao Q., Zhang Y., Liu Y., Lv G. Semantic loop closure detection based on graph matching in multi-objects scenes. *Journal of Visual Communication and Image Representation*. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2021.103072>

18. Gawel A., Del Don C., Siegwart R., Nieto J., Cadena C. [X-View: Graph-Based Semantic Multi-View Localization. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2019. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8281068>

19. Object Detection on COCO test-dev Leaderboard]. Available at: [https:// paperswithcode.com/sota/object-detection-on-coco](https://paperswithcode.com/sota/object-detection-on-coco)

Информация об авторах / Information about the Authors

Мостаков Николай Алексеевич, аспирант, лаборатория Киберфизических систем, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: nikrus333@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3746-3493>

Nikolay A. Mostakov, Post-Graduate student, Laboratory of Cybernetic Systems, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Russian Federation? e-mail: nikrus333@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3746-3493>

Захарова Алёна Александровна, доктор технических наук, главный научный сотрудник, лаборатория Киберфизических систем, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: zaawmail@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4221-7710>, Researcher ID: F-8209-2017

Alena A. Zakharova, Dr. Sci. (Engineering), Chief Scientific Officer, Laboratory of Cybernetic Systems, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Russian Federation, e-mail: zaawmail@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4221-7710>, Researcher ID: F-8209-2017

УДК 004.832.38

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-228-244>

Преимущества применения вариационных интеграторов на группах Ли в задачах моделирования динамики механических систем

И. С. Моисеев ¹ ✉, А. А. Жиленков ¹

¹ Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
ул. Лоцманская, д. 3, г. Санкт-Петербург 190121, Российская Федерация

✉ e-mail: ilmoiseev@inbox.ru

Резюме

Целью исследования является рассмотрение преимуществ применения вариационных интеграторов на группах Ли в задачах физически корректного моделирования динамики механических систем и сравнение их с классическими невариационными интеграторами.

Методы. Для демонстрации возможностей вариационных интеграторов на группах Ли была разработана математическая модель динамики физического маятника. При построении математической модели динамики физического маятника использовались методы вариационного исчисления и методы теории групп Ли. Для проведения сравнительного анализа вариационных и невариационных интеграторов использовался метод Рунге-Кутты 4-го порядка. Моделирование осуществлялось в среде MATLAB.

Результаты. В ходе исследования разработан алгоритм вариационного интегратора на группах Ли для моделирования динамики физического маятника. Для сравнения вариационных интеграторов и метода Рунге-Кутты 4-го порядка были построены графики, показывающие, как изменяются с течением времени угловая скорость по осям, ортогональная ошибка, полная энергия и угловой момент. Графики демонстрируют, что несмотря на то, что угловая скорость для обоих методов одинакова, метод Рунге-Кутты не сохраняет геометрическую структуру непрерывной системы и не сохраняет основные постоянные величины моделируемой системы, а именно механическую энергию и импульс.

Заключение. Численное моделирование показало, что сохранение симплектических свойств систем и структуры групп Ли позволяет производить физически корректное компьютерное моделирование динамики механических систем. Вариационные интеграторы на группах Ли имеют существенные вычислительные преимущества по сравнению с классическими методами интегрирования, которые не сохраняют геометрическую структуру непрерывной системы и основные постоянные величины системы, и другими вариационными интеграторами, которые сохраняют либо ни одно, либо одно из этих свойств.

Ключевые слова: группы Ли; вариационное исчисление; вариационный интегратор; моделирование; динамика механических систем.

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

Для цитирования: Моисеев И. С., Жиленков А. А. Преимущества применения вариационных интеграторов на группах Ли в задачах моделирования динамики механических систем // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №3. С. 228-244. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-228-244>.

Поступила в редакцию 25.06.2024

Подписана в печать 22.07.2024

Опубликована 30.09.2024

Advantages of application of variational integrators on Lie groups in problems of modeling the dynamics of mechanical systems

Ilya S. Moiseev¹ ✉, Anton A. Zhilenkov¹

¹ Saint-Petersburg State Marine Technical University
3, Lotsmanskaya str., Saint-Petersburg 190121, Russian Federation

✉ e-mail: ilmoiseev@inbox.ru

Abstract

Purpose of the research is to consider advantages of application of variational integrators on Lie groups in problems of physically correct modeling of dynamics of mechanical systems and to compare them with classical nonvariational integrators.

Methods. To demonstrate the possibilities of variational integrators on Lie groups, a mathematical model of the dynamics of a physical pendulum was developed. Methods of variational calculus and methods of Lie group theory were used to construct a mathematical model of the dynamics of a physical pendulum. The Runge-Kutta method of the 4th order was used for comparative analysis of variational and nonvariational integrators. Modeling was carried out in MATLAB software.

Results. In this research, a variational integrator algorithm on Lie groups was developed to model the dynamics of a physical pendulum. To compare the variational integrators and the 4th order Runge-Kutta method, plots were constructed to show how the angular velocity along the axes, orthogonal error, total energy, and angular momentum change over time. The graphs demonstrate that although the angular velocity is the same for both methods, the Runge-Kutta method does not preserve the geometric structure of the continuous system and does not preserve the basic constant quantities of the modeled system, namely mechanical energy and momentum.

Conclusion. Numerical modeling has shown that the preservation of symplectic properties of systems and the structure of Lie groups allows to perform physically correct computer modeling of the dynamics of mechanical systems. Variational integrators on Lie groups have significant computational advantages over classical integration methods, which do not preserve the geometric structure of the continuous system and the basic constant quantities of the system, and other variational integrators, which preserve either none or one of these properties.

Keywords: lie groups; variational calculus; variational integrator; modeling; dynamics of mechanical systems.

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

For citation: Moiseev I. S., Zhilenkov A. A. Advantages of application of variational integrators on Lie groups in problems of modeling the dynamics of mechanical systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(3): 228-244 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-228-244>.

Received 25.06.2024

Accepted 22.07.2024

Published 30.09.2024

Введение

Вариационное исчисление занимается нахождением экстремумов и в таком контексте является ветвью оптими-

зации. Однако задачи и методы в данной области существенно отличаются от задач оптимизации функций не-

скольких переменных из-за природы пространства, на котором определены оптимизируемые величины. Функционал представляет собой отображение множества функций в вещественные числа, и вариационное исчисление направлено на поиск экстремумов именно для функционалов, а не для функций. Таким образом, в роли кандидатов на экстремум выступают функции, а не векторы в пространстве $\mathbb{R}^n$. Функционалы обычно выражаются через определённые интегралы, а множество рассматриваемых функций определяется граничными условиями и требованиями гладкости, возникающими при постановке задачи или модели.

В физике вариационные принципы обладают универсальностью и представляют структуры и процессы как вытекающие из принципа оптимального действия [1, 2]. Все физические законы могут быть выражены в такой глобальной форме, которая позволяет восстановить локальные законы, такие как закон Ньютона о пропорциональности силы и ускорения тела в механике или закон Кулона о силе между двумя электрическими зарядами. Такой подход обеспечивает глубокое понимание локальных законов и демонстрирует фундаментальные принципы, которые стоят за ними. В фундаментальной физике, квантовой физике, теории элементарных частиц и общей теории относительности построение теорий определяется в основном свойствами симметрии и законами инвариантности.

Непреходящий интерес к вариационному исчислению отчасти объясняет-

ся его приложениями [2-6]. В частности, следует отметить связь данного предмета с классической механикой, где он является не просто математическим инструментом, а широкой концептуальной основой. Ярким примером является принцип Гамильтона в классической механике, а более ранний пример – принцип минимального времени Ферма в геометрической оптике [2]. Развитие вариационного исчисления в XVIII и XIX веках было в значительной степени мотивировано задачами механики.

Вариационные интеграторы в основе своей содержат идею продвижения численного решения вперёд по времени с добавлением к конфигурации моделируемой системы некоторого значения смещения. Тем не менее, некоторые механические системы имеют сложные конфигурационные пространства и при моделировании с использованием вариационных интеграторов происходит нарушение кинематических ограничений, создаваемых геометрическими связями в системе [3]. Группы Ли, названные в честь норвежского математика Софуса Ли, представляют собой группы непрерывных симметрий, которые могут быть использованы для описания динамики механических систем [1, 2, 7–9]. Например, конфигурационное пространство абсолютно твёрдых тел может быть представлено группой Ли $SE(3)$, называемой евклидовой группой твёрдых движений. Представитель данной группы является матрицей, описывающей перемещения, в то время как

группа $SO(3)$ используется для описания ориентации. Группа $SE(3)$ и её алгебра Ли $se(3)$, элементы которой представляют собой бесконечно малые элементы $SE(3)$ и могут быть интерпретированы как моментальные винтовые движения, а также экспоненциальное отображение, могут эффективно применяться в моделировании динамики механических систем [10-13].

Сочетание вариационных принципов и групп Ли позволяет проводить физически корректное компьютерное моделирование динамики механических систем, сохраняя геометрическую структуру моделируемой системы и её основные постоянные величины. Рассмотрим вариационные интеграторы на группах Ли, а также их с невариационными аналогами.

Материалы и методы

Одной из ключевых особенностей математических моделей, отражающих основные аспекты и свойства физических процессов и явлений, является наличие многочисленных симметрий и принципов сохранения, а также разнообразных качественных особенностей, выявляемых в процессе теоретического анализа. В таком контексте становится критически важным разработка и совершенствование методов математического моделирования физических процессов, сохраняющих геометрическую структуру, лежащую в основе моделируемого процесса, и физические свойства моделируемых систем, таких как законы сохранения энергии и момента.

Математические модели, описывающие динамику системы, т.е. связь входа системы u и состояния системы x , используются для подходов к управлению на основе моделей. В зависимости от подхода, используется либо прямая, либо обратная модель [13-15]. Например, управление обратной динамикой использует обратную модель для компенсации динамики системы, а управление на основе прогнозирующих моделей и оптимальное управление используют прямую модель для вычисления будущих состояний с учетом последовательности действий. Для моделей с дискретным временем прямая модель f отображает состояние системы x_t и вход u_t в следующее состояние x_{t+1} . Обратная же модель f^{-1} отображает состояние системы и следующее состояние на вход системы. Математически это описывается следующим образом

$$f(x_t, u_t; \theta) = x_{t+1}, \quad f(x_t, x_{t+1}; \theta) = u_t, \quad (1)$$

где θ – параметры модели. В системе с непрерывным временем следующее состояние x_{t+1} заменяется изменением состояния $\dot{x}_t$, т.е.

$$f(x_t, u_t; \theta) = \dot{x}_t, \quad f(x_t, \dot{x}_t; \theta) = u_t. \quad (2)$$

Система с непрерывным временем может быть объединена с интегратором, например, явным методом Эйлера или методом Рунге-Кутты, чтобы прогнозировать следующее состояние системы, а не её изменение.

Однако при таком подходе возникает проблема обеспечения постоянства сохраняющихся величин, таких как энер-

гия и импульс системы. В частности, дискретное моделирование, даже с использованием передовых алгоритмов решения дифференциальных уравнений, в конечном итоге приводит к нежела-

тельному и физически неправдоподобному поведению, даже для простых динамических систем, таких как N -звенный маятник, из-за накопления численных ошибок, как показано на рис. 1.

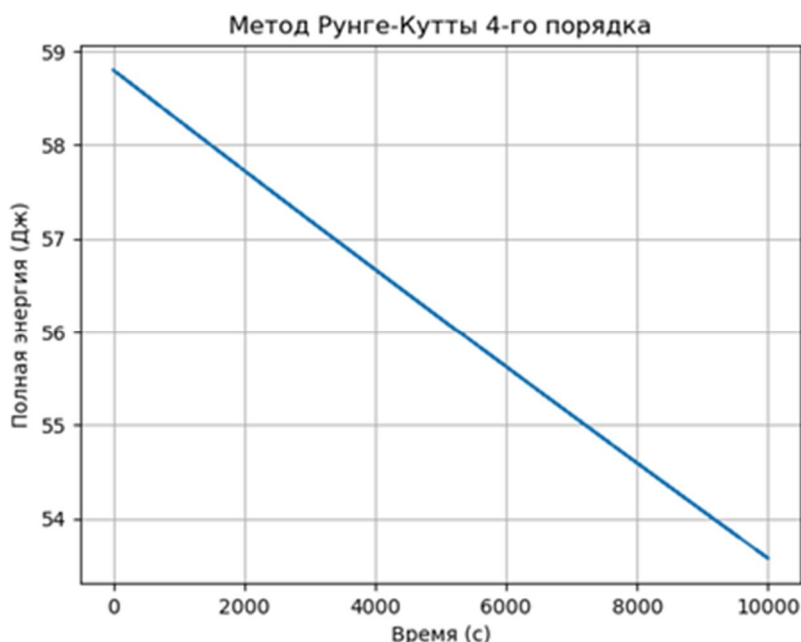


Рис. 1. Энергетическое поведение модели динамики плоского маятника с применением метода Рунге-Кутты четвертого порядка

Fig. 1. Energy behavior of a model of the dynamics of a plane pendulum using the fourth-order Runge-Kutta method

Указанный недостаток в моделировании с применением классических методов интегрирования является значительным, поскольку объективность и достоверность результатов математического моделирования напрямую зависят от сохранения физических законов и фундаментальных свойств моделируемых систем. Проблема накопления численных ошибок при применении классических методов интегрирования приводит к искажению фундаментальных свойств системы, таких как закон сохранения энергии и импульса, что ведет к возникновению физически неправдоподобного по-

ведения системы. Такое нежелательное и физически неверное поведение модели делает ее непригодной для адекватного анализа и прогнозирования поведения реальных систем [16-18].

В качестве альтернативы традиционным методам, интеграторы, берущие за основу вариационные принципы, строятся путем дискретизации принципа Гамильтона [2, 17]. Такой подход позволяет систематически разрабатывать вариационные численные интеграторы для лагранжевых и гамильтоновых систем. Кроме того, данные методы демонстрируют хорошее энергетическое поведе-

ние, сохраняют симплектическую структуру и импульс системы даже при интегрировании на экспоненциально больших временных интервалах.

Данный тип интеграторов подробно рассмотрен Марсденом и Уэстом в работе [10], где они представили дискретный лагранжиан, который аппроксимирует интеграл лагранжиана по небольшому временному интервалу. Затем они вывели его вариацию через принцип наименьшего действия, создав дискретное уравнение Эйлера-Лагранжа. Там же показано, что вариационные инте-

граторы, основанные на формулировке дискретного уравнения Эйлера-Лагранжа, в значительной степени отделяют энергетическое поведение от размера шага, а также являются симплектическими, т.е. точно сохраняют импульсы, связанные с симметриями системы и обладают превосходной долговременной энергетической устойчивостью [9, 18].

Однако такой подход также приводит к численным ошибкам, вызванным нарушением кинематических ограничений моделируемой системы, обусловленных геометрическими связями (рис. 2).

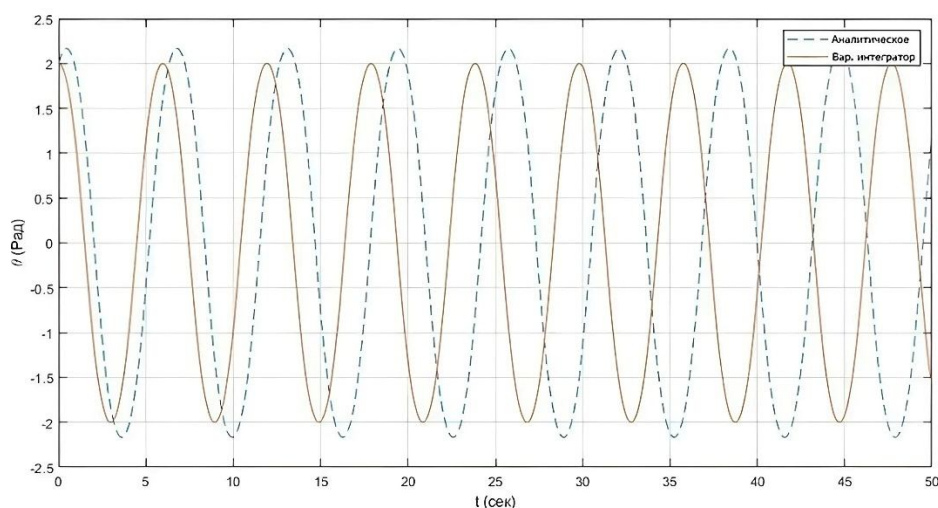


Рис. 2. Сравнение траектории движения материальной точки плоского маятника, полученной при моделировании с использованием вариационного интегратора, с аналитической траекторией

Fig. 2. Comparison of the motion trajectory for a material point of a plane pendulum, obtained by modeling using the variational integrator, with the analytical trajectory

Для решения данной проблемы предлагается использование геометрических численных интеграторов, известных как вариационные интеграторы на группах Ли. Вариационные интеграторы на группах Ли объединяют дискретные временные подходы лагранжевой и гамильтоновой механики с методами теории групп

Ли, что позволяет систематически создавать численные интеграторы, сохраняющие геометрические свойства динамики и структуру группы Ли. Рассмотрим вариационные интеграторы на группах Ли и продемонстрируем, что они обладают значительными вычислительными преимуществами по сравнению с классиче-

скими интеграторами. Для начала кратко опишем основные определения и свойства групп Ли [7, 11, 19].

Группа – это множество G вместе с групповой операцией, обычно называемой умножением, такой, что для любых двух элементов p и h из G их произведение $g \cdot h$ – снова элемент из G . Требуется, чтобы групповая операция удовлетворяла следующим аксиомам:

1. *Ассоциативность*. Если p , h и k – элементы из G , то

$$g \cdot (h \cdot k) = (g \cdot h) \cdot k. \quad (3)$$

2. *Единичный элемент*. Существует выделенный элемент e в G , называемый единичным элементом, который обладает свойством

$$e \cdot g = g \cdot e = g, \quad (4)$$

для всех g из G .

3. *Обратные*. Для всякого g из G существует обратный, обозначаемый g^{-1} , обладающий свойством

$$g \cdot g^{-1} = e = g^{-1} \cdot g. \quad (5)$$

Группа Ли – это дифференцируемое многообразие, которое имеет групповую структуру такую, что групповая операция является гладким отображением [9, 18–20]. Алгебра Ли $\mathfrak{g}$ – это касательное пространство $T_e G$ группы Ли G в единичном элементе $e \in G$, со скобкой Ли $[\cdot, \cdot]: \mathfrak{g} \times \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{g}$, которая билинейна, кососимметрична и удовлетворяет тождеству Якоби:

1. *Билинейность*. Пусть V – векторное пространство над полем $\mathbb{K}$. Отображение $\beta: V \times V \rightarrow \mathbb{K}$, $(u, w) \rightarrow \beta(u, w)$,

линейное по каждому из двух аргументов при фиксированном другом, называется билинейной формой на пространстве V . Билинейность означает, что при всех $\lambda \in \mathbb{K}$ и $u, w \in V$ выполняются равенства

$$\beta(u, \lambda w) = \lambda \beta(u, w) = \beta(\lambda u, w), \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \beta(u_1 + u_2, w_1 + w_2) = & \beta(u_1, w_1) + \\ & + \beta(u_1, w_2) + \beta(u_2, w_1) + \beta(u_2, w_2). \end{aligned} \quad (7)$$

2. *Кососимметричность*. Кососимметричная функция β на векторном пространстве V над полем $\mathbb{K}$ произвольной характеристики определяется как билинейная форма $\beta: V \times V \rightarrow \mathbb{K}$, такая, что для всех u и w в V

$$\beta(u, w) = -\beta(w, u). \quad (8)$$

3. *Тождество Якоби*. Множество A с двумя бинарными операциями $+$ и $\times$, с аддитивным тождеством 0 , удовлетворяет тождеству Якоби, если:

$$\begin{aligned} x \times (y \times x) + z \times (x \times y) + \\ + y \times (z \times x) = 0, \quad \forall x, y, z \in A. \end{aligned} \quad (9)$$

В случае со скобкой Ли, данное выражение принимает вид

$$[X[Y, Z]] + [Y[Z, X]] + [Z[X, Y]] = 0. \quad (10)$$

При $g, h \in G$ отображение действующие на элемент группы слева $L_h: G \rightarrow G$ определяется как $L_h g = hg$. Аналогично, отображение, действующее на элемент группы справа $R_h: G \rightarrow G$, определяется как $R_h g = gh$. Пусть $\zeta \in \mathfrak{g}$, определим векторное поле $X_\zeta: G \rightarrow TG$ такое, что $X_\zeta(g) = T_e L_g \cdot \zeta$, и пусть соответствующая единственная интеграль-

ная кривая, проходящая через элемент e при $t=0$, обозначается $\gamma_\xi(t)$. Экспоненциальное отображение $\exp: \mathfrak{g} \rightarrow G$ определяется как $\exp \xi = \gamma_\xi(1)$. Экспоненциальное отображение является локальным диффеоморфизмом из окрестности нуля в $\mathfrak{g}$ на окрестность e в G .

Определим внутренний автоморфизм $I_g: G \rightarrow G$ как $I_g(h) = ghg^{-1}$. Присоединенный оператор $\text{Ad}_g: \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{g}$ является дифференциалом $I_g(h)$ относительно h при $h=e$ вдоль направления $\eta \in \mathfrak{g}$, т.е. $\text{Ad}_g \eta = T_e I_g \cdot \eta$. Оператор $\text{ad}_\xi: \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{g}$ получается дифференцированием $\text{Ad}_g \eta$ относительно g в точке e в направлении ξ , т.е. $\text{ad}_\xi \eta = T_e (\text{Ad}_g \eta) \cdot \xi$. Это соответствует скобке Ли, т.е. $\text{ad}_\xi \eta = [\xi, \eta]$.

Пусть $\langle \cdot, \cdot \rangle$ – спаривание касательного и кокасательного вектора. Коприсоединенный оператор $\text{Ad}_g^*: G \times \mathfrak{g}^* \rightarrow \mathfrak{g}^*$ определяется $\langle \text{Ad}_g^* \alpha, \xi \rangle = \langle \alpha, \text{Ad}_g \xi \rangle$ при $\alpha \in \mathfrak{g}^*$. Оператор $\text{ad}^*: \mathfrak{g} \times \mathfrak{g}^* \rightarrow \mathfrak{g}^*$ определяется $\langle \text{ad}_\eta^* \alpha, \eta \rangle = \langle \alpha, \text{ad}_\eta \xi \rangle$ при $\alpha \in \mathfrak{g}^*$.

Конфигурация тела в трёхмерном пространстве может быть описана расположением его центра масс и ориентацией. Расположение может быть задано в евклидовом пространстве, однако ориентация эволюционирует в нелинейном пространстве, которое имеет определённую геометрию.

Если быть точнее, ориентация определяется как направление в системе отсчёта, связанной с телом относительно независимой системы отсчёта, рассматриваемой как линейное преобразование на векторном пространстве $\mathbb{R}^3$; математически ориентация может быть представлена ортонормированной матрицей 3×3 . При этом необходимо, чтобы определитель данной матрицы был положительным, чтобы сохранить порядок ортонормированных осей в соответствии с правилом буравчика. Множество ортонормированных матриц 3×3 с положительным определителем является многообразием, поскольку оно локально диффеоморфно евклидову пространству, а также имеет групповую структуру с групповым действием умножения матриц. Как было указано ранее, гладкое многообразие с групповой структурой является группой Ли; группа Ли ортонормированных матриц 3×3 с положительным определителем называется специальной ортогональной группой $SO(3)$. Конфигурационным многообразием для комбинированного поступательного и вращательного движения тела является специальная евклидова группа $SE(3)$, которая представляет собой полупрямое произведение $SE(3) = SO(3) \ltimes \mathbb{R}^3$. Прямое произведение групп Ли $SE(3)$, $SO(3)$ и $\mathbb{R}^n$ может представлять конфигурацию нескольких тел, и оно также является группой Ли, поскольку произведение групп Ли также является группой Ли. Поэтому конфигурационное

многообразие соединения тел также является группой Ли.

Динамика механической системы описывается лагранжевой или гамильтоновой динамикой [2, 8]. Динамика лагранжевой и гамильтоновой системы обладает уникальными геометрическими свойствами; гамильтонов поток симплектичен, полная энергия сохраняется в отсутствие неконсервативных сил, и сохраняется отображение момента, связанное с симметрией системы.

Рассмотрим механическую систему, эволюционирующую на группе Ли G . В данном подходе используется формула Эйлера-Лагранжа с неконсервативными силами и обобщенными координатами. Обобщенные координаты q – это координаты, которые однозначно определяют конфигурацию системы без ограничений. Процедура получения уравнений Эйлера-Лагранжа для механической системы кратко представлена на рис. 3: траектория объекта определяется путем нахождения пути, который минимизирует интеграл лагранжиана по времени, называемый интегралом действия. В классических задачах лагранжиан выбирается как разность между кинетической и потенциальной энергией.

Преобразование Лежандра [8, 11] обеспечивает альтернативное описание механических систем, называемое гамильтоновой механикой. Основная идея применения данных процедур к группе Ли G состоит в том, чтобы выразить вариацию элементов группы в терминах

алгебры Ли $\mathfrak{g}$ с помощью экспоненциального отображения.

Конфигурационным многообразием в данном случае является группа Ли G . Касательное расслоение TG отождествляется с $G \times \mathfrak{g}$ путем левой тривиализации. Например, касательный вектор $(g, \dot{g}) \in T_g G$ выражается как

$$\dot{g} = T_e L_g \cdot \xi = g\xi, \quad (11)$$

при $\xi \in \mathfrak{g}$. Предполагается, что лагранжиан механической системы задается как $L(g, \xi): G \times \mathfrak{g} \rightarrow \mathbb{R}$.

Интеграл действия определяется как

$$A = \int_{t_0}^{t_1} L(g, \xi) dt. \quad (12)$$

Принцип Гамильтона гласит, что вариация интеграла действия равна нулю, то есть имеем

$$\delta A = \delta \int_{t_0}^{t_1} L(g, \xi) dt = 0. \quad (13)$$

Пусть $g(t)$ – дифференциальная кривая в G , определенная для $t \in [t_0, t_f]$. Вариация – это дифференцируемое отображение $g^\varepsilon(t): (-c, c) \times [t_0, t_f] \rightarrow G$ при $c > 0$ такое, что $g^0(t) = g(t)$ для любого $t \in [t_0, t_f]$ и $g^\varepsilon(t_0) = g(t_0)$, $g^\varepsilon(t_f) = g(t_f)$ для любого $\varepsilon \in (-c, c)$. С помощью экспоненциального отображения выражаем вариацию как

$$g^\varepsilon(t) = g \exp \varepsilon \eta(t), \quad (14)$$

для кривой $\eta(t)$ в $\mathfrak{g}$.

Соответствующая бесконечно малая вариация для g задается следующим образом

$$\delta g(t) = \left. \frac{d}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=0} g^\varepsilon(t) = T_e L_{g(t)} \cdot \left. \frac{d}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=0} \exp \varepsilon \eta(t) = g(t) \eta(t). \quad (15)$$

Для каждого $t \in [t_0, t_f]$ бесконечно малая вариация $\delta g(t)$ лежит в касательном пространстве $T_{g(t)} G$.

Уравнения Эйлера-Лагранжа даются в виде

$$\left. \frac{d}{dt} D_\zeta L(g, \zeta) - ad_\zeta^* \cdot D_\zeta L(g, \zeta) - \right. \quad (16)$$

$$-T_e^* L_g \cdot D_g L(g, \zeta) = 0,$$

$$\dot{g} = g\zeta, \quad (17)$$

где $D_g L \in T^*G$ обозначает производную лагранжиана L по g , задаваемую выражением

$$\left. \frac{d}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=0} L(g^\varepsilon, \zeta) = D_g L(g, \zeta) \cdot \delta g, \quad (18)$$

и $D_\zeta L \in \mathfrak{g}^*$ определяется аналогично.

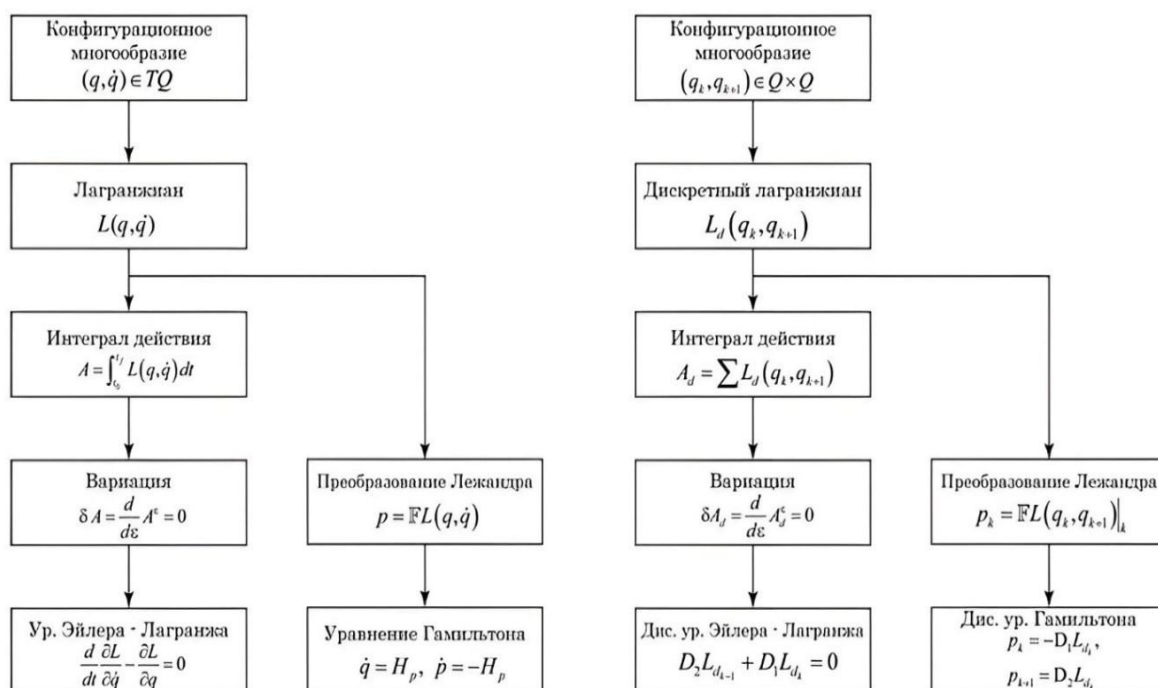


Рис. 3. Краткое описание процедуры получения уравнений Эйлера-Лагранжа (слева) и дискретных уравнений Эйлера-Лагранжа (справа)

Fig. 3. Brief description of the procedure for obtaining the Euler-Lagrange equations (left) and discrete Euler-Lagrange equations (right)

Основная идея данного подхода к получению уравнений движения заключается в выражении вариации кривой в G с помощью экспоненциального отображения, заданного (14). Выражение для вариации выбирается таким образом, чтобы варьируемая кривая лежала

на конфигурационном многообразии G . Использование экспоненциального отображения $\exp: \mathfrak{g} \rightarrow G$ даёт следующие свойства:

1. Поскольку вариация получается с помощью групповой операции, она гарантированно лежит на G , что решает

проблему, связанную с нарушением кинематических ограничений моделируемой системы.

2. Вариация параметризуется кривой в линейном векторном пространстве $\mathfrak{g}$.

Результаты и их обсуждение

Применив рассмотренный подход, нами был получен алгоритм вариационного интегратора на группах Ли для случая физического маятника (рис. 4), который далее используется для моделирования динамики пространственного маятника, представляющего собой твёрдое, асси-

метричное тело, закреплённое на шарнире, в котором отсутствует трение, причём данный маятник подвержен действию однородного поля гравитации.

Физические константы для пространственного маятника выбраны равными:

$$m = 1 \text{ кг}, \quad \rho_c = [0 \quad 0 \quad 0,3] \text{ м},$$

$$J = \begin{bmatrix} 0,13 & 0 & 0 \\ 0 & 0,28 & 0 \\ 0 & 0 & 0,17 \end{bmatrix} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Начальные условия равны:

$$R_0 = I_{3 \times 3}, \quad \Omega_0 = [4,14 \quad 4,14 \quad 4,14] \text{ рад/сек.}$$

Начало алгоритма

Параметры моделирования:

Задать временной шаг h ;

Задать кол-во итераций k .

Начальные условия, соответствующие моменту времени $t = 0$:

Задать матрицу поворотов R_0 ;

Задать вектор угловой скорости Ω_0 .

Параметры маятника:

Задать массу груза m ;

Задать длину подвеса l ;

Задать матрицу инерции J ;

Задать длину от точки подвеса до центра тяжести ρ ;

Задать ускорение свободного падения g .

Определение начальных значений:

$$\Pi_0 = J\Omega_0$$

$$\frac{\partial U}{\partial R} = -mge_3\rho^T$$

$$M = \left(\frac{\partial U}{\partial R}\right)^T R_0 + R_0^T \frac{\partial U}{\partial R}$$

Вычислить(M)

Численное интегрирование модели:

Цикл от $i = 0$ до $k - 1$ выполнять

$$h\Pi_i + \frac{h^2}{2}M = \frac{\sin\|f\|}{\|f\|}Jf + \frac{1-\cos\|f\|}{\|f\|^2}(f \times Jf)$$

Вычислить(f)

$$F = e^{\hat{f}}$$

$$R_{i+1} = R_i F$$

$$\hat{M} = \left(\frac{\partial U}{\partial R}\right)^T R_{i+1} + R_{i+1}^T + \frac{\partial U}{\partial R}$$

Вычислить(M)

$$\Pi_{i+1} = R_{i+1}^T R_i \Pi_i + \frac{h}{2}mgR_{i+1}^T R_i(\rho \times R_i^T e_3) + \frac{h}{2}mg(\rho \times R_{i+1}^T e_3)$$

$$\Omega_{i+1} = J^T \Pi_{i+1}$$

$$t_{i+1} = t_i + h$$

Вернуть Ω_{i+1}, t_{i+1}

Конец цикла

Вывод результатов моделирования:

Построить графики изменения угловой скорости Ω_i по осям в зависимости от времени t_i

Конец алгоритма

Рис. 4. Алгоритм вариационного интегратора физического маятника на группах Ли

Fig. 4. Algorithm of variational integrator of physical pendulum on Lie groups

Время моделирования $t = 30$ секунд и размер шага $h = 0,01$ секунды.

Полученные результаты для случая физического маятника продемонстрированы на рис. 5-8. На данных рисунках пунктиром отображён результат для интегратора, использующего метод Рунге-Кутты 4-го порядка, а сплошной – вариационный интегратор на группах Ли.

Как видно из графиков, хотя угловая скорость для обоих методов одинакова (рис. 5), метод Рунге-Кутты не сохраняет геометрическую структуру непрерывной системы, как показано на рис. 6, и не сохраняет основные постоянные величины системы, а именно механическую энергию (рис. 7) и импульс (рис. 8).

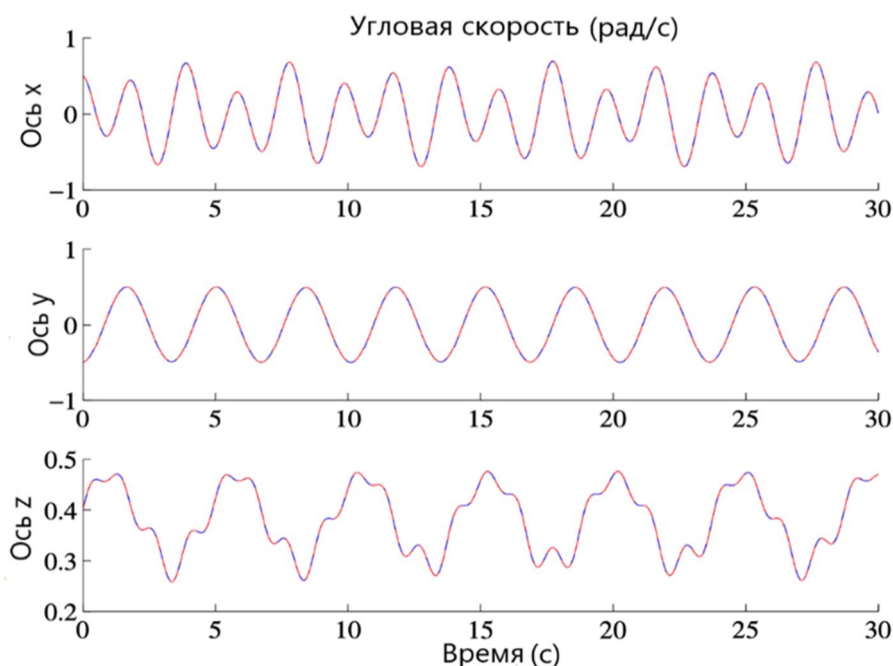


Рис. 5. Графики изменения угловой скорости по осям для физического маятника

Fig. 5. Plots of angular velocity along the axes for a physical pendulum

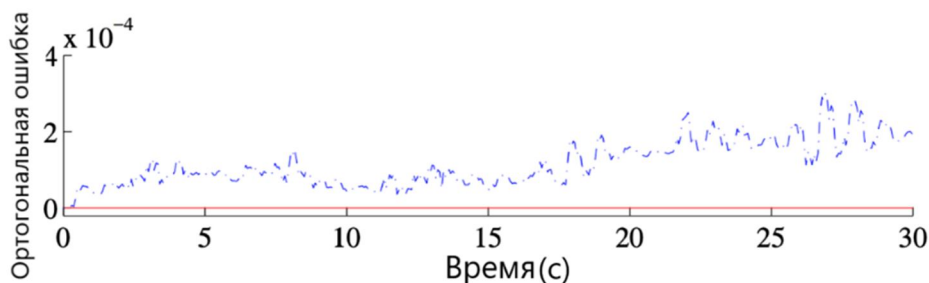


Рис. 6. График ортогональной ошибки для физического маятника

Fig. 6. Plot of orthogonal error for a physical pendulum

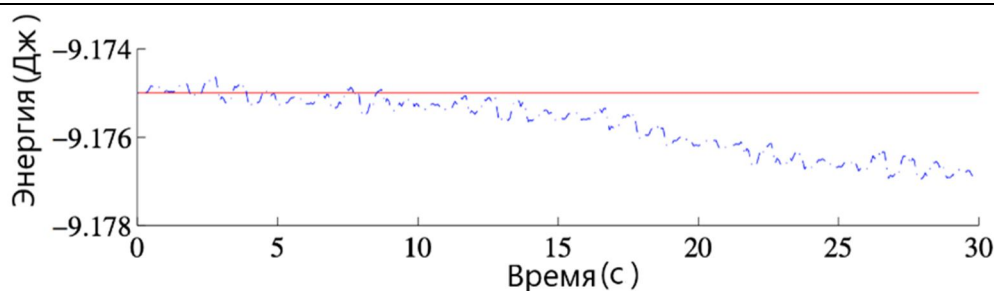


Рис. 7. График изменения полной энергии для физического маятника

Fig. 7. Graph of total energy change for a physical pendulum

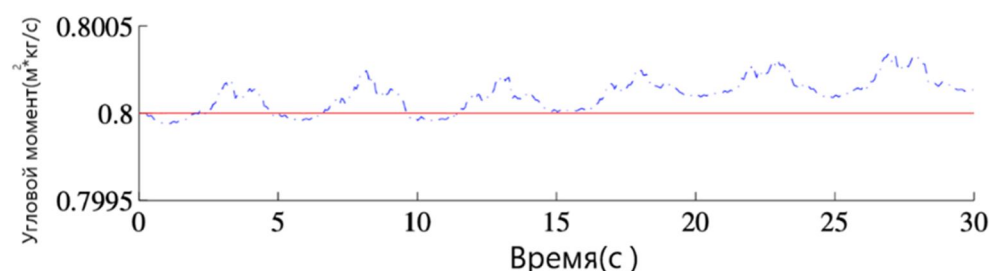


Рис. 8. График изменения углового момента для физического маятника

Fig. 8. Plot of angular momentum for a physical pendulum

Выводы

Результаты численного моделирования продемонстрировали важность сохранения геометрических свойств и симплектической структуры механических систем. Вариационные интеграторы, построенные на группах Ли, показали значительные преимущества перед классическими методами интегрирования, такими как метод Рунге-Кутты 4-го порядка. В отличие от классических методов, вариационные интеграторы сохраняют основные постоянные величины системы, включая механическую энергию и импульс, что обеспечивает физически корректное моделирование.

Построенная математическая модель динамики физического маятника и последующий анализ продемонстрировали, что вариационные интеграторы обеспечивают более точное и устойчивое решение, минимизируя численные ошибки, связанные с нарушением кинематических ограничений. Это делает их особенно полезными для задач долгосрочного моделирования сложных механических систем.

Таким образом, применение вариационных интеграторов на группах Ли является перспективным направлением в численном моделировании динамики механических систем, позволяя получать более надежные и точные результаты по сравнению с классическими методами.

Список литературы

1. Полак Л. С. Вариационные принципы механики // Сборник статей классиков науки. М.: Физматгиз, 1959. 932 с.
2. Полак Л. С. Вариационные принципы механики. Их развитие и применение в физике. 2-е изд. М.: Книжный дом «Либроком», 2010. 600 с.
3. Некоторые проблемы моделирования динамики механических систем и их решение методами вариационных интеграторов группы Ли / И. С. Моисеев, А. А. Жиленков, В. В. Ениватов, А. А. Зинченко // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. Т. 17, № 1. С. 81-89.
4. Geometric, variational integrators for computer animation / L. Kharevych, Y. Weiwei, Y. Tong et al. // Eurographics Symposium on Computer Animation. Austria. – Vienna: Eurographics Association, 2006. P. 43-51.
5. Zeng L., Jacobsen S. B. Variational Principle for Planetary Interiors // The Astrophysical Journal. 2016. Vol. 829, №1. P. 7.
6. Moiseev I. S., Zhilenkov A. A. Application of Variational Integrators in Modeling the Dynamics of Mechanical Systems // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021, Moscow, 2021. P. 554-558. <https://doi.org/10.1109/ElConRus51938.2021.9396088>.
7. Олвер П. Приложения групп Ли к дифференциальным уравнениям. М.: Мир, 1989. 639 с.
8. Арнольд В.И. Математические методы классической механики. М.: Наука, 1989. 472 с
9. Бураго Ю.Д., Залгаллер В.А. Введение в риманову геометрию. М.: Эдиториал УРСС, 2018. 320 с.
10. Marsden J. E., West M. Discrete mechanics and variational integrators // Acta Numerica. 2001. Vol. 10. P. 357-514.
11. Marsden J.E., Ratiu T.S. Introduction to Mechanics and Symmetry. New York: Springer, 1999. 586 p.
12. Nonsingular Integral-Type Dynamic Finite-Time Synchronization for Hyper-Chaotic Systems / K. A. Alattas, J. Mostafae, S. Mobayen, et al. // Mathematics. 2022. Vol. 10, no. 1. <https://doi.org/10.3390/math10010115>. EDN ZDBGGV.
13. Zenkov D. V., Leok M., Bloch A. M. Hamel's formalism and variational integrators on a sphere // 2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC), Maui, HI, USA, 2012. P. 7504-7510. <https://doi.org/10.1109/CDC.2012.6426779>.
14. Lee T., Leok M., McClamroch N. H. Dynamics of connected rigid bodies in a perfect fluid // 2009 American Control Conference. St. Louis, MO, USA, 2009. P. 408-413. <https://doi.org/10.1109/ACC.2009.5159850>.

15. Fan T., Murphey T. Structured linearization of discrete mechanical systems on Lie groups: A synthesis of analysis and control // 2015 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC). Osaka, Japan, 2015. P. 1092-1099. <https://doi.org/10.1109/CDC.2015.7402357>.
16. Lee T., Leok M., McClamroch N. H. Geometric numerical integration for complex dynamics of tethered spacecraft // Proceedings of the 2011 American Control Conference. San Francisco, CA, USA, 2011. P. 1885-1891. <https://doi.org/10.1109/ACC.2011.5990836>.
17. Schultz J., Murphey T. D. Extending filter performance through structured integration // 2014 American Control Conference. Portland, OR, USA, 2014. P. 430-436. <https://doi.org/10.1109/ACC.2014.6858979>.
18. Johnson E. R., Murphey T. D. Discrete and continuous mechanics for tree representations of mechanical systems // 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Pasadena, CA, USA, 2008. P. 1106-1111. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543352>.
19. Bou-Rabee N., Owhadi H. Stochastic variational integrators // IMA Journal of Numerical Analysis. April 2009. Vol. 29, no. 2. P. 421-443. <https://doi.org/10.1093/imanum/drn018>.
20. Lee T., Leok M., McClamroch N. H. Dynamics of a 3D elastic string pendulum // Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference. Shanghai, China, 2009. P. 3347-3352. <https://doi.org/10.1109/CDC.2009.5399611>.

References

1. Polak L. S. Variacionnye principy mekhaniki. In: *Sbornik statej klassikov nauki = Principles of Mechanics. Collection of articles by classics of science*. Moscow: Fizmatgiz; 1959. 932 p. (In Russ.)
2. Polak L. S. Variational Principles of Mechanics. Their development and application in physics. 2nd ed. Moscow: Knizhnyj dom Librokom; 2010. 600 p. (In Russ.)
3. Moiseev I. S., Zhilenkov A. A., Enivatov V. V., Zinchenko A. A. Some problems of modeling the dynamics of mechanical systems and their solution by methods of Lie group variational integrators. *Elektrotekhnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy = Electro-technical and information complexes and systems*, 2021: 17(1): 81-89. (In Russ.)
4. L Kharevych., Weiwei Y., Tong Y., et al. Geometric, variational integrators for computer animation. *Eurographics Symposium on Computer Animation*. Austria. Vienna: Eurographics Association; 2006. P. 43-51.
5. Zeng L., Jacobsen S. B. Variational Principle for Planetary Interiors. *The Astrophysical Journal*. 2016; 829 (1): 7.
6. Moiseev I. S., Zhilenkov A. A. Application of Variational Integrators in Modeling the Dynamics of Mechanical Systems. In: *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021*. Moscow; 2021. P. 554-558. <https://doi.org/10.1109/ElConRus51938.2021.9396088>.

7. Olver P. J. Applications of Lie Groups to Differential Equations. Moscow: Mir, 1989. 639 p. (In Russ.).
8. Arnold V. I. Matematicheskie metody klassicheskoy mekhaniki. Moscow: Nauka; 1989. 472 p. (In Russ.)
9. Burago Y. D., Zalgaller V.A. Introduction to Riemannian geometry. Moscow: Editorial URSS; 2018. 320 p. (In Russ.)
10. Marsden J. E., West M. Discrete mechanics and variational integrators. *Acta Numerica*. 2001. 10: 357-514.
11. Marsden J.E., Ratiu T.S. Introduction to Mechanics and Symmetry. New York: Springer; 1999. 586 p.
12. Alattas K. A., Mostafae J., Mobayen S., et al. Nonsingular Integral-Type Dynamic Finite-Time Synchronization for Hyper-Chaotic Systems. *Mathematics*. 2022; 10 (1). <https://doi.org/10.3390/math10010115>. EDN ZDBGGV.
13. Zenkov D. V., Leok M., Bloch A. M. Hamel's formalism and variational integrators on a sphere. In: *2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. Maui, HI, USA, 2012. P. 7504-7510. <https://doi.org/10.1109/CDC.2012.6426779>.
14. Lee T., Leok M., McClamroch N. H. Dynamics of connected rigid bodies in a perfect fluid. In: *2009 American Control Conference*. St. Louis, MO, USA, 2009. P. 408-413. <https://doi.org/10.1109/ACC.2009.5159850>.
15. Fan T., Murphey T. Structured linearization of discrete mechanical systems on Lie groups: A synthesis of analysis and control. In: *2015 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. Osaka, Japan, 2015. P. 1092-1099. <https://doi.org/10.1109/CDC.2015.7402357>.
16. Lee T., Leok M., McClamroch N. H. Geometric numerical integration for complex dynamics of tethered spacecraft. In: *Proceedings of the 2011 American Control Conference*. San Francisco, CA, USA, 2011. P. 1885-1891. <https://doi.org/10.1109/ACC.2011.5990836>.
17. Schultz J., Murphey T. D. Extending filter performance through structured integration. In: *2014 American Control Conference*. Portland, OR, USA, 2014. P. 430-436. <https://doi.org/10.1109/ACC.2014.6858979>.
18. Johnson E. R., Murphey T. D. Discrete and continuous mechanics for tree representations of mechanical systems. In: *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Pasadena, CA, USA, 2008. P. 1106-1111. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543352>.
19. Bou-Rabee N., Owhadi H. Stochastic variational integrators. *IMA Journal of Numerical Analysis*. April 2009; 29 (2): 421-443. <https://doi.org/10.1093/imanum/drn018>.
20. Lee T., Leok M., McClamroch N. H. Dynamics of a 3D elastic string pendulum. In: *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference*. Shanghai, China, 2009. P. 3347-3352. <https://doi.org/10.1109/CDC.2009.5399611>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Моисеев Илья Сергеевич, ассистент кафедры киберфизических систем, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: ilmoiseev@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9609-7576>

Ilya S. Moiseev, Assistant, Cyber-Physical Systems Department, Saint-Petersburg State Marine Technical University, Saint-Petersburg, Russian Federation, e-mail: ilmoiseev@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9609-7576>

Жиленков Антон Александрович, кандидат технических наук, доцент, декан факультета цифровых промышленных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: zhilenkovanton@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1555-1318>

Anton A. Zhilenkov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Dean of the Digital Industrial Technologies Faculty, Saint-Petersburg State Marine Technical University, Saint-Petersburg, Russian Federation, e-mail: zhilenkovanton@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1555-1318>

Оригинальная статья / Original article

УДК 004

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-245-264>

Обработка вычислительной системой зашумленных конструктивных входных данных

А. П. Локтионов¹ ✉, Э. И. Ватутин¹

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

✉ e-mail: loara@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Цель данного исследования – решение задачи восстановления внешней нагрузки на стоечно-балочную конструктивную систему и оценка влияния на точность решения задачи погрешности зашумленных прогибов – конструктивных входных данных вычислительной системы.

Методы. Основными научными методами, применяемыми в рамках данного исследования, являются методы моделирования и идентификации граничных условий, сеточный метод регуляризации решения обратных некорректных задач. Также используются методы редукции измерений и аппроксимации, методы оценки качества обработки входных данных, алгоритмов регуляризации и аппроксимации с использованием сеточной функции Лебега абсолютным числом обусловленности задачи и минимума функции Лебега целевым параметром, численные методы. При условии равномерной непрерывной нормы абсолютной погрешности входных данных в выводе явных формул начальных параметров упругой линии балки и внешней нагрузки на стоечно-балочную конструктивную систему применен метод решения обратной задачи Коши для уравнения прогибов балки.

Результаты. Основной результат настоящей работы представляет собой теоремы об изгибающем моменте и силе на свободном конце консольной балки. Полученные равенства позволяют применить результаты решения обратной задачи Коши для уравнения прогибов балки при восстановлении внешней нагрузки на стоечно-балочную конструктивную систему. Доказано существование и единственность решения. Также результатами являются формулы множителей Лагранжа в линейной лагранжевой аппроксимации и оптимальный план координат узлов сетки аппроксимации по чебышёвскому альтернансу для уравнения прогибов балки четвертой и пятой степени. Проведена оценка качества приближения внешней нагрузки на стоечно-балочную конструктивную систему значениями целевых параметров.

Заключение. В данной статье предложен метод решения задачи восстановления внешней нагрузки на стоечно-балочную конструктивную систему с применением результатов решения обратной задачи Коши для уравнения прогибов балки с минимизацией влияния погрешности зашумленных конструктивных входных данных на точность решения задачи.

Ключевые слова: модель математическая; обратная задача Коши; балка; прогиб; вычислительная система; функция Лебега.

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

Для цитирования: Локтионов А. П. Обработка вычислительной системой зашумленных конструктивных входных данных // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №3. С. 245-264. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-245-264>.

Поступила в редакцию 06.06.2024

Подписана в печать 02.08.2024

Опубликована 30.09.2024

Measuring-polynomial processing of input data of a computer system

Askold P. Loktionov ¹, Eduard I. Vatutin ✉

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

✉ e-mail: loapa@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The purpose of this study is to solve the problem of restoring the external load on the rack-and-beam structural system and to assess the impact on the accuracy of solving the problem of the error of noisy deflections – constructive input data of the computing system.

Methods. The main scientific methods used in this study are methods of modeling and identification of boundary conditions, the grid method of regularization of solving inverse incorrect problems. Measurement reduction and approximation methods, methods for evaluating the quality of input data processing, regularization and approximation algorithms using the Lebesgue grid function, and numerical methods are also used.

Results. The main result of this work is two theorems about the external load on a rack-and-beam structural system. The existence and uniqueness of the solution is proved. Also, the results are the formulas of Lagrange multipliers in linear Lagrangian approximation and the optimal plan of coordinates of the nodes of the approximation grid for the equation of deflections of the beam of the fourth and fifth degree with Chebyshev alternance. An assessment of the quality of the approximation of the external load on the rack-and-beam structure by the values of the target parameters was carried out.

Conclusion. This article proposes a method for restoring the external load on a rack-and-beam structure using the results of solving the inverse Cauchy problem for the equation of deflections of a beam with minimizing the influence of the error of noisy input data.

Keywords: mathematical model; inverse Cauchy problem; beam; deflection; computing system; Lebesgue function.

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

For citation: Loktionov A. P., Vatutin E. I. Measuring-polynomial processing of input data of a computer system. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(3): 245-264 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-245-264>.

Received 06.06.2024

Accepted 02.08.2024

Published 30.09.2024

Введение

Объектом исследования являются стоечно-балочные конструктивные си-

стемы. Значительное количество отечественных и зарубежных научных пуб-

ликаций посвящено аналитическому и инструментальному исследованию элементов строительных конструкций, задачам идентификации, которые связаны с проблемами мониторинга и диагностики механического состояния конструкций [1-10]. Например, в работе [10] представлена процедура моделирования и идентификации граничных условий для консольно-подобных структур. Задача восстановления целевых характеристик стоечно-балочной конструктивной системы как коэффициентная обратная задача для алгебраических многочленов относится к обратным задачам строительной механики, родственным обратным задачам математической физики [7, 8, 11, 12]. Задача решается вычислительной системой, реализующей алгоритм оценки конструкций параметрами идентификации [3, 10, 11, 13-16]. В обратных задачах получаемые экспериментально зашумленные входные данные вызывают большое возмущение решения [17, 14]. Интервальный анализ позволяет учитывать неопределённости и неоднозначности постановки задачи [18, 19].

В коэффициентной обратной задаче Коши применительно к уравнению прогибов при плоском изгибе балки с зашумленными значениями прогибов (конструктивных входных данных вычислительной системы) выполнены исследования по восстановлению непосредственно не измеряемых целевых характеристик: коэффициентов многочлена – уравнения упругой линии балки и начальных параметров упругой ли-

нии, а также по связи точности экспериментальных входных данных с точностью результатов обратной задачи [7, 10, 20]. В этих исследованиях эффективно используются приемы вычислительной математики: сеточный метод решения обратных некорректных задач; регуляризация решения [10, 12, 20-24]; управление распределением узлов сетки аппроксимации параметрами регуляризации, в том числе с учетом связи структуры сетки аппроксимации с чебышёвским альтернансом при равномерной непрерывной норме абсолютной погрешности входных данных [21, 22, 24, 26-30]; редукция измерений [31-33]; конечномерная линейная лагранжева аппроксимация [27, 30]; использование функции и константы Лебега в показателях качества обработки входных данных и алгоритмов оценки регуляризации и аппроксимации [8, 34]; численные методы [8, 35]. При этом в исследованиях уделено мало внимания восстановлению нагрузок на конструктивные системы – важному компоненту диагностики механического состояния конструкций [36, 37]. Актуально дополнить ранее выполненные исследования изучением восстановления нагрузок на стоечно-балочную конструктивную систему.

Цель данной статьи – разработка методики восстановления внешней нагрузки на стоечно-балочную конструктивную систему при плоском изгибе балки в условиях зашумленных измеряемых прогибомерами входных данных вычислительной системы.

Материалы и методы

На рис. 1 представлена консольная балка постоянного сечения при плоском изгибе в главной плоскости uoz комбинированной внешней нагрузкой изгибающим моментом M и силой P на свободном конце балки, а также распределенной по балке нагрузкой q .

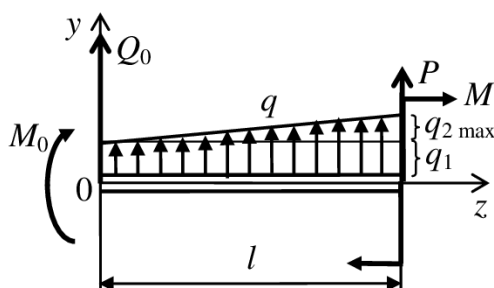


Рис. 1. Балка с внешней нагрузкой

Fig. 1. A beam with an external load

На примере балки (см. рис. 1) рассмотрим обратную задачу Коши относительно начальных параметров упругой линии балки, а также определение внешней нагрузки на балку.

На основании гипотезы плоских сечений дифференциальное уравнение изгиба балки имеет вид

$$\frac{d^5 y(z)}{dz^5} = \frac{q_{2\max}}{EI}, \quad (1)$$

где $y(z)$ – упругое смещение центра тяжести сечения балки вдоль оси z ; $q_{2\max}$ – максимальное значение линейно возрастающей распределенной нагрузки $q_2(z) = q_{2\max}z/l$; EI – жесткость сечения балки на изгиб.

В отсутствии распределенной моментной нагрузки (см. рис. 1):

$$\begin{aligned} \frac{dM(z)}{dz} &= Q(z), \\ \frac{dQ(z)}{dz} &= q(z), \\ \frac{dq(z)}{dz} &= \frac{q_{2\max}}{l}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $M(z)$ – изгибающий момент в сечении балки; $Q(z)$ – перерезывающая сила в сечении; $q(z) = q_1 + q_2(z)$ – распределенная нагрузка.

Краевые условия для уравнения (1) относятся к значениям прогиба y , угла поворота dy/dz , изгибающего момента $M(z)$ и перерезывающей силы $Q(z)$.

Нормальные фундаментальные функции приведенного к уравнению (1) однородного уравнения $d^5 y(z)/dz^5 = 0$ имеют вид $Y_0(z) = 1$, $Y_1(z) = z$, $Y_2(z) = z^2/2!$, $Y_3(z) = z^3/3!$. Общий интеграл уравнения (1):

$$\begin{aligned} y(z) &= y(0)Y_0(z) + \frac{dy}{dz}(0)Y_1(z) + \\ &+ \frac{d^2 y}{dz^2}(0)Y_2(z) + \frac{d^3 y}{dz^3}(0)Y_3(z) + \\ &+ \frac{1}{EI} \int_0^z q(s)Y_3(z-s)ds \end{aligned}$$

или с учетом соотношений (2)

$$\begin{aligned} y(z) &= y(0) + \frac{dy}{dz}(0)z + \frac{M_0}{EI} \frac{z^2}{2!} + \\ &+ \frac{Q_0}{EI} \frac{z^3}{3!} + \frac{q_1}{EI} \frac{z^4}{4!} + \frac{q_{2\max}}{EI} \frac{z^5}{5!}. \end{aligned} \quad (3)$$

Величины $y(0)$, $y'(0)$, M_0 и Q_0 – начальные параметры упругой линии балки (уравнения прогибов балки (1)), которые в обратной задаче Коши в строительной механике вычисляют в качестве целевых характеристик задачи.

Уравнение (3) в компактной форме представляем многочленом

$$y(z) = \sum_{r=0}^5 a_r \frac{z^r}{r!}, \quad a_5 \neq 0. \quad (4)$$

Многочлен пятой степени (4) при усложнении вида распределенной нагрузки в сравнении с нагрузкой, представленной на рис. 1, обобщаем до многочлена

$$y_n(a, z) = \sum_{r=0}^n a_{n,r} \frac{z^r}{r!}, \quad a_{n,n} \neq 0, \quad (5)$$

где

$$a_{n,0} = y(0); \quad a_{n,1} = y'(0); \quad a_{n,2} = \frac{M_0}{EI};$$

$$a_{n,3} = \frac{Q_0}{EI}; \quad a_{n,r} = \frac{q_{r-3\max}}{EI^{r-4}};$$

$$r \in (4, 5, \dots, n).$$

Вычислительная система реализует алгоритм получения коэффициентов $a_{n,r}^*$ алгебраического многочлена

$$y_n^*(a^*, z) = \sum_{r=0}^n a_{n,r}^* \frac{z^r}{r!}, \quad (6)$$

приближенного соотношением $a_{n,r} \approx a_{n,r}^*$ к многочлену (5).

Зашумленные конструктивные входные данные вычислительной системы – значения прогибов балки $y_n^*(a^*, z_i)$, $i \in (1, 2, \dots, n+1)$ на интервале $[0, l]$ (см. рис. 1) от прогибомеров поступают на компонент информационно-вычислительной системы – техническое (аппаратное) средство для размещения входных данных. Входные данные измеряются на исследуемой конструкции в узлах сетки аппроксимации

$$0 \leq z_1 < z_2 < \dots < z_{n+1} \leq l. \quad (7)$$

Коэффициентная обратная задача для уравнения прогибов балки моделируется совокупностью уравнений (5), (6), (7) и уравнениями:

$$a_{n,r} \approx a_{n,r}^* = \sum_{i=1}^{n+1} l_{n,r,i} \left[y_n^*(a^*, z_i) \right], \quad (8)$$

$$r \in (0, 1, \dots, n);$$

$$\sum_{i=1}^{n+1} l_{n,r,i} z_i^j = \begin{cases} 0 & \text{при } j \neq r \\ 1 & \text{при } j = r \end{cases}, \quad (9)$$

$$j = 0 : n, \quad r \in (0, 1, \dots, n);$$

$$R[y_n(a, z_i)] = y_n^*(a^*, z_i) - y_n(a, z_i); \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \|\Delta y_n(a, z_i)\| &= \Delta_{\max} [y_n(a, z_i)] \geq \\ &\geq \Delta y_n(a, z_i) = |R[y_n(a, z_i)]|; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\Delta a_{n,r} = \sum_{i=1}^{n+1} l_{n,r,i} \Delta y_n(a, z_i); \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{\max} [a_{n,r}] &\leq \\ &\leq \alpha_{n,r}(Z) \cdot \sup \Delta_{\max} [y_n(a, z_i)]; \end{aligned}$$

$$(13)$$

$$L_{n,r}(Z) = \sum_{i=1}^{n+1} |l_{n,r,i}|; \quad (14)$$

$$\Lambda_{n,r,s} = \min L_{n,r}(Z);$$

$$(15)$$

$$\alpha_{n,r}(Z) = L_{n,r}(Z) \rightarrow \min. \quad (16)$$

Для получения разрешенной системы уравнений воспользуемся условиями Лагранжа [29] в виде

$$\sum_{i=0}^n a_{n,r}^* \frac{z_i^r}{r!} = y_n^*(a^*, z), \quad i = 1 : n+1.$$

Тогда значения коэффициентов $a_{n,r}$ вычисляются приближением с использованием линейной лагранжевой аппроксимации (8) в методе неопределенных коэффициентов. Формулы множителей Лагранжа $l_{n,r,i}$, в том числе мно-

жителей $l_{n,2,i}$ и $l_{n,3,i}$ для начальных параметров M_0 и Q_0 , получаются решением системы уравнений (9). Множители Лагранжа в формуле (8) представимы также в виде [28]

$$L_{n,r,i} = L_{n,0,i}^{(r)}(z)|_{z=0} \quad (17)$$

через базис Лагранжа

$$l_i(z) = L_{n,0,i}(z) = \frac{1}{\prod_n} \prod_{j=1}^{n+1} (z - z_j), j \neq i, \quad (18)$$

$$\text{где } \prod_n = \prod_{i=1}^{n+1} (z_i - z_j), j \neq i. \quad (19)$$

Частные формулы множителей Лагранжа имеют вид:

$$\begin{aligned} L_{n,n,i} &= \frac{n!}{\prod_n}; \\ L_{n,n-1,i} &= -\frac{(n-1)!}{\prod_n} \sum_{j=1}^{n+1} z_j, j \neq i; \\ L_{n,n-2,i} &= \frac{(n-2)!}{\prod_n} \sum_{m=1}^{n+1} \prod_{j=1}^{n+1} z_j z_m, \quad (20) \\ i &\neq j \neq m \neq i; \\ L_{n,n-3,i} &= -\frac{(n-3)!}{\prod_n} \sum_{m=1}^{n+1} \prod_{j=1}^{n+1} z_j z_k z_m, \\ k &\neq i \neq j \neq k \neq m \neq i, j \neq m. \end{aligned}$$

Формулами (17) – (20) дополняем исследуемую математическую модель коэффициентной обратной задачи.

Используя апостериорно-интервальный анализ [10; 11] при выборе метрики, каждое из входных данных $y_n^*(a^*, z_i)$ характеризуем погрешностью (10). В математической модели коэффициентной обратной задачи на точечном множестве $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_{n+1}\}$ применяем

равномерную непрерывную норму абсолютной погрешности (11) [10], дифференциал к оценке погрешности формул (8), в результате получаем суммарную абсолютную погрешность по всем узлам сетки аппроксимации (12).

Уровень погрешности вычисления коэффициентов $a_{n,r}$, эффективность обработки входных данных и решения коэффициентной обратной задачи оцениваем абсолютным числом обусловленности задачи $\alpha_{n,r}(Z)$, связывающим неравенством (13) верхние границы абсолютной погрешности решения $\Delta_{\max}[a_{n,r}]$ и погрешности $\Delta_{\max}[y_n(a, z_i)]$ многочлена (1) в узлах сетки (7). В соответствии с формулами (8), ..., (13) абсолютное число обусловленности задачи равно значению функции Лебега (14) [30], При заданном значении степени многочлена (5) функция Лебега зависит лишь от структуры сетки (7).

В оптимизационных исследованиях для минимизации влияния погрешности зашумленных входных данных на качество приближения используем специально сконструированную редукцией измерений структуру сетки (7). Для этого используем целевой параметр – константу Лебега второго рода $\Lambda_{n,r,s}^1$ (15) [21], Считаем абсолютное число обусловленности задачи целевой функцией, решаем задачу минимизации числа обусловленности получением целевого параметра (15) по условию (16).

¹ s – первая буква слова second (второй).

Специально сконструированные узлы сетки (7) могут быть получены решением задачи (16). Задача может быть реализована прямым аналитическим методом разыскания частных производных функции Лебега (14) по переменным z_i на точечном множестве Z с учетом формул множителей Лагранжа $l_{n,r,i}$ с последующим получением безусловного экстремума (минимума) и оптимального плана координат узлов сетки аппроксимации.

При выводе явных формул в радикалах оптимальных узлов сетки аппроксимации (7) с увеличением значений n и r в многочлене (5) усложняются формулы множителей Лагранжа, усложняется дифференцирование функции (14) с преобразованием дифференциалов для каждой координаты узлов в разрешающих уравнениях, а при вычислении корней разрешающих уравнения по теореме Абеля на степень уравнений накладывается ограничение. В качестве альтернативы дифференцированию функции (14) для решения задачи (16) и получения оптимальных координат узлов сетки аппроксимации используем предложенную в работе [21] связь распределения узлов сетки аппроксимации (7) с чебышёвским альтернансом экстремальных полиномов, в частности полинома Чебышёва первого рода.

Поставим задачу вычисления внешней нагрузки на балку с использованием математической модели коэффициентной

обратной задачи по значениям предварительно вычисленных коэффициентов $a_{n,r}^*$ с обобщением сетки аппроксимации (7) на сетку

$$0 = z_1 < z_2 < \dots < z_{n+1} = l. \quad (21)$$

Результаты и их обсуждение

Лагранжева аппроксимация в модели обратной задачи Коши

Результаты вывода множителей Лагранжа $l_{n,r,i}$ при $n = 4, 5$ решением системы уравнений (9) и по формулам (17) показаны в табл. 1. Уже при $n = 5$ в формулы множителей Лагранжа в виде дробей входят многочлены пятой степени, с увеличением n все сложнее получать множители Лагранжа решением системы уравнений (9) в сравнении с алгоритмическим методом использования формул (17).

Формулы функции Лебега $\Lambda_{n,r}$ содержат дроби с многочленами степени более n , в частности, знаменатель функции Лебега $\Lambda_{3,3}$ – многочлен четвертой степени. Функция Лебега $\Lambda_{4,2}$ имеет вид алгебраической дроби, числитель которой многочлен восьмой степени, а знаменатель – десятой степени. Функция Лебега при $n \geq 5$ имеет еще более сложный вид. Эти обстоятельства затрудняют получение аналитическим методом оптимальной структуры сетки (7) минимизацией числа обусловленности задачи целевым параметром (15) по условию (16).

Таблица 1. Формулы множителей Лагранжа $l_{n,r,i}$ **Table 1.** Formulas of Lagrange multipliers $l_{n,r,i}$

n	r	i	Множители Лагранжа $l_{n,r,i}$ / Lagrange multipliers $l_{n,r,i}$
4	2	1	$2 \frac{z_2 z_3 + z_2 z_4 + z_2 z_5 + z_3 z_4 + z_3 z_5 + z_4 z_5}{(z_1 - z_2)(z_1 - z_3)(z_1 - z_4)(z_1 - z_5)}$
		2	$2 \frac{z_1 z_3 + z_1 z_4 + z_1 z_5 + z_3 z_4 + z_3 z_5 + z_4 z_5}{(z_2 - z_1)(z_2 - z_3)(z_2 - z_4)(z_2 - z_5)}$
		3	$2 \frac{z_1 z_2 + z_1 z_4 + z_1 z_5 + z_2 z_4 + z_2 z_5 + z_4 z_5}{(z_3 - z_1)(z_3 - z_2)(z_3 - z_4)(z_3 - z_5)}$
		4	$2 \frac{z_1 z_2 + z_1 z_3 + z_1 z_5 + z_2 z_3 + z_2 z_5 + z_3 z_5}{(z_4 - z_1)(z_4 - z_2)(z_4 - z_3)(z_4 - z_5)}$
		5	$2 \frac{z_1 z_2 + z_1 z_3 + z_1 z_4 + z_2 z_3 + z_2 z_4 + z_3 z_4}{(z_5 - z_1)(z_5 - z_2)(z_5 - z_3)(z_5 - z_4)}$
	3	1	$-6 \frac{z_2 + z_3 + z_4 + z_5}{(z_1 - z_2)(z_1 - z_3)(z_1 - z_4)(z_1 - z_5)}$
		2	$-6 \frac{z_1 + z_3 + z_4 + z_5}{(z_2 - z_1)(z_2 - z_3)(z_2 - z_4)(z_2 - z_5)}$
		3	$-6 \frac{z_1 + z_2 + z_4 + z_5}{(z_3 - z_1)(z_3 - z_2)(z_3 - z_4)(z_3 - z_5)}$
		4	$-6 \frac{z_1 + z_2 + z_3 + z_5}{(z_4 - z_1)(z_4 - z_2)(z_4 - z_3)(z_4 - z_5)}$
		5	$-6 \frac{z_1 + z_2 + z_3 + z_4}{(z_5 - z_1)(z_5 - z_2)(z_5 - z_3)(z_5 - z_4)}$
	4	1	$24 \frac{1}{(z_1 - z_2)(z_1 - z_3)(z_1 - z_4)(z_1 - z_5)}$
		2	$24 \frac{1}{(z_2 - z_1)(z_2 - z_3)(z_2 - z_4)(z_2 - z_5)}$
		3	$24 \frac{1}{(z_3 - z_1)(z_3 - z_2)(z_3 - z_4)(z_3 - z_5)}$
		4	$24 \frac{1}{(z_4 - z_1)(z_4 - z_2)(z_4 - z_3)(z_4 - z_5)}$
		5	$24 \frac{1}{(z_5 - z_1)(z_5 - z_2)(z_5 - z_3)(z_5 - z_4)}$

n	r	i	Множители Лагранжа $\ln,r,i$ / Lagrange multipliers $\ln,r,i$
5	2	1	$-2 \frac{z_2 z_3 z_4 + z_2 z_3 z_5 + z_2 z_3 z_6 + z_3 z_4 z_5 + z_3 z_4 z_6 + z_4 z_5 z_6}{(z_1 - z_2)(z_1 - z_3)(z_1 - z_4)(z_1 - z_5)(z_1 - z_6)}$
		2	$-2 \frac{z_1 z_3 z_4 + z_1 z_3 z_5 + z_1 z_3 z_6 + z_3 z_4 z_5 + z_3 z_4 z_6 + z_4 z_5 z_6}{(z_2 - z_1)(z_2 - z_3)(z_2 - z_4)(z_2 - z_5)(z_2 - z_6)}$
		6	$-2 \frac{z_1 z_2 z_3 + z_1 z_2 z_4 + z_1 z_2 z_5 + z_2 z_3 z_4 + z_2 z_3 z_5 + z_3 z_4 z_5}{(z_6 - z_1)(z_6 - z_2)(z_6 - z_3)(z_6 - z_4)(z_6 - z_5)}$
	3	4	$6 \frac{z_1 z_2 + z_1 z_3 + z_1 z_5 + z_1 z_6 + z_2 z_3 + z_2 z_5 + z_2 z_6 + z_3 z_5 + z_3 z_6 + z_5 z_6}{(z_4 - z_1)(z_4 - z_2)(z_4 - z_3)(z_4 - z_5)(z_4 - z_6)}$
	4	2	$-24 \frac{z_1 + z_3 + z_4 + z_5 + z_6}{(z_2 - z_1)(z_2 - z_3)(z_2 - z_4)(z_2 - z_5)(z_2 - z_6)}$
	5	4	$120 \frac{1}{(z_4 - z_1)(z_4 - z_2)(z_4 - z_3)(z_4 - z_5)(z_4 - z_6)}$

Чебышёвская аппроксимация в коэффициентной обратной задаче

Из теоремы связи распределения узлов сетки аппроксимации (7) с чебышёвским альтернансом [21] получено для сетки (21) следствие об оптимальном плане координат узлов сетки аппроксимации по чебышёвскому альтернансу.

Следствие. Если в коэффициентной обратной задаче Коши известна степень n исследуемого алгебраического многочлена упругой линии балки, то при равномерной непрерывной норме абсолютной погрешности входных данных и результатов решения задачи для минимизации влияния погрешности входных данных на точность вычисления начальных параметров упругой линии балки и

внешней нагрузки на балку через коэффициенты алгебраического многочлена упругой линии балки оптимальная сетка аппроксимации с чебышёвским альтернансом представима точечным множеством

$$z_{n,i} = \left(1 - \cos \frac{\pi(i-1)}{n} \right) \frac{l}{2}, \quad i = 1 : n+1. \quad (22)$$

Безразмерные координаты $z_{n,i,d}^1 = z_{n,i}/l$ узлов оптимальных сеток аппроксимации с точечным множеством (22) при n , равном двум, трем, четырем и пяти, представлены в табл. 2 явными формулами в радикалах и численными значениями. В методе линейной ла-

¹ d – первая буква слова dimensionless (безразмерное)

гранжевой аппроксимации по критерию (15) с дифференцированием функции (14) получены явные формулы в радикалах при $n = 2, 3, 4$, а при $n = 5$ – значения координат численным методом. Совпа-

дение результатов по критерию (15) с точным множеством (22) подтверждает вышеуказанное следствие. Очевидно, что по методу индукции точечное множество (22) применимо и при $n > 5$.

Таблица 2. Оптимальные координаты $z_{n,i,d}$ узлов сетки аппроксимации ($z_{n,1,d} = 0, z_{n,n+1,d} = 1$)

Table 2. Optimal coordinates $z_{n,i,d}$ of approximation grid nodes ($z_{n,1,d} = 0, z_{n,n+1,d} = 1$)

n	i	Формулы координат в радикалах / Formulas for coordinates in radicals	Численные значения координат / Numerical values of coordinates
2	2	$1/2$	$1/2$
3	2	$1/4$	$1/4$
	3	$3/4$	$3/4$
4	2	$(1-\sqrt{2}/2)/2$	0,1404
	3	$1/2$	$1/2$
	4	$(1+\sqrt{2}/2)/2$	0,8536
5	2	$(3-\sqrt{5})/8$	0,09549
	3	$(5-\sqrt{5})/8$	0,34549
	4	$(3+\sqrt{5})/8$	0,6545
	5	$(5+\sqrt{5})/8$	0,9045

Результаты решения задачи вычисления внешней нагрузки на балку с использованием математической модели коэффициентной обратной задачи

По рис. 1 при $n = 3$ внешняя нагрузка

$$M = -M_0 - Q_0 l = -a_{3,2} EI - a_{3,3} EI l, \\ P = -Q_0 = -a_{3,3} EI;$$

при $n = 4$ внешняя нагрузка

$$M = -M_0 - Q_0 l - \frac{q_1 l^2}{2} = \\ = -EI \left(a_{4,2} + a_{4,3} l + a_{4,4} \frac{l^2}{2} \right), \\ P = -Q_0 - q_1 l = -EI (a_{4,3} + a_{4,4} l), \\ q = q_1 = a_{4,4} EI.$$

При обобщении многочлена (4) до многочлена (5) внешняя нагрузка, в том числе средняя распределенная нагрузка q_a^1 , имеет вид

¹ a – первая буква слова average (средняя)

$$\begin{aligned}
M &= -M_0 - Q_0 l + l^2 \sum_{i=1}^{n-3} \frac{q_{i \max}}{i(i+1)} = \\
&= -EI \left(a_{n,2} + a_{n,3} l + \sum_{i=1}^{n-3} \frac{a_{n,i+3} l^{i+1}}{i(i+1)} \right), \\
P &= -Q_0 - l \sum_{i=1}^{n-3} \frac{q_{i \max}}{i} = \\
&= -EI \left(a_{n,3} + \sum_{i=1}^{n-3} a_{n,i+3} \frac{l^i}{i} \right), \quad (23) \\
q_{i \max} &= EI a_{n,i+3} l^{i-1}, \\
q_a &= \sum_{i=1}^{n-3} \frac{q_{i \max}}{i} = \\
&= EI \sum_{i=1}^{n-3} \frac{a_{n,i+3} l^{i-1}}{i}, \quad n \geq 4.
\end{aligned}$$

Внешняя нагрузка (23) с учетом уравнения (8) имеет вид

$$\begin{aligned}
M &\approx -EI \left(\sum_{i=1}^{n+1} l_{n,2,i} \left[y_n^*(a^*, z_i) \right] + \right. \\
&+ l \sum_{i=1}^{n+1} l_{n,3,i} \left[y_n^*(a^*, z_i) \right] + \\
&+ \sum_{j=1}^{n-3} \frac{l^{j+1}}{j(j+1)} \sum_{i=1}^{n+1} l_{n,j+3,i} \left[y_n^*(a^*, z_i) \right] \Bigg), \\
P &\approx -EI \left(\sum_{i=1}^{n+1} l_{n,3,i} \left[y_n^*(a^*, z_i) \right] + \right. \\
&+ \sum_{j=1}^{n-3} \frac{l^j}{j} \sum_{i=1}^{n+1} l_{n,j+3,i} \left[y_n^*(a^*, z_i) \right] \Bigg), \quad (24) \\
q_{j \max} &= EI \sum_{i=1}^{n+1} l_{n,j+3,i} \left[y_n^*(a^*, z_i) \right], \\
q_a &\approx EI \sum_{j=1}^{n-3} \frac{l^{j-1}}{j} \sum_{i=1}^{n+1} l_{n,j+3,i} \left[y_n^*(a^*, z_i) \right], \quad n \geq 4.
\end{aligned}$$

Применением дифференциала к оценке погрешности формул (24) и суммированием абсолютных погрешностей отдельных составляющих в этих формулах получены абсолютные по-

грешности внешних нагрузок, например, погрешность внешней нагрузки M при $n \geq 4$

$$\begin{aligned}
\Delta M &= EI \left(\Delta \sum_{i=1}^{n+1} l_{n,2,i} \left[y_n^*(a^*, z_i) \right] + \right. \\
&+ l \Delta \sum_{i=1}^{n+1} l_{n,3,i} \left[y_n^*(a^*, z_i) \right] + \\
&+ \Delta \sum_{j=1}^{n-3} \frac{l^{j+1}}{j(j+1)} \sum_{i=1}^{n+1} l_{n,j+3,i} \left[y_n^*(a^*, z_i) \right] \Bigg),
\end{aligned}$$

а для оценки влияния погрешности входных данных на качество приближения внешней нагрузки получены целевые параметры в виде аналогов констант Лебега второго рода

$$\begin{aligned}
\Lambda_{n,M,s} &= \Lambda_{n,2,s} + l \Lambda_{n,3,s} + \sum_{j=1}^{n-3} \frac{l^{j+1}}{j(j+1)} \Lambda_{n,j+3,s}, \\
\Lambda_{n,P,s} &= \Lambda_{n,3,s} + \sum_{j=1}^{n-3} \frac{l^j}{j} \Lambda_{n,j+3,s}, \\
\Lambda_{n,q_{j \max},s} &= \Lambda_{n,j+3,s}, \quad j = 1 : n-3, \quad n \geq 4.
\end{aligned}$$

Применяя формулы (13) ... (16) к оценке погрешности формул (12) и (23), получены формулы безразмерных целевых параметров $A_{n,r,s} = l^r \Lambda_{n,r,s}$, $A_{n,M,s} = l^2 \Lambda_{n,M,s}$, $A_{n,P,s} = l^3 \Lambda_{n,P,s}$ и $A_{n,q_{j,s}} = l^4 \Lambda_{n,q_{j,s}}$, показанные в табл. 3.

Значения целевых параметров качества приближения внешней нагрузки намного больше значений целевых параметров качества приближения начальных параметров M_0 и Q_0 упругой линии балки. Снизить значения целевых параметров качества приближения внешней нагрузки $A_{n,M,s}$ и $A_{n,P,s}$, являющихся сеточными функциями, соответственно до

значений параметров $A_{n,2,s}$ и $A_{n,3,s}$ с получением оптимального плана узлов сетки аппроксимации позволяют результаты теорем 1 и 2.

Таблица 3. Безразмерные целевые параметры качества приближения внешней нагрузки

Table 3. Dimensionless target parameters of the external load approximation quality

n	Обозначения параметров / Parameter designations	Численные значения параметров / Numerical values of the parameters
2	$A_{2,2,s} = A_{2,M,s}$	16
3	$A_{3,2,s}$	96
	$A_{3,3,s} = A_{3,P,s}$	192
	$A_{3,M,s}$	288
4	$A_{4,2,s}$	320
	$A_{4,3,s}$	1536
	$A_{4,4,s} = A_{4,q_1,s}$	3072
	$A_{4,M,s}$	5360
	$A_{4,P,s}$	4608
5	$A_{5,2,s}$	800
	$A_{5,3,s}$	6720
	$A_{5,4,s} = A_{5,q_{1\max},s}$	30720
	$A_{5,5,s} = A_{5,q_{2\max},s}$	61440
	$A_{5,M,s}$	28000
	$A_{5,P,s}$	37440

Теорема 1. Если в коэффициентной обратной задаче при плоском изгибе консольной балки известны степень n исследуемого алгебраического многочлена упругой линии балки и формулы множителей Лагранжа $l_{n,2,i}$ при $n \geq 3$, то для минимизации влияния погрешности входных данных на точность вычисления внешней нагрузки изгибающим моментом M на свободном конце балки приближением $M \approx \sum_{i=1}^{n+1} l_{n,M,i} [y_n^*(a^*, z_i)]$ множители Лагранжа $l_{n,M,i}$ равны умноженным на (-1) множителям Лагранжа $l_{n,2,i}$ с обратной последовательностью узлов сетки аппроксимации.

Таким образом, множители Лагранжа $l_{n,M,i}$ образуют последовательность $l_{n,M,1} = -l_{n,2,n+1}$, $l_{n,M,2} = -l_{n,2,n}$, ..., $l_{n,M,n+1} = -l_{n,2,1}$, что эквивалентно равенству

$$l_{n,M,i} = -l_{n,2,n+2-i}. \quad (25)$$

Теорема 2. Если в коэффициентной обратной задаче для уравнения прогибов известны степень n исследуемого алгебраического многочлена упругой линии балки и формулы множителей Лагранжа $l_{n,3,i}$, то при $n \geq 4$ для минимизации влияния погрешности входных данных на точность вычисления внешней сосредоточенной нагрузки P на свободном конце балки приближением $P \approx \sum_{i=1}^{n+1} l_{n,P,i} [y_n^*(a^*, z_i)]$ множители Лагранжа $l_{n,P,i}$ равны множителям Лагранжа $l_{n,3,i}$ с обратной последовательностью узлов сетки аппроксимации.

Таким образом, множители Лагранжа $l_{n,P,i}$ образуют последовательность $l_{n,P,1} = l_{n,3,n+1}$, $l_{n,P,2} = l_{n,3,n}$, ..., $l_{n,P,n+1} = l_{n,3,1}$, что эквивалентно равенству

$$l_{n,P,i} = l_{n,3,n+2-i}. \quad (26)$$

Теоремы 1 и 2 доказываются по индукции. С использованием соотношения (25) при $n \in (3, 4, 5)$ численным способом получены значения целевых параметров $\Lambda_{n,M,s}$ и $A_{n,M,s}$, соответственно равные значениям $\Lambda_{n,2,s}$ и $A_{n,2,s}$, в том числе показанные в табл. 3. Также получено равенство значений целевых параметров $\Lambda_{n,P,s}$ и $\Lambda_{n,3,s}$, соответственно с параметрами $A_{n,P,s}$ и $A_{n,3,s}$ с использованием соотношения (26) при $n \in (4, 5)$, что доказывает теоремы 1 и 2. Тем самым доказано существование и единственность решения задачи восстановления внешней нагрузки на стоечно-балочную конструктивную систему. По методу индукции формулы (25) и (26) применимы и при $n > 5$.

Результаты теорем 1 и 2 снижают погрешность вычисления целевых параметров, в частности, в 5,5 раз параметра $A_{5,P,s}$ и в 3,5 раз параметра $A_{5,M,s}$. Эти параметры соответствуют оптимальным координатам $z_{n,i,d}$ узлов сетки аппроксимации (см. табл. 2), отклонение координат от оптимальных увеличивает погрешность целевых параметров, в частности, при равномерной сетке аппроксимации погрешность параметров $A_{5,P,s}$ и $A_{5,M,s}$ увеличивается бо-

лее, чем в 1,6 раз. Приведенные оценки влияния погрешности зашумленных входных данных вычислительной системы на точность решения задачи восстановления внешней нагрузки на стоечно-балочную конструктивную систему, а также влияния отклонения координат сетки аппроксимации от оптимальных, характеризуют эффективность данного исследования.

Выводы

Данное исследование посвящено вопросам обработки вычислительной системой зашумленных конструктивных входных данных в обратной задаче Коши для уравнения прогибов балки с последующим вычислением внешней нагрузки на стоечно-балочную конструктивную систему.

В задаче вычисления внешней нагрузки на стоечно-балочную конструктивную систему предложена математическая модель, включающая связь распределения на исследуемой конструкции узлов сетки аппроксимации, в которых измеряются прогибы балки в качестве входных данных вычислительной системы, с чебышёвским альтернансом.

Решение поставленной задачи получено с выявленной в линейной лагранжевой аппроксимации функциональной связью множителей Лагранжа для внешней нагрузки на стоечно-балочную конструктивную систему и для начальных параметров упругой линии балки.

Список литературы

1. Building structural health monitoring using dense and sparse topology wireless sensor network / M.E. Haque, M.F.M. Zain, M.A. Hannan, M.H. Rahman // *Smart Structures and Systems*. 2015; 16(4): 607-621. <https://doi.org/10.12989/sss.2015.16.4.623>.
2. Кашеварова Г.Г., Тонков Ю.Л., Тонков И.Л. Интеллектуальная автоматизация инженерного обследования строительных объектов // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017; 13(3): 42-57. <https://doi.org/10.22337/1524-5845-2017-13-3-42-57>.
3. Lehmhus D., Busse M. Structural health monitoring (SHM) // Bosse S., Lehmhus D., Lang W. (eds). *Material Integrated Intelligent Systems Technology and Applications: Technology and Applications*. Hoboken, USA: John Wiley & Sons Inc., 2018. P. 529-570. DOI: 10.1002/9783527679249.ch22.
4. Chen H-P., Ni Yi-Q. Structural health monitoring of large civil engineering structures. 111 River Street, Hoboken, NJ 07030, USA: John Wiley & Sons Inc., 2018. 302 p. DOI:10.1002/9781119166641.
5. Boundary condition modelling and identification for cantilever-like structures using natural frequencies / W. Liu, Z. Yang, L. Wang, N. Guo // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2019; 32(6): 1451-1464. DOI: 10.1016/j.cja.2019.04.003.
6. Shi Z., O'Brien W. Development and implementation of automated fault detection and diagnostics for building systems: A review // *Automation in Construction*. 2019; 104: 215-229. DOI:10.1016/j.autcon.2019.04.002.
7. Перельмутер А. В. Обратные задачи строительной механики // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2020; 22(4): 83-101. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-4-83-101>.
8. Локтионов А.П. Информационно-измерительная система мониторинга балок в строительных конструкциях // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2021. Т. 25, № 4. С. 23-51. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-29-51>.
9. Markov I.P., Igumnov L.A. Reconstruction of the time dependence of a transient boundary load applied to a three-dimensional isotropic linearly elastic solid // *Mechanics of Solids*. 2021; 56(6): 1004-1012. DOI: 10.3103/S0025654421060108.
10. Локтионов А. П. Информационная система анализа балочных элементов под комбинированной нагрузкой // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2021; 2: 45-52. DOI: 10.37538/0039-2383.2021.2.45.52.
11. Ватульян А. О., Плотников Д. К. Обратные коэффициентные задачи в механике // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2019; 3: 37-47. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.3.04.

12. Кабанихин С.И. Обратные задачи и искусственный интеллект // *Успехи кибернетики*. 2021; 2(3): 33-43. DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-3-5.
13. Meschikhin I. A., Gavryushin S. S. Quality criteria and algorithm for selecting reduced finite element models for technical design monitoring // *Mat. Mod. Chisl. Met.* 2016; 2: 103-121. <https://doi.org/10.18698/2309-3684-2016-4-103121>.
14. Горелик В.А., Золотова Т.В. Полный метод чебышевской интерполяции в задаче построения линейной регрессии // *Чебышевский сборник*. 2022; 23(4): 52-63. <https://doi.org/10.22405/2226-8383-2022-23-4-52-63>.
15. Huang Y., Ludwig S.A., Deng F. Sensor optimization using a genetic algorithm for structural health monitoring in harsh environments // *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2016; 6(3): 509-519. <https://doi.org/10.1007/s13349-016-0170-y>.
16. Siraya T. N. Methods of data processing in measurements and metrological models // *Measurement Techniques*. 2018; 61: 9-16. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1380-y>.
17. Cheney E.W., Kincaid D.R. Numerical Mathematics and Computing. Thomson Brooks/Cole; Belmont, California, USA, 2013. 765 p. URL: <https://hlevkin.com/hlevkin/60numalgs/Pascal/Numerical%20Mathematics%20and%20Computing.pdf>.
18. Moore R., Kearfott R., Cloud M. Introduction to Interval Analysis. Society for Industrial and Applied Mathematics. Philadelphia, USA, 2009. 234 p.
19. Шарый С. П. Конечномерный интервальный анализ. Новосибирск: Издательство «XYZ», 2024. 662 с. URL: <http://www.nsc.ru/interval/Library/InteBooks/SharyBook.pdf>.
20. Boykov I.V., Krivulin N.P. An Approximate Method for Recovering Input Signals of Measurement Transducers // *Measurement Techniques*. 2022; 64: 943-948. <https://doi.org/10.1007/s11018-022-02026-3>.
21. Loktionov A. P. Regularization of the lattice time function of the signal in the communication channel // *Telecommunications and Radio Engineering*. 2013; 72(2): 161-171. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i2.70.
22. Кудрявцев К.Я. Алгоритм построения полинома наилучшего равномерного приближения по экспериментальным данным // *Вестник национального исследовательского ядерного университета МИФИ*. 2019; 8(5): 480-486. DOI: 10.1134/S2304487X1905002X.
23. Smirnova A., Bakushinsky A. On iteratively regularized predictor-corrector algorithm for parameter identification // *Inverse Problems*. 2020; 36(12), id.125015: 30 pp. DOI: 10.1088/1361-6420/abc530.
24. Meshchikhin I.A., Gavryushin S.S. The envelope method in the problem of choosing a rational composition of measuring instruments // *Measurement Techniques*. 2021; 64: 151-155. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01910-8>.

25. Samarskii A. A., Vabishchevich P. N. Numerical Methods for Solving Inverse Problems of Mathematical Physics. Inverse and Ill-Posed Problems Series 52. De Gruyter; Berlin, New York, 2007. 438 p. <https://doi.org/10.1515/9783110205794>.

26. Малозёмов В.Н. Что даёт информация об альтернансе? // Малозёмов В.Н. Избранные лекции по экстремальным задачам. Часть вторая. СПб.: Изд-во ВВМ, 2017. С. 259-267. URL: <http://www.apmath.spbu.ru/cnsa/rep15.shtml#0312>.

27. Bakushinsky A.B., Kokurin M.M., Kokurin M.Yu. Regularization algorithms for Ill-posed problems. Berlin, Boston: De Gruyter; 2018. 153 p. <https://doi.org/10.1515/9783110557350>.

28. Локтионов А. П. Чебышёвский альтернанс при аппроксимации начальных условий обратной задачи Коши // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2021. Т. 25, № 3. С. 86-102. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-86-102>.

29. Соловьев С. Ю. Об одном классе множителей многочленов Чебышева // *Чебышевский сборник*. 2021; 22(4): 241-252. DOI 10.22405/2226-8383-2021-22-4-241-252.

30. Локтионов А.П. Восстановление начальных параметров балки при заданных младших коэффициентах уравнения прогибов // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2022; 6: 2-7. DOI: 10.37538/0039-2383.2022.6.2.7.

31. Пытьев Ю. П. Методы математического моделирования измерительно-вычислительных систем. 3 изд. М.: Физматлит, 2012. 427 с.

32. Балакин Д. А., Пытьев Ю. П. Редукция измерения при наличии субъективной информации // *Матем. Моделирование*. 2018; 30(12): 84-110. DOI: 10.31857/S023408790001938-5.

33. Loktionov A.P. Numerical Differentiation in the Measurement Model // *Meas Tech*. 2019; 62: 673-680. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01677-z>.

34. Ibrahimoglu B.A. Lebesgue functions and Lebesgue constants in polynomial interpolation // *Journal of Inequalities and Applications*. 2016; 2016(93): 1-15. <https://doi.org/10.1186/s13660-016-1030-3>.

35. Вержбицкий В.М. Основы численных методов. М.: Берлин: Директ-Медиа, 2021. 850 с. URL: <https://archive.org/details/48915verzhbickiyvmosnovychislennyhmetodov/page/n1/mode/2up>

36. Reddy A.N., Ananthasuresh G.K. On computing the forces from the noisy displacement data of an elastic body // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2008; 76(11): 1645-1677. URL: <http://eprints.iisc.ac.in/id/eprint/17827>.

37. Янчевский И.В. К проблеме восстановления временной зависимости нестационарного воздействия, приложенного к упруго-деформируемому элементу конструкции // *Проблемы машиностроения*. 2015; 18(2): 43-54. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:120920060>.

References

1. Haque M.E., Zain M.F.M., Hannan M.A., Rahman M.H. Building structural health monitoring using dense and sparse topology wireless sensor network. *Smart Structures and Systems*. 2015; 16(4): 607-621. <https://doi.org/10.12989 / sss.2015.16.4.623>.
2. Kashevarova G.G., Tonkov, Y.L., Tonkov I.L. [Intellectual automation of engineering survey of building objects]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017; 13(3): 42-57. (In Russ.). <https://doi.org/10.22337/1524-5845-2017-13-3-42-57>.
3. Lehmhus D., Busse M. Structural health monitoring (SHM). In: Bosse S., Lehmhus D., Lang W. (eds). *Material Integrated Intelligent Systems Technology and Application*. Hoboken: John Wiley & Sons Inc.; 2018. P. 529-570. 696 p. DOI: 10.1002/9783527679249.ch22.
4. Chen H-P., Ni Yi-Q. Structural health monitoring of large civil engineering structures. Hoboken, USA: .John Wiley & Sons Inc.; 2018. 302 p. doi:10.1002/9781119166641.
5. Liu W., Yang Z., Wang L., Guo N. Boundary condition modelling and identification for cantilever-like structures using natural frequencies. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2019; 32(6):. 1451-1464. DOI: 10.1016/j.cja.2019.04.003.
6. Shi Z., O'Brien W. Development and implementation of automated fault detection and diagnostics for building systems: A review. *Automation in Construction*. 2019; 104: 215-229. DOI:10.1016/j.autcon.2019.04.002.
7. Perelmuter A.V. Inverse problems of structural mechanics. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arxitekturno-stroitel'nogo universiteta = Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2020; 22(4): 83-101. (In Russ.). <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-4-83-101>.
8. Loktionov A. P. Information and Measurement System for Monitoring Beams in Building Structures. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(4): 29-51 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-29-51>.
9. Markov I.P., Igumnov L.A. Reconstruction of the time dependence of a transient boundary load applied to a three-dimensional isotropic linearly elastic solid. *Mechanics of Solids*. 2021; 56(6): 1004-1012. (In Russ.). DOI: 10.3103/S0025654421060108.
10. Loktionov A.P. Information system for analysis of beam elements under combined load. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii = Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2021; 2: 45-52. (In Russ.). DOI: 10.37538/0039-2383.2021.2.45.52.
11. Vatulyan A.O., Plotnikov D.K. Inverse coefficient problems in mechanics. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politexnicheskogo universiteta. Mexanika = PNRPU MECHANICS BULLETIN*. 2019; 3: 37-47. (In Russ.). DOI: 10.15593/perm.mech/2019.3.04.

12. Kabanikhin S.I. Inverse Problems and Artificial Intelligence. *Uspexi kibernetiki = Russian artificial intelligence Journal of Cybernetics*. 2021; 2(3): 33-43. (In Russ.). <https://doi.org/10.51790/2712-9942-2021-2-3-5>.
13. Meschikhin I. A., Gavryushin S. S. Quality criteria and algorithm for selecting reduced finite element models for technical design monitoring. *Mat. Mod. Chisl. Met.* 2016; 12: 103-121. <https://doi.org/10.18698/2309-3684-2016-4-103121>.
14. Gorelik V.A., Zolotova T.V. The total method of Chebyshev interpolation in the problem of constructing a linear regression. *Chebyshevskii Sbornik = Chebyshev collection*. 2022; 23(4): 52-63. (In Russ.). <https://doi.org/10.22405/2226-8383-2022-23-4-52-63>.
15. Huang Y., Ludwig S.A., Deng F. Sensor optimization using a genetic algorithm for structural health monitoring in harsh environments. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2016; 6(3): 509-519. <https://doi.org/10.1007/s13349-016-0170-y>.
16. Siraya T. N. Methods of data processing in measurements and metrological models. *Measurement Techniques*. 2018; 61: 9-16. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1380-y>.
17. Cheney E.W., Kincaid D.R. *Numerical Mathematics and Computing*. Belmont: Thomson Brooks/Cole; 2013. 765. Available at: <https://hlevkin.com/hlevkin/60numalgs/Pascal/Numerical%20Mathematics%20and%20Computing.pdf>.
18. Moore R., Kearfott R., Cloud M. *Introduction to Interval Analysis*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics; 2009. 234.
19. Sharyi S. P. Finite-dimensional interval analysis. Novosibirsk: Izdatel'stvo «XYZ», 2024. 662 p. Available at: <http://www.nsc.ru/interval/Library/InteBooks/SharyBook.pdf>.
20. Boykov I.V., Krivulin N.P. An Approximate Method for Recovering Input Signals of Measurement Transducers. *Measurement Techniques*. 2022; 64: 943-948. <https://doi.org/10.1007/s11018-022-02026-3>.
21. Loktionov, A. P. Regularization of the lattice time function of the signal in the communication channel. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2013; 72(2): 161-171. <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v72.i2.70>.
22. Kudryavtsev K.Ya. Algorithm for constructing a polynomial of the best uniform approximation from experimental data. *Vestnik natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta MIFI = Bulletin of the National Research Nuclear University MEPhI*. 2019; 8(5): 480-486. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S2304487X1905002X>.
23. Smirnova A., Bakushinsky A. On iteratively regularized predictor-corrector algorithm for parameter identification. *Inverse Problems*. 2020; 36(12), id.125015: 30 pp. <https://doi.org/10.1088/1361-6420/abc530>.
24. Meshchikhin I.A., Gavryushin S.S. The envelope method in the problem of choosing a rational composition of measuring instruments. *Measurement Techniques*. 2021; 64: 151-155. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01910-8>.

25. Samarskii A. A., Vabishchevich P. N. Numerical Methods for Solving Inverse Problems of Mathematical Physics. *Inverse and Ill-Posed Problems Series 52*. Berlin, New York: De Gruyter; 2007. 438. <https://doi.org/10.1515/9783110205794>.

26. Malozemov V.N., What does information about alternance give? In: *Malozemov V.N. Selected lectures on extremal problems. Part two*. St. Petersburg: Izdatel'stvo VVM; 2017; P. 259-267. (In Russ.). Available at: <http://www.apmath.spbu.ru/cnsa/rep15.shtml#0312>.

27. Bakushinsky A.B., Kokurin M.M., Kokurin M.Yu. Regularization algorithms for Ill-posed problems. Berlin, Boston: De Gruyter; 2018. 153 p. <https://doi.org/10.1515/9783110557350>.

28. Loktionov A.P. Chebyshev Alternance when Approximating Initial Conditions of the Inverse Cauchy Problem. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(3): 86-102. (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-86-102>.

29. Soloviev S. Y. On a class of factors of the Chebyshev polynomials. *Chebyshevskii sbornik = Chebyshev collection*. 2021; 22(4): 241-252. (In Russ.). <https://doi.org/10.22405/2226-8383-2021-22-4-241-252>.

30. Loktionov A.P. Recovery of the initial parameters of the beam with the given junior coefficients of the deflection equation. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii = Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2022; 6: 2-7. (In Russ.). <https://doi.org/10.37538/0039-2383.2022.6.2.7>.

31. Pyt'ev YU. P. Methods of mathematical modeling of measuring and computing systems. Moscow: Izdatel'stvo Fizmatlit; 2012. 427 p. (In Russ.).

32. Balakin D.A., Pyt'ev Yu.P. Measurement reduction in the presence of subjective information. *Matematicheskoe modelirovanie = Mathematical Models and Computer Simulations*. 2018; 30(12): 84-110. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S023408790001938-5>.

33. Loktionov A.P. Numerical Differentiation in the Measurement Model. *Meas Tech*. 2019; 62: 673-680. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01677-z>.

34. Ibrahimoglu B.A. Lebesgue functions and Lebesgue constants in polynomial interpolation. *Journal of Inequalities and Applications*. 2016; 2016(93): 1-15. <https://doi.org/10.1186/s13660-016-1030-3>.

35. Verzhbitskii V.M. Fundamentals of numerical methods. Moscow; Berlin: Izdatel'stvo Direkt-Media; 2021. 850 p. (In Russ.). Available at: <https://archive.org/details/48915verzhbickiyvmosnovychislennyhmetodov/page/n1/mode/2up>.

36. Reddy A.N., Ananthasuresh G.K. On computing the forces from the noisy displacement data of an elastic body. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2008; 76(11): 1645-1677. Available at: <http://eprints.iisc.ac.in/id/eprint/17827>.

37. Yanchevskii I.V. Restoration of temporary dependence of non-stationary disturbance applied to elastically deformed structural element. *Problemy mashinostroeniya = Problems of me-*

Информация об авторах / Information about the Authors

Локтионов Аскольд Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры инфраструктурных энергетических систем, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: loapa@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1108-4185>, Researcher ID: P-5434-2015

Askold P. Loktionov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Infrastructural Energy Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: loapa@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1108-4185>, Researcher ID: P-5434-2015

Ватутин Эдуард Игоревич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация e-mail: evatutin@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7362-7387> Researcher ID: C-9412-2017

Eduard I. Vatutin, Doctor of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Computer Science, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: evatutin@rambler.ru ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7362-7387> Researcher ID: C-9412-2017

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>.