

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

**Известия**  
**Юго-Западного**  
**государственного**  
**университета**

**Научный журнал**

Том 27 № 2 / 2023



**Proceedings**  
**of the Southwest**  
**State University**

**Scientific Journal**

Vol. 27 № 2 / 2023



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

Научный рецензируемый журнал

Основан в 1997 г.

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

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

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

Публикация статей в журнале для авторов бесплатна.

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

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

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

Машиностроение и машиноведение: 2.5.4; 2.5.5; 2.5.8.

Строительство: 2.1.1; 2.1.3; 2.1.9.

Информатика, вычислительная техника и управление: 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, доцент; Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия)

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

**Адрес учредителя, издателя и редакции:**

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

**Телефон:** +7(4712) 22-25-26,

**Факс:** +7(4712) 50-48-00.

**E-mail:** rio\_kursk@mail.ru

**Наименование органа, зарегистрировавшего издание:**

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (ПИ №ФС77-42691 от 16.11.10).

**ISSN 2223-1560 (Print)**

**ISSN 2686-6757 (Online)**

**Префикс DOI:**10.21869

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

© Юго-Западный государственный университет, 2023



Материалы журнала доступны под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

### Типография:

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

**Подписка и распространение:**  
журнал распространяется  
по подписке.

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

**Периодичность:** четыре выпуска в год

### Свободная цена

Оригинал-макет подготовлен Е.В. Мельник

Подписано в печать 02.08.2023.  
Дата выхода в свет 19.12.2023. Формат 60x84/8.  
Бумага офсетная. Усл.печ.л. 19,9.  
Тираж 1000 экз. Заказ 64.

16+

# Proceedings of the Southwest State University



Peer-reviewed scientific journal

Published since 1997

Before 2011

“Proceedings of the Kursk State Technical University”

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

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

All papers are published free of charge.

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

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

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

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

Construction: 2.1.1; 2.1.3; 2.1.9.

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

## EDITOR-IN-CHIEF

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

## DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

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

## EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## EDITORIAL COUNCIL

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### Founder and Publisher:

“Southwest State University”

### Official address of the Founder, Publisher and Editorial Office:

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

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

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

**E-mail:** [rio\\_kursk@mail.ru](mailto: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 №ФС77-42691 of 16.11.10).

**ISSN** 2223-1560 (Print)

**ISSN** 2686-6757 (Online)

**DOI Prefix:** 10.21869

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

### Printing office:

Printing Center

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

### Subscription and distribution:

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

**Publication frequency:** quarterly

**Free price**

Original lay-out design: E. Mel'nik

16+

© Southwest State University, 2023



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

Singed to print 02.08.2023.

Release date 19.12.2023. Format 60x84/8.

Offset paper. Printer's sheets 19,9.

Circulation 1000 copies. Order 64.

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Оригинальные статьи

**Исследование микроструктуры образцов, полученных методом послойного построения электрической дугой в защищённой атмосфере ..... 8**

*Григоров И. Ю., Гречухин А. Н., Чернышев И. А.*

**Сварка нагретым инструментом трубопроводов из полиэтилена для газоснабжения диаметром 90-315 мм ..... 24**

*Иванов Н. И., Чевычелов Д. А., Писевич Е. Ю., Чевычелов С. А., Разумов М. С.*

### СТРОИТЕЛЬСТВО

Оригинальные статьи

**Экспериментальное определение несущей способности железобетонной плиты перекрытия..... 42**

*Масалов А. В., Филатов Ю. Б.*

**Efficiency of Operation of Air Heat Pumps with Evaporators of Various Designs..... 62**

*Il'ina T. N., Orlov P. A., Echina A. O.*

**Разработка математической модели процессов уплотнения слоя дорожной одежды ..... 75**

*Пахомова Е. Г., Макая Л. В., Андрианов К. А., Зубков А. Ф., Монастырев П. В., Мордасов Д. М.*

### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Оригинальные статьи

**Алгоритм построения 3d сцен распознанных объектов по картам глубин..... 90**

*Бобырь М. В., Емельянов С. Г., Милостная Н. А.*

**Математическая модель автоматизированной системы обучения игре на фортепиано ..... 105**

*Остренко А. А., Рыжкова М. Н.*

**Повышение ресурсной эффективности распределенных архитектур систем обработки данных на основе априорных данных о поздних сроках завершения работ ..... 124**

*Клименко А. Б.*

**Фильтрация сложных сигналов на основе двухуровневой нечетко-логической модели..... 140**

*Архипов А. Е.*

**Цифровая регистрирующая вычислительная система с функцией записи измерительной информации на карту памяти формата SDHC ..... 155**

*Мартышкин А. И., Данилов Е. А.*

**К сведению авторов ..... 171**

## CONTENT

### MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original articles

**Investigation of the Microstructure and Elemental Composition of Samples Obtained by the Method of Layer-by-Layer Construction by an Electric Arc in a Protected Atmosphere .....8**

*I. Yu. Grigorov, A. N. Grechukhin, I. A. Chernyshev*

**Hot Tool Welding of Pipelines from Polyethylene for Gas Supply with a Diameter of 90-315 mm.....24**

*N. I. Ivanov<sup>1</sup>, D. A. Chevychelov, E. Yu. Pisevich, S.A. Chevychelov, M.S. Razumov*

### CONSTRUCTION

Original articles

**Experimental Determination of the Bearing Capacity of a Reinforced Concrete Floor Slab.....42**

*Masalov A. V., Filatov Y. B.*

**Эффективность работы воздушных тепловых насосов с испарителями различных конструкций .....62**

*Ильина Т. Н., Орлов П.А., Ечина А.О.*

**Development of a Mathematical Model of Compaction Processes Road Layer .....75**

*Pakhomova E G., Makaya L V., Andrianov K. A., Zubkov A. F., Monastyrev P V., Mordasov D. M.*

### COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Original articles

**Algorithm for Creating 3d Scenes of Recognized Objects from Depth Maps.....90**

*Bobyry M. V., Emelyanov S. G., Milostnaya N. A.*

**Mathematical Model of an Automated System for Learning to Play the Piano..... 105**

*Ostrenko A. A., Ryzhkova M. N.*

**Distributed Data Proceeding Systems Architectures Resource Efficiency Improvement on the Basis of Apriory Data about the Jobs Late Completion Times..... 124**

*Klimenko A. B.*

**Filtering of Complex Signals Based on a Two-Level Fuzzy-Logic Model ..... 140**

*Arkhipov A. E.*

**Digital Recording Computer System with the Function of Recording Measurement Data to SDHC Memory Card ..... 155**

*Martyshkin A. I., Danilov E A.*

**Information of the authors ..... 171**

### Исследование микроструктуры образцов, полученных методом послойного построения электрической дугой в защищённой атмосфере

И. Ю. Григоров <sup>1</sup>, А. Н. Гречухин <sup>1</sup> ✉, И.А. Чернышев <sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Региональный центр инжиниринга,  
ул. Максима Горького, д. 34, г. Курск 305000, Российская Федерация

✉ e-mail: agrechuhin@mail.ru

#### Резюме

**Цель исследования.** Статья посвящена металлографическому исследованию структуры характерных зон образцов, полученных методом послойного построения электрической дугой в среде защитного газа. Образцы для исследования микроструктуры были получены с применением лабораторного стенда, содержащего мехатронную систему с числовым программным управлением, обеспечивающую позиционирование устройства для подачи присадочного материала в виде проволоки относительно рабочего стола по трем управляемым координатным осям. Формирование образцов осуществлялось на приемную поверхность из стали 3, материал для послойного построения – легированная сталь Св-09Г2С, источник питания электрической дуги – сварочный аппарат инверторного типа Кедр MIG-160GDM, защищенная атмосфера – среда защитного газа (аргон+углекислый газ). Послойное формирование экспериментальных образцов было реализовано с применением следующих схем: в горизонтальной плоскости приемной поверхности; в вертикальной плоскости приемной поверхности. Подготовка к металлографическому исследованию осуществлялась в соответствии с ГОСТ 5639-82 «Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна», ГОСТ Р 57180-2016 «Соединения сварные. Методы определения механических свойств, макроструктуры, микроструктуры». В результате проведенных исследований выявлено наличие пустот и непроваров между соседними единичными слоями в горизонтальной плоскости; материал приемной поверхности в зоне корневого прохода и зоне термического влияния имеет структуру, характеризующую более низкими физико-механическими свойствами, а так же более низкой коррозионной стойкостью по сравнению с материалом приемной поверхности. Материал образцов, сформированных в вертикальной плоскости, имеет структуру, схожую по размеру зерен с материалом приемной поверхности, материалом построения.

**Методы.** В процессе выполнения работ были применены методы исследования микроструктуры.

**Результаты.** В результате выполнения работ по настоящему исследованию выявлено, что при формировании единичных слоев на приемной поверхности в горизонтальной плоскости имеет место образование критических дефектов – пустот и «непроваров». Зона термического влияния, зона корневого прохода содержит микроструктуру металла, обладающую более низкими по сравнению с материалом приемной поверхности, физико-механическими характеристиками и коррозионной стойкостью.

**Заключение.** При формировании изделий методом послойного построения электрической дугой в защищенной атмосфере необходимо учитывать следующие технологические особенности процесса: с целью предотвращения образования критических дефектов при послойном построении слоев в горизонтальной плоскости, необходимо установить диапазон значений коэффициента перекрытия слоев; с целью обеспечения создания однородных структур металла в зоне сплавления приемной поверхности и материала построения, а так же минимизации размеров зоны термического влияния и зоны корневого прохода, необходимо построение слоев производить с использованием приемной поверхности из материалов, максимально соответствующих по химическому составу материалу построения.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии; микроструктура; аддитивное построение.

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

**Для цитирования:** Григоров И. Ю., Гречухин А. Н., Чернышев И.А. Исследование микроструктуры образцов, полученных методом послойного построения электрической дугой в защищенной атмосфере // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(2): 8-23. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-8-23>.

Поступила в редакцию 11.04.2023

Подписана в печать 27.06.2023

Опубликована 02.08.2023

## Investigation of the Microstructure and Elemental Composition of Samples Obtained by the Method of Layer-by-Layer Construction by an Electric Arc in a Protected Atmosphere

Igor Yu. Grigorov <sup>1</sup>, Alexander N. Grechukhin <sup>1</sup> ✉, Ilya A. Chernyshev <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

<sup>2</sup> Regional Engineering Center  
34 Maxim Gorky str., Kursk 305000, Russian Federation

✉ e-mail: agrechuhin@mail.ru

### Abstract

**Purpose of research.** The article is devoted to the metallographic study of the structure, as well as the elemental composition of the characteristic zones of samples obtained by the method of layer-by-layer construction of an electric arc in a protected atmosphere. The samples for the study were obtained using a mechatronic system with numerical control, which provides positioning of the device for feeding the filler material in the form of a wire along three coordinate axes. The samples were formed on a receiving surface made of steel 3, the material for layer-by-layer construction was alloy steel Sv-09G2S, the electric arc power source was an inverter-type welding machine Cedar MIG-160GDM, the protected atmosphere was a protective gas environment. The layered formation of

experimental samples was implemented using the following schemes: in the horizontal plane; in the vertical plane. Preparation for metallographic examination was carried out in accordance with GOST 5639-82 "Steels and alloys. Methods of detection and determination of grain size", GOST R 57180-2016 "Welded joints. Methods for determining mechanical properties, macrostructure, microstructure". The elemental composition of the obtained samples was carried out by X-ray fluorescence analysis using the X-MET 5100 analyzer. As a result of the conducted studies, the presence of voids between single layers in the horizontal plane was revealed; the material of the receiving surface in the root passage zone and the zone of thermal influence have a structure with lower physical and mechanical properties, as well as lower corrosion resistance compared to the material of the receiving surface. The material of the samples formed in the vertical plane has a structure similar in grain size to the material of the receiving surface

**Methods.** In the course of the work, methods of microstructure research, as well as elemental analysis were applied

**Results.** As a result of the work performed on this study, it was revealed that during the formation of single layers on the receiving surface in the horizontal plane, the formation of critical defects - voids and "non-vapors" takes place. The zone of thermal influence, the zone of the root passage contains a metal microstructure that has lower physical and mechanical characteristics and corrosion resistance compared to the material of the receiving surface

**Conclusion.** When forming products by the method of layer-by-layer construction of an electric arc in a protected atmosphere, the following technological features of the process must be taken into account: in order to prevent the formation of critical defects during layer-by-layer construction of layers in a horizontal plane, it is necessary to establish a range of values of the overlap coefficient of layers; in order to ensure the creation of homogeneous metal structures in the fusion zone of the receiving surface and the construction material, as well as to minimize the size of the zone of thermal influence and the root passage zone, it is necessary to build layers using the receiving surface of materials that maximally correspond in chemical composition to the construction material.

---

**Keywords:** additive; technologies; protective atmosphere; microstructure.

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

**For citation:** Grigorov I. Yu., Grechukhin A. N., Chernyshev I. A. Investigation of the Microstructure and Elemental Composition of Samples Obtained by the Method of Layer-by-Layer Construction by an Electric Arc in a Protected Atmosphere. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(2): 8-23 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-8-23>.

Received 11.04.2023

Accepted 27.06.2023

Published 02.08.2023

\*\*\*

## Введение

Аддитивные технологии находят все более широкое применение в решении различных задач промышленности. В отличие от традиционных технологий изготовления методом вычитания материала из заготовки, использование аддитивных технологий позволяет выращивать объекты путем добавления слоя за слоем до получения готового изделия.

Ограниченное применение получили комплексы технологического оборудования для аддитивного построения на

базе лазерных и электронно-лучевых источников энергии, применение которых позволяет с высокой производительностью формировать геометрический профиль изделий из металлов и их сплавов [1-9].

Такие комплексы не получили широкого применения, в первую очередь, по причине высокой цены технологического оборудования. Поэтому, наряду с аддитивными технологиями на основе использования концентрированных источников энергии, все более широкое применение получают технологии, ис-

пользующие электрическую, либо плазменную дуги – такие источники энергии являются наиболее дешевыми в применении, а в сочетании с мехатронной системой с числовым программным управлением, позволяют производить послойное построение изделий из проволоки металлов и их сплавов с высокой производительностью. Такой способ аддитивного построения реализуют в защищенной атмосфере, к примеру в вакуумной камере, либо в среде защитного газа [10-15].

Однако не достаточно изученными остаются вопросы формирования внутренней структуры изделий из металлов и их сплавов, изготовленных способом аддитивного формообразования электрической дугой в защищенной атмосфере. Для установления закономерностей формирования внутренней структуры изделий из сталей были проведены настоящие исследования [15-20].

### Материалы и методы

Целью исследования является металлографическое исследование структуры образцов, полученных способом аддитивного формообразования электрической дугой в среде защитного газа.

Для изготовления экспериментальных образцов был разработан и построен лабораторный стенд, реализующий способ аддитивного построения объектов электрической дугой. В состав стенда входила мехатронная система с числовым программным управлением,

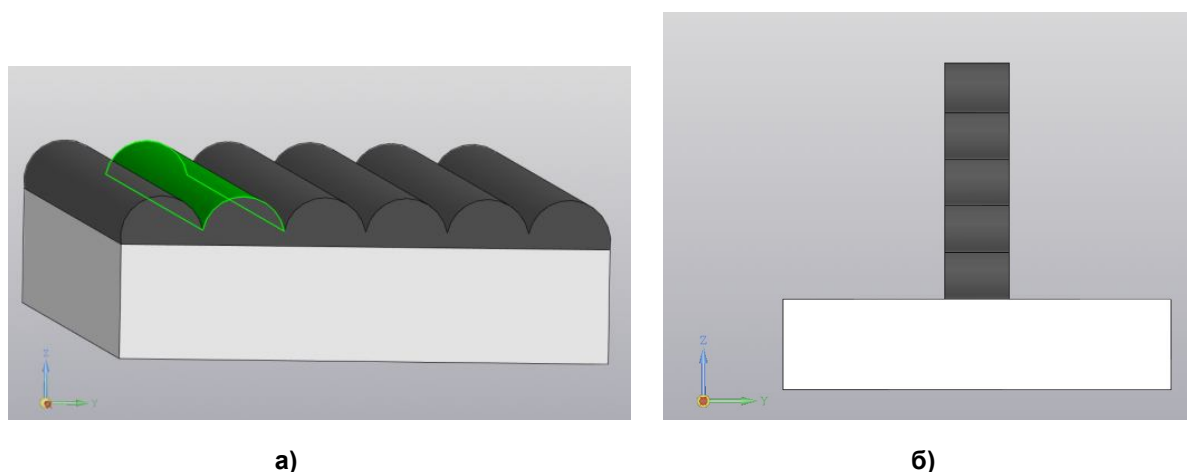
реализующая перемещение устройства построения относительно рабочего стола по 3 управляемым координатным осям. Подача материала построения в виде проволоки осуществлялась посредством разработанного механизма подачи, включающего прижимные ролики и шаговый двигатель. Подача защитного газа производилась посредством электромагнитного клапана. Управление мехатронной системой, механизмом подачи материала построения, клапаном подачи защитного газа реализовано с помощью специализированного программного обеспечения.

Формирование образцов для проведения металлографического исследования и структурного анализа производилось путем послойного наплавления проволоки из стали Св. 09Г2С на приемную поверхность из стали 3. Слои наплавливались в горизонтальной и в вертикальной плоскостях. В горизонтальной плоскости слои наплавливались с коэффициентом перекрытия 0,3. В качестве источника энергии электрической дуги был применен сварочный полуавтомат инверторного типа модели Кедр MIG-160GDM. Схема формирования слоев представлена на рис. 1.

Исходные данные для построения образцов для металлографического исследования представлены в табл. 1.

Внешний вид лабораторного стенда представлен на рис. 2.

Внешний вид полученных образцов показан на рис. 3.



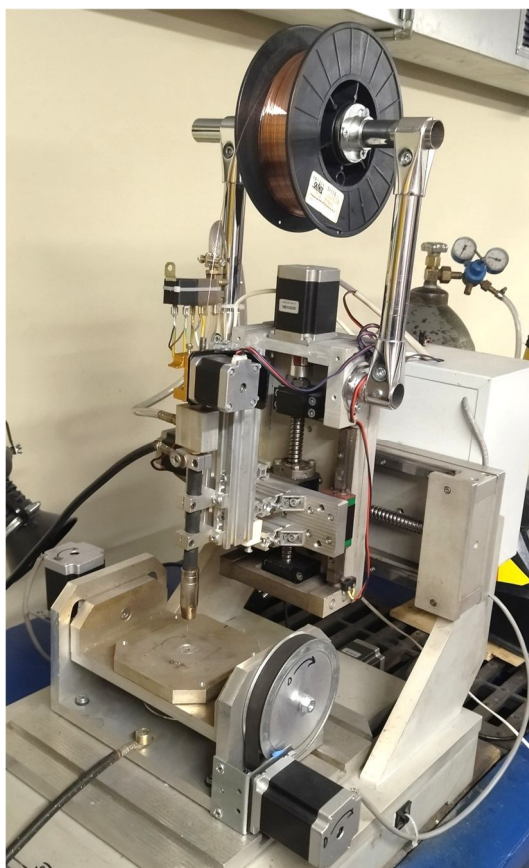
**Рис. 1.** Схема формирования слоев образцов: **а** – в горизонтальной плоскости;  
**б** – в вертикальной плоскости

**Fig. 1.** The scheme of formation of layers: **a** – in the horizontal plane; **b** – in the vertical plane

**Таблица 1.** Исходные данные для построения слоев

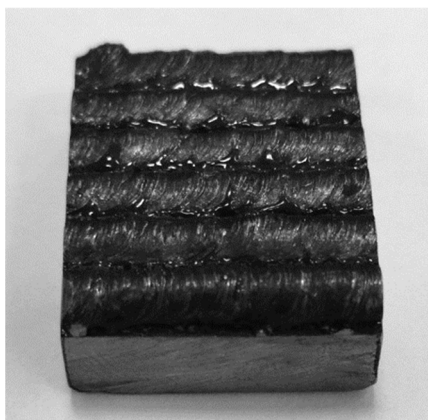
**Table 1.** Source data for building layers

| № образца / Sample No. | Плоскость построения / Construction plane | Материал приемной поверхности /Receiving surface material | Материал построения /Construction material | Количество слоёв /Number of layers | Коэффициент перекрытия слоев /Layer overlap coefficient | Давление подачи газа, Мпа /Gas supply pressure | Скорость перемещения сварочной горелки, мм/мин /The speed of movement of the welding torch, | Скорость подачи проволоки, мм/мин / Feed rate | Напряжение на холостого хода, V / Idle voltage |
|------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 1                      | Горизонтальная                            | Сталь 3                                                   | Сталь Св. 09Г2С                            | 6                                  | 3                                                       | 14                                             | 200                                                                                         | 3000                                          | 19,5                                           |
| 2                      | Вертикальная                              | Сталь 3                                                   | Сталь Св. 09Г2С                            | 6                                  | -                                                       | 14                                             | 200                                                                                         | 3000                                          | 19,5                                           |

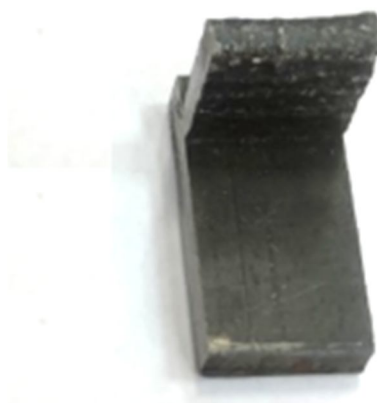


**Рис. 2.** Лабораторный стенд

**Fig. 2.** Laboratory stand



**а)**



**б)**

**Рис. 3.** Экспериментальные образцы, образованные путем наплавления слоев: **а** – образец 1, **б** – образец 2

**Fig. 3.** Experimental samples formed by melting layers: **а** – sample 1; **б** – sample 2

Для проведения металлографического исследования и были выполнены срезы наплавленных слоев в направлении, перпендикулярном к их оси. Подготовлены шлифы одноименных сечений. Травление производилось химически в 4%-ном растворе азотной кислоты  $\text{HNO}_3$  в спирте.

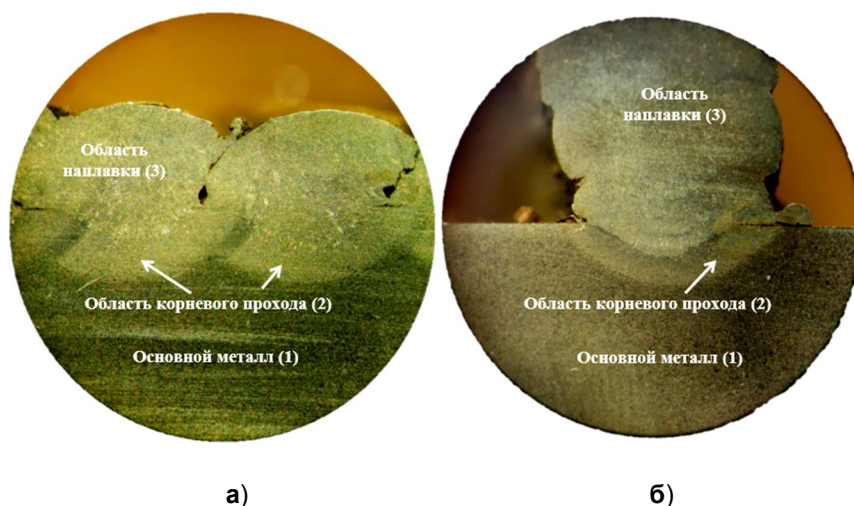
Исследование микроструктуры проводилось на световом металлографическом микроскопе 4XC-NXV.

Оценка микроструктуры производилась по ГОСТ 5639 «Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна» и ГОСТ Р 57180-2016 «Соединения сварные. Методы определения механических свойств, макроструктуры и микроструктуры».

### Результаты и их обсуждение

В результате проведенного металлографического исследования были вы-

явлены следующие результаты: на поверхности шлифов как образца 1, так и образца 2 наблюдаются три четко различимые зоны: зона материала приемной поверхности, зона корневого прохода, зона послойного построения, фото образцов представлены на рис. 4. У образца 2 не наблюдается нарушения целостности между единичными слоями, в то же время образец 1 имеет ярко выраженные зоны несплавления, преимущественно в стыках между соседними слоями, геометрические размеры дефектов не превышают до 1 мм в длину и до 0,5 мм в ширину. На образце 2 аналогичный дефект выражен в меньшей степени, пустоты между слоями построения расположены только по обеим сторонам, так же наблюдается существенное различие в ширине слоев построения по мере заполнения слоев от первого слоя к шестому.



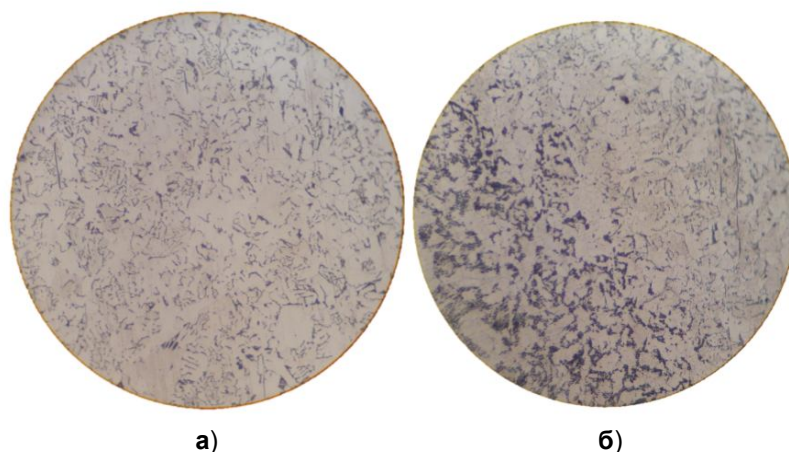
**Рис. 4.** Микроструктура образцов (увеличение x40): **а** – образец 1; **б** – образец 2

**Fig. 4.** Microstructure of samples (magnification x40): **a** – sample 1; **b** – sample 2

На рисунках 4 – 9 представлены микрофотографии исследуемых образцов. Структура металла подложки образцов 1, 2 состоит из светлых зерен феррита с распределенным по краям зерен пластинчатым перлитом, объемная доля которого в основном металле не превышает

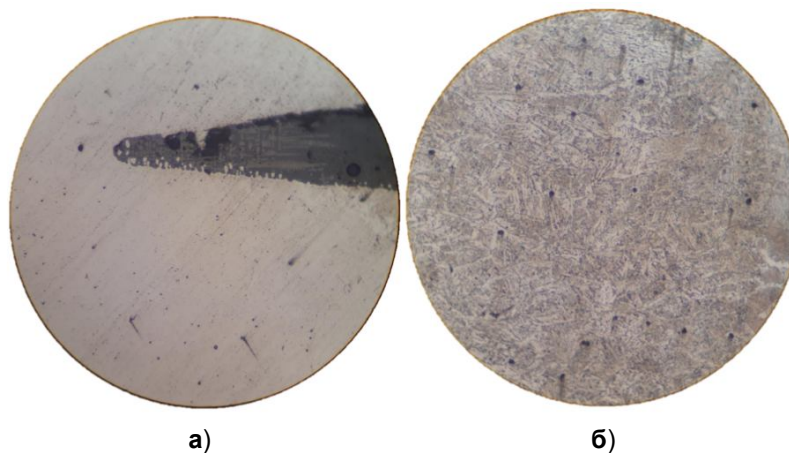
10% – рис. 5 *а*. В области перехода металла приемной поверхности в зону термического влияния зерна феррита имеют вытянутую форму рис. 5 *б*.

В области корневого прохода образцов 1, 2 наблюдается выделение сферических частиц (карбидов) (рис. 6 *а, б*).



**Рис. 5.** Структура металла приемной поверхности (увеличение x400)

**Fig. 5.** Metal structure of the receiving surface (magnification x400)

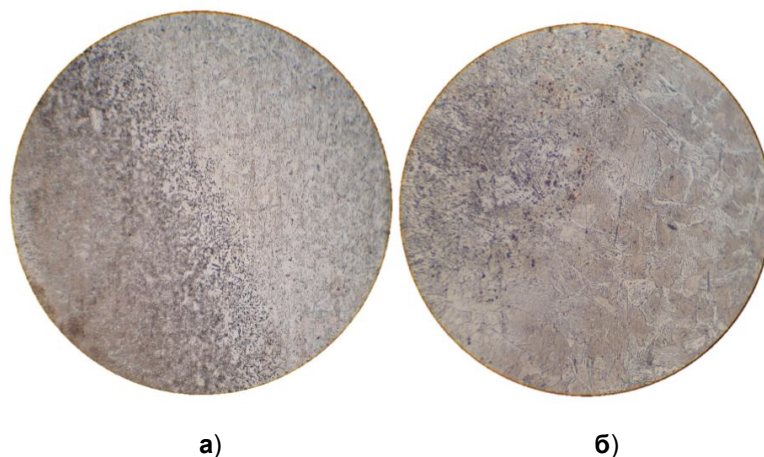


**Рис. 6.** Зона корневого прохода: *а* – увеличение x400; *б* – увеличение x100

**Fig. 6.** Root passage zone: *а* – x400 magnification; *б* – x100 magnification

Переход от материала приемной поверхности к зоне термического влияния имеет четкие границы. Для образцов 1, 2 в зоне термического влияния наблюдается выделение бейнита в ферритной матрице (рис. 7, *а*). В направлении удаления

от металла подложки бейнит располагается в пределах опоясанных ферритной сеткой зерен (рис. 7 *б*). В зоне термического влияния выделения сферических частиц не наблюдается.

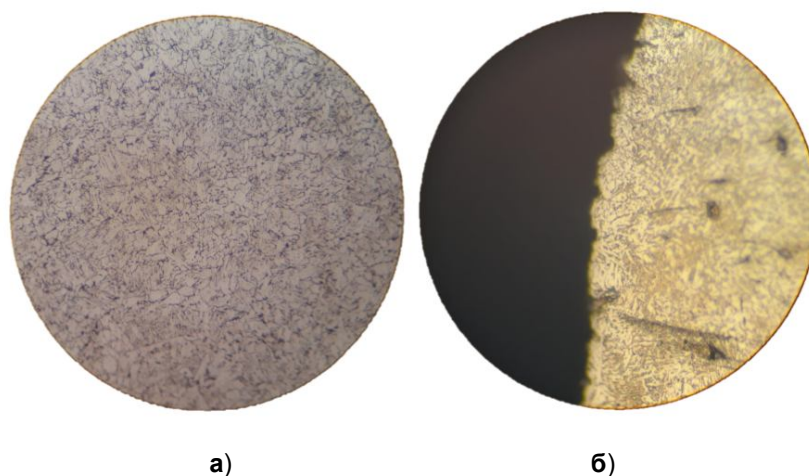


**Рис. 7.** Микроструктура зоны термического влияния образцов 1, 2 (увеличение  $\times 400$ )

**Fig. 7.** Microstructure of the zone of thermal influence of samples 1, 2 (magnification  $\times 400$ )

Область построения имеет микроструктуру с высоким объемным содержанием Видманштеттовой структуры, отсутствием сферических выделений, при удалении от зоны корневого прохода в микроструктуре наблюдается проявление равноосных ферритных зерен (рис. 8 а). В образце 1 ближе к краю

нанесения слоев наблюдаются области, состоящие из ферритных зерен (рис. 8 б), а в образце 2 области, расположенные на расстоянии свыше 8 мм от области корневого прохода, имеют структуру, аналогичную структуре металла приемной поверхности (рис. 9 а).

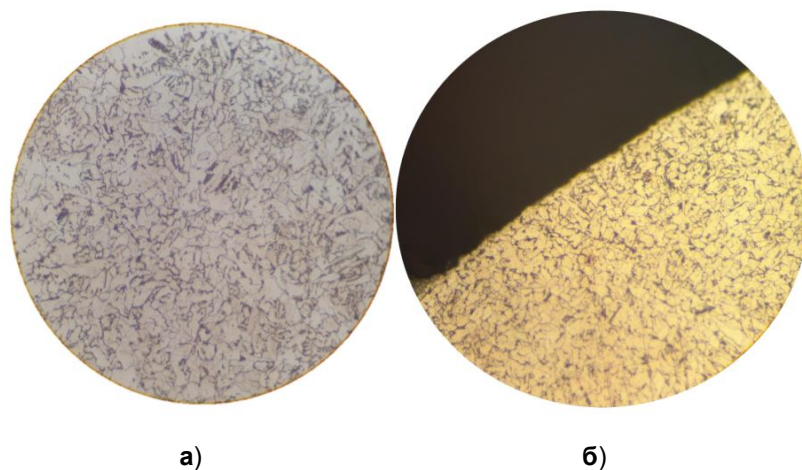


**Рис. 8.** Микроструктура области построения (увеличение  $\times 400$ )

**Fig. 8.** Microstructure of the construction area (magnification  $\times 400$ )

По краям металла приемной поверхности и слоев построения не наблюдается явных признаков межкристаллитной

коррозии, кроме слабого выкрашивания на глубину менее 3 мкм в отдельных областях.



**Рис. 9.** Микроструктура образцов (увеличение  $\times 400$ ): **а** – материал построения в удалении от области корневого прохода: **б** – материал построения на краю шлифа

**Fig. 9.** Microstructure of samples (magnification  $\times 400$ ): **a** – the construction material at a distance from the root passage area: **b** – the construction material at the edge of the slot

Области у края однородны и не отличаются микроструктурой от соответствующих им областей в центральных частях шлифа (рис. 9 б).

### Выводы

В результате проведенного металлографического исследования образцов, полученных в результате электродугового послойного построения в среде защитного газа, были выявлены следующие особенности:

- образцы единичных слоев, построение которых производилось в горизонтальной плоскости, имеют пустоты вдоль границ соседних слоев. Появление дефектов такого рода является следствием не верно заданного коэффициента перекрытия, поэтому, с целью предотвращения образования критических дефектов при послойном построении слоев в горизонтальной плоскости способом электродугового послойного построения в среде защитного газа,

необходимо установить диапазон значений коэффициента перекрытия слоев, при соблюдении которого, образование дефектов в виде пустот будет минимальным;

- зона на приемной поверхности, зона термического влияния, а так же зона корневого прохода, содержат в значительном количестве Видманштеттову структуру, что может способствовать снижению физико-механических свойств, снижению коррозионной стойкости в обозначенных выше областях. Поэтому необходимо построение слоев необходимо производить с использованием приемной поверхности из материалов, максимально соответствующих по химическому составу материалу построения;

- при анализе образцов с построением слоев в вертикальной плоскости установлено, что металл в зоне послойного построения имеет структуру, однородную структуре металла приемной поверхности, схожую по размерам зерен

и распределению феррита со структурой материала построения, поэтому применение режимов формирования слоев, реализованных для изготовления лаборатор-

ных образцов способом электродугового послойного построения, является рациональным, обеспечивающим рациональный температурный режим процесса.

### Список литературы

1. Проектирование технологического оборудования для аддитивного формообразования с гибридной компоновкой / А.Н. Гречухин, В.В. Куц, А.В. Олешицкий, Ю.Э. Симонова // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 4.
2. Расширение технологических возможностей методов аддитивного формообразования с применением механизмов параллельно-последовательной структуры / А.Н. Гречухин, В.В. Куц, А.В. Олешицкий, М.С. Разумов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(6): 34-44. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-34-44>.
3. Механизмы управления погрешностью аддитивного формообразования с применением устройств с гибридной компоновкой / А.Н. Гречухин, В.В. Куц, А.В. Олешицкий, М.С. Разумов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(5): 23-34. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-23-34>.
4. Исследование геометрической точности устройства для аддитивного формообразования / В.В. Куц, А.В. Олешицкий, П.А. Гаркавцева, А.Н. Гречухин // Современные материалы, техника и технология. сборник научных статей 10-й Международной научно-практической конференции. Курск, 2020. С. 206-211.
5. Применение аддитивных методов формообразования как инструмент повышения качества изделий / А.Н. Гречухин, В.В. Куц, А.В. Олешицкий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 12. С. 46-48.
6. Гречухин А.Н., Куц В.В., Олешицкий А.В. Повышение качества аддитивных методов формообразования с применением механизмов последовательной структуры // Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении: сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции. Тула, 2019. С. 147-150.
7. Гречухин А.Н., Куц В.В., Олешицкий А.В. Теоретическое исследование влияния геометрической точности узлов технологического оборудования с гибридной компоновкой на погрешность аддитивного формообразования // Вестник Брянского государственного технического университета. 2019. № 12 (85). С. 42-49.
8. Влияние частоты тока при импульсной послойной плазменной наплавке на структуру и свойства высоколегированной стали при аддитивном формировании изделий / Ю.Д. Щицын, Т.В. Ольшанская, С.Д. Неулыбин, Р.Г. Никулин, А.Ю. Душина // СТИН. 2021. № 6. С. 10-12.

9. Металлургические особенности ремонтной плазменной наплавки магниевых сплавов / Р.Г. Никулин, Ю.Д. Щицын, Е.А. Кривоносова, Д.С. Загребин, Т. Хассель // *Металлург*. 2021. № 12. С. 47-54.

10. Использование плазменной наплавки для аддитивного формирования заготовок из титановых сплавов / Ю.Д. Щицын, Е.А. Кривоносова, Т.В. Ольшанская, С.Д. Неулыбин // *Технология металлов*. 2021. № 2. С. 46-54.

11. О влиянии схем плазменной наплавки на формирование структуры и свойств титанового сплава / С.Н. Акулова, А.В. Мышкина, С.В. Варушкин, С.Д. Неулыбин, Е.А. Кривоносова, Ю.Д. Щицын, Т.В. Ольшанская // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2021. Т. 23. № 3. С. 75-83.

12. Влияние углекислого газа на тепловую эффективность плазменной поверхностной термической обработки двухкамерным плазмотроном / А.В. Казанцев, Ю.Д. Щицын, Д.С. Белинин, Р.Г. Никулин, С.Г. Никулина // *Химия. Экология. Урбанистика*. 2020. Т. 1. С. 434-438.

13. Токарев А.С., Ризванов Р.Г., Каретников Д.В. Исследование микроструктуры и механических свойств сварных соединений из коррозионностойкой стали марки 10х17н13м2т полученных ротационной сваркой трением // *Нефтегазовое дело*. 2022. Т. 20. № 4. С. 163-172.

14. Передовые технологии аддитивного производства металлических изделий / А. А. Осколков и др. // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2018. Т. 20. № 3. С. 90-105.

15. Сравнительный анализ структуры и механических свойств аддитивных изделий, полученных электронно-лучевым методом и холодным переносом металла / А. А. Елисеев и др. // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2020. № 4. С. 65-73.

16. Metallurgical processes during plasma remelting of a metallized coating of the Fe–C–Cr–Ti–Al system / S. D. Neulybin et al. // *Metallurgist*. 2017. Vol. 60. № 11. P. 1202-1206.

17. Коротеев А. О., Долячко В. П., Куликов В. П. Аддитивная технология создания объемных металлических изделий на основе дуговой сварки с импульсной реверсивной подачей присадочного материала // *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2019. № 4 (65). С. 15-25

18. Коротеев А. О. Особенности формирования микроструктуры при аддитивной дуговой наплавке материалов системы легирования Al–Si // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы международной научно-технической конференции*. Могилев, 2022. С. 182.

19. Аддитивно-субтрактивные технологии – эффективный переход к инновационному производству / А. В. Киричек и др. // Вестник Брянского государственного технического университета. 2019. № 8 (81). С. 4-10

20. Способ управления процессом трехмерной наплавки / Д. Н. Трушников, М. Ф. Карташев, Р. П. Давлятшин, С. З. Ф. Раймундо // СТИН. 2022. № 8. С. 29-31

## References

1. Grechukhin A.N., Kutz V.V., Oleshitsky A.V., Simonova Yu.E. Proektirovanie tekhnologicheskogo oborudovaniya dlya additivnogo formoobrazovaniya s gibridnoi komponovkoi [Design of technological equipment for additive shaping with hybrid layout]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2019, vol. 15, no. 4.

2. Grechukhin A. N., Kuts V. V., Oleshitsky A. V., Razumov M. S. Technological Capabilities Extension of Additive Forming Methods Using Parallel-Serial Structures. *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>.

3. Grechukhin A. N., Kuts V. V., Oleshitsky A. V., Razumov M. S. Control Mechanisms of Additive Shaping Error with the Use of Hybrid Design Devices. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(5): 23-34 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-23-34>.

4. Kutz V.V., Oleshitsky A.V., Garkavtseva P.A., Grechukhin A.N. [Investigation of the geometric accuracy of the device for additive shaping]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologiya. Sbornik nauchnykh statei 10-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Modern materials, technique and technology. Collection of scientific articles of the 10th International Scientific and Practical Conference]. Kursk, 2020. pp. 206-211 (In Russ.).

5. Grechukhin A.N., Kutz V.V., Oleshitsky A.V. Primenenie additivnykh metodov formoobrazovaniya kak instrument povysheniya kachestva izdelii [Application of additive shaping methods as a tool for improving the quality of products]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* = *Proceedings of Tula State University. Technical Sciences*, 2019, no. 12, pp. 46-48.

6. Grechukhin A.N., Kutz V.V., Oleshitsky A.V. [Improving the quality of additive shaping methods using sequential structure mechanisms]. *Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Otechestvennyi i zarubezhnyi opyt obespecheniya kachestva v mashinostroenii". Sbornik dokladov*. [All-Russian Scientific and Technical Conference "Domestic and foreign experience in quality assurance in mechanical engineering". Collection of reports]. Tula, 2019, pp. 147-150 (In Russ.).

7. Grechukhin A.N., Kutz V.V., Oleshitsky A.V. Teoreticheskoe issledovanie vliyaniya geometricheskoi tochnosti uzlov tekhnologicheskogo oborudovaniya s gibridnoi komponovkoi na pogreshnost' additivnogo formoobrazovaniya [Theoretical study of the influence of geometric accuracy of technological equipment units with hybrid layout on the error of additive shaping]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Bulletin of the Bryansk State Technical University*, 2019, no. 12 (85), pp. 42-49.

8. Shchitsyn Yu.D., Olshanskaya T.V., Neulybin S.D., Nikulin R.G., Dushina A.Yu. Vliyanie chastoty toka pri impul'snoi posloinoi plazmennoi naplavke na strukturu i svoistva vysokolegirovannoi stali pri additivnom formirovanii izdelii [Influence of the current frequency during pulsed layered plasma surfacing on the structure and properties of high-alloy steel in the additive formation of products]. *STIN*, 2021, no. 6, pp. 10-12.

9. Nikulin R.G., Shchitsyn Yu.D., Krivonosova E.A., Zagrebin D.S., Hassel T. Metallurgicheskie osobennosti remontnoi plazmennoi naplavki magnievykh splavov [Metallurgical features of repair plasma surfacing of magnesium alloys]. *Metallurg* = *Metallurgist*, 2021, no. 12, pp. 47-54.

10. Shchitsyn Yu.D., Krivonosova E.A., Olshanskaya T.V., Neulybin S.D. Ispol'zovanie plazmennoi naplavki dlya additivnogo formirovaniya zagotovok iz titanovykh splavov [Use of plasma surfacing for additive formation of billets from titanium alloys]. *Tekhnologiya metallov* = *Technology of Metals*, 2021, no. 2, pp. 46-54.

11. Akulova S.N., Myshkina A.V., Varushkin S.V., Neulybin S.D., Krivonosova E.A., Shchitsyn Yu.D., Olshanskaya T.V. O vliyanii skhem plazmennoi naplavki na formirovanie struktury i svoistv titanovogo splava [On the influence of plasma surfacing schemes on the formation of the structure and properties of titanium alloy]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie* = *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical Engineering, Materials Science*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 75-83.

12. Kazantsev A.V., Shchitsyn Yu.D., Belinin D.S., Nikulin R.G., Nikulina S.G. Vliyanie uglekislogo gaza na teplovuyu effektivnost' plazmennoi poverkhnostnoi termicheskoi obrabotki dvukhkamernym plazmotronom [The effect of carbon dioxide on the thermal efficiency of plasma surface heat treatment with a two-chamber plasma torch]. *Khimiya. Ekologiya. Urbanistika* = *Chemistry. Ecology. Urbanistics*, 2020, vol. 1, pp. 434-438.

13. Tokarev A.S., Rizvanov R.G., Karetnikov D.V. Issledovanie mикроструктуры i mekhanicheskikh svoistv svarnykh soedinenii iz korrozionnostoikoi stali marki 10kh17n13m2t poluchennykh rotatsionnoi svarkoi treniem [Investigation of microstructure and mechanical properties of welded joints made of corrosion-resistant steel grade 10x17n13m2t obtained by

rotary friction welding]. *Neftegazovoe delo = Oil and Gas Business*. 2022, vol. 20, no. 4, pp. 163-172.

14. Oskolkov A. A. et al. *Peredovye tekhnologii additivnogo proizvodstva metallicheskikh izdelii* [Advanced technologies of additive manufacturing of metal publications]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie = Bulletin of Perm Polytechnic University. Machines, materials*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 90-105.

15. Eliseev A. A. et al. *Sravnitel'nyi analiz struktury i mekhanicheskikh svoystv additivnykh izdelii, poluchennykh elektronno-luchevym metodom i kholodnym perenosom metalla* [Comparative analysis of structures and mechanical properties of additive materials obtained by electron beam method and empty advanced metal]. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya = Izvestiya Vuzova. Non-ferrous Metallurgy*, 2020, no. 4, pp. 65-73.

16. Neulybin S. D. et al. *Metallurgical processes during plasma remelting of a metallized coating of the Fe-C-Cr-Ti-Al system*. *Metallurgist*, 2017, vol. 60, no. 11, pp. 1202-1206.

17. Koroteev A. O., Dolyachko V. P., Kulikov V. P. *Additivnaya tekhnologiya sozdaniya ob'emnykh metallicheskh izdelii na osnove dugovoi svarki s impul'snoi reversivnoi podachei prisadochnogo materiala* [Additive technology for creating bulk metal products based on arc welding with pulsed reversible feeding of filler material]. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta = Bulletin of the Belarusian-Russian University*, 2019, no. 4 (65), pp. 15-25.

18. Coroteev A. O. [Features of the formation of microstructures during additive arc surfacing of materials of the Al-Si alloying system]. *Materialy, oborudovanie i resursosberegayushchie tekhnologii. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Materials, arrangement and resource-saving technologies. Materials of intergovernmental Science-Technical conference]. Mogilev, 2022, pp. 182 (In Russ.).

19. Kirichek A. S. et al. *Additivno-subtraktivnye tekhnologii-effektivnyi perekhod k innovatsionnomu proizvodstvu* [Additivno-subtractive technologies-an effective transition to an innovative product]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Bryansk State Medical University*, 2019, no. 8 (81), pp. 4-10.

20. Trushnikov D. N., Kartashev M. F., Davlatshin R. P., Raimundo S. Z. F. *Sposob upravleniya protsessom trekhmernoi naplavki* [List of three-dimensional keyboard process control]. *STIN*, 2022, no. 8, pp. 29-31.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Григоров Игорь Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: grigorov.ighor@mail.ru

**Igor Yu. Grigorov**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Mechanical Engineering Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: grigorov.ighor@mail.ru

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

**Alexander N. Grechukhin**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Machine-Building Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: agrechuhin@mail.ru

**Чернышев Илья Андреевич**, руководитель Регионального центра инжиниринга, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: rci46@mail.ru

**Ilya A. Chernyshev**, Head, Regional Engineering Center, Kursk, Russian Federation, e-mail: rci46@mail.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-24-41>

## Сварка нагретым инструментом трубопроводов из полиэтилена для газоснабжения диаметром 90-315 мм

Н. И. Иванов<sup>1</sup>, Д. А. Чевычелов<sup>1</sup>, Е. Ю. Писевич<sup>1</sup>,  
С. А. Чевычелов<sup>1</sup> ✉, М. С. Разумов<sup>1</sup>

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

✉ e-mail: tschsa@yandex.ru

### Резюме

**Цель исследования.** Применяемый в Российской Федерации ГОСТ Р 55276-2012 не регламентирует конкретных данных по выбору той или иной процедуры при различных условиях сварки и типоразмеров применяемых труб, оставляя это на усмотрение потребителя. В отличие от процедуры сварки при единственно низком давлении, хорошо отработанной и широко применяемой в отечественной практике, сварка по процедуре при единственном высоком давлении, позволяющая в три раза сократить время сварочного цикла, практически не используется и специально предназначенные сварочные машины в России не выпускаются. В связи с этим данная работа посвящена разработке режимов сварки нагретым инструментом стыковых соединений труб из полиэтилена диаметром от 90 до 315 мм для SDR 13,6 - SDR 9,0 при единственном высоком давлении, выбору возможного отечественного сварочного оборудования и экспериментальной проверке разработанных режимов.

**Методы.** В данной статье для стыковой сварки нагретым инструментом труб из полиэтилена диаметром от 90 до 315 мм, используя расчетную методику, определены основные параметры сварочной процедуры при единственном высоком давлении. При выборе сварочной машины, необходимой для сварки труб рассматриваемого диапазона по сварочной процедуре при единственном высоком давлении, по результатам проведенного анализа технических характеристик отечественных сварочных машин и особенностей их эксплуатационных возможностей, предпочтение отдано сварочной машине с гидравлическим приводом «Волжанин ССПТ-315». Для экспериментальной проверки выполненных расчетов параметров процедуры сварки по циклограмме при единственном высоком давлении было сварено четыре стыка труб диаметром 110 мм с толщиной стенки 10 мм из ПЭ-100 (SDR 11,0) и произведен визуально-измерительный контроль качества выполненных соединений и кратковременные испытания технологических образцов на осевое растяжение на машине Р-50.

**Результаты.** Механические испытания технологических образцов всех стыков труб из ПЭ-100 диаметром 110 мм (SDR 11,0), выполненных на сварочной машине ССПТ-315 по сварочной процедуре при единственном высоком давлении, показали 100 %-ный результат пластичного характера разрушения при величине удлинения от 500 до 600 %.

**Заключение.** Высокое качество экспериментальных стыков труб из ПЭ-100 предполагает возможность использования машины ССПТ-315 для сварки нагретым инструментом труб из полиэтилена всего регламентированного техническими характеристиками диапазона по сварочной процедуре при единственном высоком давлении.

**Ключевые слова:** сварка; полиэтиленовые трубопроводы; нормативные документы; процедуры сварки стык; параметры сварки; сварочное оборудование; качество сварки.

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

**Для цитирования:** Сварка нагретым инструментом трубопроводов из полиэтилена для газоснабжения диаметром 90-315 мм / Н. И. Иванов, Д. А. Чевычелов, Е. Ю. Писевич, С. А. Чевычелов, М. С. Разумов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(2): 24-41. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-24-41>.

Поступила в редакцию 12.05.2023

Подписана в печать 29.06.2023

Опубликована 02.08.2023

## Hot Tool Welding of Pipelines from Polyethylene for Gas Supply with a Diameter of 90-315 mm

Nikolay N.I. Ivanov<sup>1</sup>, Dmitry A. Chevychelov<sup>1</sup>, Evgeny Yu. Pisevich<sup>1</sup>,  
Sergey A. Chevychelov<sup>1</sup> ✉, Mikhail S. Razumov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University

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

✉ e-mail: tschsa@yandex.ru

### Abstract

**Purpose of research.** GOST P 55276-2012 applied in the Russian Federation does not regulate concrete data on the choice of this or that procedure under various conditions of welding and standard sizes of the applied pipes, leaving it to the discretion of the consumer. Unlike the procedure of the welding with only low pressure which is well fulfilled and widely applied in domestic practice, the welding according to the procedure with the only high pressure allowing to reduce three times time of a welding cycle is practically not used and specially intended welding machines in Russia are not issued. In this regard this work is devoted to development of the modes of hot tool welding of abutting connections of pipes from polyethylene with a diameter from 90 to 315 mm for SDR 13.6 - SDR 9.0 with the only high pressure, to the choice of possible domestic welding equipment and experimental check of the developed modes.

**Methods.** In this article for butt welding by the heated tool of pipes from polyethylene with a diameter from 90 to 315 mm, using a design technique, main parameters of welding procedure are determined with the only high pressure.

When choosing the welding machine necessary for tube welding of the considered range on welding procedure with the only high pressure, by results of the carried-out analysis of technical datas of domestic welding machines and features of their operation capabilities it is preferred as the welding machine with the hydraulic drive "Native of the Volga Region of SSPT-315".

For experimental check of the executed payment of parameters of the procedure of welding under the cyclogram with the only high pressure four joints of pipes with a diameter of 110 mm with thickness of a wall of 10 mm from PE-100 (SDR 11.0) have been welded and visual and measuring quality control of the executed connections and short-term tests of technological samples on axial stretching by the R-50 machine is made.

**Results.** Mechanical tests of technological samples of all joints of the pipes from PE-100 with a diameter of 110 mm (SDR 11.0) executed on the SSPT-315 welding machine on welding procedure with the only high pressure have shown 100% - ny result of plastic nature of destruction at the size of lengthening from 500 to 600%.

**Conclusion.** The high quality of experimental joints of pipes from PE-100 assumes a possibility of use of the SSPT-315 machine for hot tool welding of pipes from polyethylene of everything of the range regulated by technical datas on welding procedure with the only high pressure.

**Keywords:** welding; polyethylene pipelines; normative documents; procedures of welding end-to-end; welding parameters; welding equipment; weld quality.

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

**For citation:** Ivanov N.I., Chevychelov D.A., Pisevich E. Yu., Chevychelov S.A., Razumov M.S. Hot Tool Welding of Pipelines from Polyethylene for Gas Supply with a diameter of 90-315 mm. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(2): 24-41 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-24-41>.

Received 12.05.2023

Accepted 29.06.2023

Published 02.08.2023

\*\*\*

## Введение

В мировой практике строительства трубопроводных систем газоснабжения из полимерных материалов наиболее важным методом соединения полиэтиленовых (ПЭ) труб является сварка нагретым инструментом (НИ) встык [1-4]. Широкая сфера практического применения стыковой сварки НИ труб из ПЭ обусловлена целым рядом технических и экономических преимуществ перед другими конкурирующими методами сварки, к которым следует отнести технологичность контактной сварки встык, надежность стыковых соединений труб между собой и с различными соединительными деталями, экономию трудовых, финансовых и временных затрат, а также соответствие современным экологическим требованиям [5-8].

Стыковые соединения труб из ПЭ (рис. 1) играют исключительно важную роль в обеспечении надежности полимерных трубопроводов, поэтому следует отметить, что при выполнении любого стыкового соединения, независимо от диаметрального размера используемых труб и стандартного размерного отношения диаметра к толщине стенки SDR, соблюдение различных требова-

ний нормативных документов является обязательным [9-10].

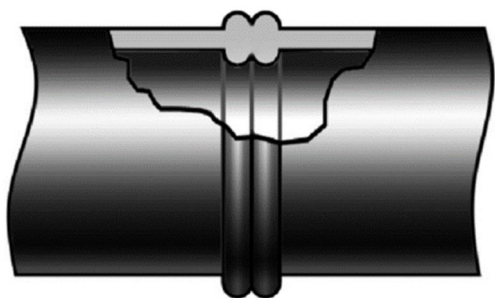
Наружные газопроводы выполняются в соответствии с требованиями нормативного документа СП 62.13330.2011. Они относятся к напорным трубопроводным системам из ПЭ. Наиболее распространенными являются относительно простые газопроводы распределительных сетей, обеспечивающие доставку газа к потребителям непосредственно от газораспределительных станций, для строительства которых требуются ПЭ трубы относительно небольших диаметров.

Пытаясь уменьшить неопределенность, существовавшую ранее при разработке технологических процессов сварки НИ труб из ПЭ, международная стандартизирующая организация (ISO) составила стандарт ISO 21307<sup>1</sup>, содержащий три процедуры сварки ПЭ газопроводов и водопроводов с варьируемыми основными параметрами сварочного процесса. На основе аутентичного перевода ISO 21307 создан Российский

---

<sup>1</sup> ISO 21307:2011. Plastics pipes and fittings – Butt fusion jointing procedures for polyethylene (PE) pipes and fittings used in the construction of gas and water distribution systems (MOD).

ГОСТ Р ИСО 55276-2012<sup>1</sup>. В Российской практике стыковой сварки полимерных труб из ПЭ ГОСТ Р ИСО 55276-2012 стал успешной попыткой устранить различия в технологии сварки. Теперь технологи могут использовать его для устранения необоснованных технических решений, которые появились в нормативной технической документации в последние десятилетия. Многовариантность решений, предлагаемых ГОСТ Р ИСО 55276-2012, создает квалифицированным специалистам просторное поле для маневра при составлении спецификаций на процесс сварки [1].



**Рис. 1.** Стыковое сварное соединение труб из ПЭ систем газоснабжения

**Fig. 1.** An abutting weld joint of pipes from PE of systems of gas supply

ГОСТ Р 55276-2012, так же, как и ISO 21307, регламентирует три процедуры стыковой сварки НН труб из ПЭ, а именно – «при единственном низком давлении», «при двойном низком дав-

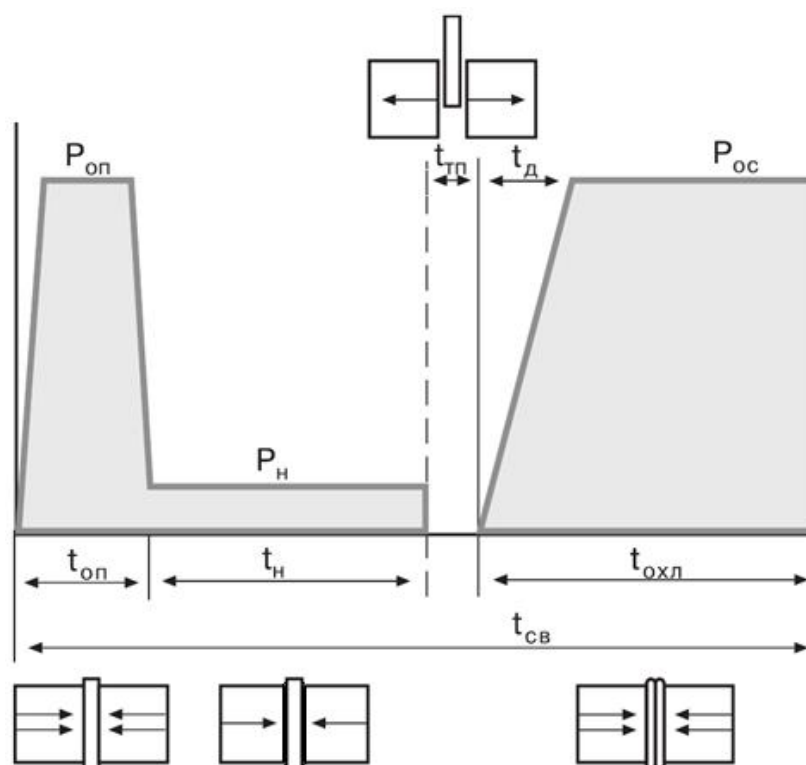
лении» и «при единственном высоком давлении». В данном случае речь идет о давлении, действующем в плоскости сварки стыковых соединений в момент оплавления торцов, их осадки и охлаждения. На рис. 2 изображена зависимость нормативного давления  $P$  в плоскости сварки от времени  $t$  для процедур сварки при единственном низком давлении (традиционная процедура для Германии и России) и при единственном высоком давлении (традиционно применяется в США, в частности фирмой McElroy).

Процедура сварки при двойном низком давлении не нашла распространения в практике ввиду ограниченного существующего сварочного оборудования для его использования и несовершенства самой технологии [9].

Применяемый в Российской Федерации ГОСТ Р 55276-2012 не регламентирует конкретных данных по выбору той или иной процедуры при различных условиях сварки и типоразмеров применяемых труб, оставляя это на усмотрение потребителя.

Отличием процедур сварки при единственном низком давлении и при единственном высоком давлении (при идентичности циклограмм процессов, рис. 2) является увеличение при единственном высоком давлении давления  $P_{on}$  и  $P_{oc}$  примерно в три раза и уменьшение времени  $t_{охл}$  и, соответственно, чистого времени процесса  $t_{св}$  не менее, чем в три раза.

<sup>1</sup> ГОСТ Р 55276-2012(ISO 21307-2011). Трубы и фитинги пластмассовые. Процедуры сварки нагретым инструментом встык полиэтиленовых (ПЭ) труб и фитингов, используемых для строительства газо- и водопроводных распределительных систем. М.: Стандартинформ, 2013. 31 с.



**Рис. 2.** Циклограмма сварочного процесса при единственном низком и единственно высоком давлении:  $t_{оп}$  – время оплавления торцов;  $t_н$  – время нагревания (прогрева);  $t_{тп}$  – время технологической паузы на удаление нагревателя;  $t_д$  – время подъема давления осадки;  $t_{охл}$  – время охлаждения сварного соединения под давлением;  $t_{св}$  – общее время сварки;  $P_{оп}$  – давление нагревательного инструмента на торцы труб при оплавлении;  $P_н$  – давление нагревательного инструмента на торцы труб при нагревании (прогреве);  $P_{ос}$  – давление на торцы труб при осадке

**Fig. 2.** The cyclogram of welding process at the only thing low and only high pressure:  $t_{оп}$  – time of melting of end faces;  $t_н$  – time of heating (warming up);  $t_{тп}$  – time of a technological pause for removal of the heater;  $t_д$  – time of rise in pressure of draft;  $t_{охл}$  – time of cooling of a weld joint under pressure;  $t_{св}$  – general time of welding;  $P_{оп}$  – pressure of the heating tool upon end faces of pipes when melting;  $P_н$  – pressure of the heating tool upon end faces of pipes when heating (warming up);  $P_{ос}$  – pressure upon end faces of pipes at draft

Таким образом для реализации процедуры сварки встык НИ больших труб из ПЭ при единственном высоком давлении (близко к верхнему пределу рабочего диапазона сварочной машины) требуются в разы более крепкий центратор и более мощный гидравлический агрегат. С другой стороны, при сварке по данной процедуре относительно небольших труб (близко к нижнему пределу рабочего диапазона сварочной ма-

шины или немного ниже диапазона) режим является достаточно выгодным. В связи с этим данная работа посвящена разработке режимов сварки НИ стыковых соединений труб из ПЭ диаметром от 90 до 315 мм для SDR 13,6 - SDR 9,0 при единственном высоком давлении, выбору необходимого сварочного оборудования и экспериментальной проверке разработанных режимов.

## Материалы и методы

Достаточно часто, при определении параметров режима сварки различных материалов используют расчетные методики.

Для расчета параметров настройки сварочного аппарата для создания требуемого давления при сварке НИ труб из ПЭ использовали расчетную методику, по которой необходимо обладать следующими исходными данными:

$D_n$  – номинальный (наружный) диаметр трубы из ПЭ, мм;

$s_n$  – толщина стенки трубы, мм;

$S$  – площадь стыка, мм<sup>2</sup>;

$S_c$  – площадь цилиндра гидравлического привода сварочной машины, мм<sup>2</sup>.

Площадь свариваемого стыка можно рассчитать по формуле

$$S = \pi(D_n^2 - D_i^2)/4, \quad (1)$$

где  $\pi = 3,14$ .

Качество выполнения сварочных работ в значительной мере определяется техническими характеристиками сварочного оборудования.

Сварочные машины состоят из центраторов, которые предназначены для фиксации свариваемых заготовок труб и их перемещения с заданным усилием, для чего машины оснащаются гидравлическим приводом и устройством для измерения создаваемого в процессе сварки усилия. Кроме того, машины комплектуются устройствами для зачистки свариваемых поверхностей и нагреваемым инструментом.

На Российском рынке хорошо представлены сварочные машины основных производителей сварочной техники. Вопрос выбора сварочной машины постоянно возникает перед сварщиками трубопроводных систем. Цены на сварочные машины значительны и могут различаться в 10...15 раз у разных производителей и поставщиков, что превращает выбор основного сварочного оборудования в серьезную проблему. Обоснованный выбор сварочной техники может быть сделан, во-первых, на основе анализа нормативных требований на машины и, во-вторых, после тестирования машин на соответствие требованиям [3]. Основным условием, предъявляемым к сварочному оборудованию, является его способность обеспечивать требования реализуемой технологии сварки [11-13]. Конструкция сварочного оборудования должна соответствовать размерам заготовок свариваемых труб и необходимым условиям сварки. Наиболее авторитетными документами, на которые можно опираться при оценке сварочной техники, являются международный стандарт ISO 21307 и идентичные российские ГОСТ, в частности ГОСТ 12176-1-2011<sup>1</sup>.

При выборе сварочного оборудования для реализации процесса сварки НИ по процедуре при единственном высоком давлении трубопроводов систем га-

---

<sup>1</sup> ГОСТ 12176-1-2011 Трубы и фитинги пластмассовые. Оборудование для сварки полиэтиленовых систем. Часть 1. Сварка нагретым инструментом встык. М., 2011.

зоснабжения из ПЭ диаметром от 90 до 315 мм были рассмотрены основные технические характеристики, приведен-

ные в табл. 1, трех аппаратов отечественных производителей ПРОСВАР С-315, ROBU W 315 и ССПТ-315.

**Таблица 1.** Технические характеристики сварочных аппаратов

**Table 1.** Technical datas of welding machines

| Технические характеристики /<br>Technical specifications                                                         | ПРОСВАР С-315 /<br>PROSVAR-315 | ROBU W 315 /<br>ROBU W 315 | ССПТ-315 /<br>SSPT-315 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------|
| Диаметр свариваемых труб,<br>мм / Diameter of the welded<br>pipes, mm                                            | 40...315                       | 90...315                   | 75...315               |
| Максимальное рабочее давле-<br>ние, бар / Maximum working<br>pressure, bar                                       | 100                            | 140                        | 100                    |
| Потребляемая мощность, кВт /<br>Power consumption, kW                                                            | 4,95                           | 4,85                       | 4                      |
| Масса, кг /<br>Weight, kg                                                                                        | 160                            | 220                        | 146                    |
| Общая площадь гидравличе-<br>ских поршней, мм <sup>2</sup> / Total area<br>of hydraulic pistons, mm <sup>2</sup> | 2002                           | 2238                       | 2513                   |
| Цена, тыс. руб. /<br>Price, thousand rubles                                                                      | 305                            | 359                        | 586,8                  |

По результатам проведенного анализа технических характеристик выбранных аппаратов и особенностей их эксплуатационных возможностей преимущество было отдано сварочной машине с гидравлическим приводом «Волжанин ССПТ-315». Данная сварочная машина позволяет вручную задать режимы процедуры сварки и обеспечить технологичность сварочного процесса по процедуре при единственном высоком давлении в соответствии с требованиями ГОСТ Р 55276-2012 для всего размерно-

го ряда труб из ПЭ, регламентированных в технических характеристиках.

На сварочной машине ССПТ-315 с гидравлическим приводом давление на разных этапах цикла сварки по процедуре при единственном высоком давлении можно определить по следующим выражениям:

$$P_{оп} = P_{ос} = 0,52 (S/S_c) \times 10 \text{ (бар)} \quad (2)$$

$$P_n = 0,02 (S/S_c) \times 10 \text{ (бар)}, \quad (3)$$

где 0,52 – значение для  $P_{оп}$  и  $P_{ос}$  является постоянной величиной, соответствующей требуемому параметру ре-

жима сварки 0,52 МПа, для циклограммы процесса при единственном высоком давлении;

0,02 – значение для  $P_n$  является постоянной величиной, аналогично предыдущему, соответствующей 0,02 МПа (к данной величине давления должно быть добавлено давление, требуемое для перемещения трубной заготовки).

В расчетах по используемой методике задействован такой параметр, как площадь цилиндра конкретного оборудования для сварки полиэтиленовых труб ( $S_c$ ). Поэтому нормативные документы рекомендуют для определения парамет-

ров режима на конкретном сварочном аппарате с гидравлическим приводом использовать готовые таблицы с параметрами процедуры сварки для каждого типоразмера труб, в которых вместо давления на разных этапах цикла в соответствии с ГОСТ Р 55276-2012 приводятся величины требуемого давления гидравлического привода.

Результаты выполненных расчетов давления по формулам (2) и (3) и параметров времени различных этапов сварки при единственном высоком давлении по ГОСТ Р 55276-2012 сведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Параметры режима сварки нагретым инструментом ПЭ труб различного типоразмера систем газоснабжения на сварочной машине с гидравлическим приводом ССПТ-315 по циклограмме при единственном высоком давлении

**Table 2.** Parameters of the mode of hot tool welding of PE of pipes of various standard size of systems of gas supply on the welding machine with the hydraulic SSPT-315 drive according to the cyclogram with the only high pressure

| $D_n$ , мм /<br>$D_n$ , mm | $P_{оп} = P_{ос}$ , бар /<br>$P_{оп} = P_{ос}$ , bar | $P_n$ , бар /<br>$P_n$ , bar | Первичный<br>валик, мм /<br>Primary roller,<br>mm | $t_n$ , с /<br>$t_n$ , sec | $t_{пн}$ , с /<br>$t_{пн}$ ,<br>sec | $t_d$ , с /<br>$t_d$ , sec | $t_{охл}$ , мин /<br>$t_{охл}$ , min |
|----------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| SDR 13,6                   |                                                      |                              |                                                   |                            |                                     |                            |                                      |
| 90                         | 3,6                                                  | 0,14                         | 2                                                 | 67                         | 6                                   | 6                          | 2,9                                  |
| 110                        | 5,4                                                  | 0,2                          | 2,2                                               | 81                         | 6                                   | 6                          | 3,5                                  |
| 125                        | 6,9                                                  | 0,26                         | 2,4                                               | 92                         | 7                                   | 7                          | 4                                    |
| 140                        | 8,7                                                  | 0,33                         | 2,5                                               | 103                        | 7                                   | 7                          | 4,4                                  |
| 160                        | 11,4                                                 | 0,43                         | 2,8                                               | 118                        | 8                                   | 8                          | 5                                    |
| 180                        | 14,4                                                 | 0,55                         | 3                                                 | 133                        | 8                                   | 9                          | 5,7                                  |
| 200                        | 17,7                                                 | 0,68                         | 3,2                                               | 147                        | 9                                   | 10                         | 6,3                                  |
| 225                        | 22,4                                                 | 0,86                         | 3,5                                               | 166                        | 9                                   | 10                         | 7,1                                  |
| 250                        | 27,7                                                 | 1,06                         | 3,8                                               | 184                        | 10                                  | 11                         | 7,9                                  |
| 280                        | 34,7                                                 | 1,33                         | 4,1                                               | 206                        | 10                                  | 11                         | 8,9                                  |
| 315                        | 44                                                   | 1,69                         | 4,5                                               | 232                        | 11                                  | 11                         | 9,9                                  |

Окончание табл. 2 / Table 2 (ending)

| $D_n$ , мм /<br>$D_n$ , mm | $P_{оп} = P_{ос}$ , бар /<br>$P_{оп} = P_{ос}$ , bar | $P_n$ , бар /<br>$P_n$ , bar | Первичный<br>валик, мм /<br>Primary roller,<br>mm | $t_n$ , с /<br>$t_n$ , sec | $t_{тп}$ , с /<br>$t_{тп}$ , sec | $t_d$ , с /<br>$t_d$ , sec | $t_{охл}$ , мин /<br>$t_{охл}$ , min |
|----------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| SDR 11,0                   |                                                      |                              |                                                   |                            |                                  |                            |                                      |
| 90                         | 4,4                                                  | 0,17                         | 2,0                                               | 82                         | 9                                | 5                          | 3,5                                  |
| 110                        | 6,5                                                  | 0,25                         | 2,5                                               | 100                        | 9                                | 6                          | 4,3                                  |
| 125                        | 8,4                                                  | 0,32                         | 2,7                                               | 114                        | 9                                | 7                          | 4,9                                  |
| 140                        | 10,5                                                 | 0,4                          | 2,9                                               | 127                        | 9                                | 7                          | 5,5                                  |
| 160                        | 13,8                                                 | 0,5                          | 3,2                                               | 146                        | 9                                | 8                          | 6,3                                  |
| 180                        | 17                                                   | 0,65                         | 3,5                                               | 164                        | 10                               | 9                          | 7                                    |
| 200                        | 21,5                                                 | 0,82                         | 3,7                                               | 182                        | 10                               | 9                          | 7,8                                  |
| 225                        | 27,2                                                 | 1,04                         | 4                                                 | 205                        | 10                               | 10                         | 8,8                                  |
| 250                        | 33,5                                                 | 1,28                         | 4,4                                               | 227                        | 10                               | 11                         | 9,7                                  |
| 280                        | 42                                                   | 1,61                         | 4,8                                               | 254                        | 11                               | 12                         | 11                                   |
| 315                        | 53                                                   | 2,04                         | 5,3                                               | 286                        | 11                               | 13                         | 12,3                                 |
| SDR 9,0                    |                                                      |                              |                                                   |                            |                                  |                            |                                      |
| 90                         | 5,24                                                 | 0,2                          | 2,5                                               | 101                        | 7                                | 7                          | 4,3                                  |
| 110                        | 7,8                                                  | 0,3                          | 2,8                                               | 123                        | 8                                | 8                          | 5,3                                  |
| 125                        | 10,1                                                 | 0,4                          | 3,1                                               | 140                        | 8                                | 9                          | 6,02                                 |
| 140                        | 12,7                                                 | 0,49                         | 3,4                                               | 157                        | 9                                | 10                         | 6,75                                 |
| 160                        | 16,5                                                 | 0,64                         | 3,7                                               | 179                        | 10                               | 11                         | 7,7                                  |
| 180                        | 20,9                                                 | 0,8                          | 4                                                 | 201                        | 10                               | 12                         | 8,6                                  |
| 200                        | 25,9                                                 | 1                            | 4,4                                               | 224                        | 11                               | 13                         | 9,6                                  |
| 225                        | 32,7                                                 | 1,26                         | 4,8                                               | 252                        | 12                               | 14                         | 10,8                                 |
| 250                        | 40,3                                                 | 1,5                          | 5,2                                               | 279                        | 13                               | 15                         | 12                                   |
| 280                        | 50,6                                                 | 1,95                         | 5,7                                               | 313                        | 14                               | 16                         | 13,5                                 |
| 315                        | 64                                                   | 2,46                         | 6,28                                              | 352                        | 15                               | 18                         | 15,1                                 |

**Примечание.** SDR – стандартное размерное отношение наружного диаметра трубы к толщине стенки.

Для экспериментальной проверки выполненных расчетов параметров процедуры сварки по циклограмме при единственном высоком давлении, приведенных в табл. 3, было сварено четыре стыка труб диаметром 110 мм с толщиной стенки 10 мм из ПЭ-100 (SDR 11,0)

и произведен визуально-измерительный контроль качества [14-16] выполненных соединений, данные измерений приведены в табл. 3. Стыки труб под номером 1 и 2 были сварены при температуре нагревателя 220 °С, а стыки 3 и 4 – при температуре 205 °С.

**Таблица 3.** Геометрические размеры грата сварных швов, выполненных по процедуре сварки при единственном высоком давлении на сварочной машине ССПТ-315**Table 3.** The geometrical sizes of a fin of the weld joints executed according to the procedure of welding with the only high pressure on the SSPT-315 welding machine

| Номер стыка /<br>Joint number | Ширина грата ( $b$ ), мм /<br>Width of a fin ( $b$ ), mm | Высота грата ( $h$ ), мм /<br>Height of a fin ( $h$ ), mm |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 1                             | 9,5                                                      | 3,1                                                       |
| 2                             | 9,0                                                      | 2,5                                                       |
| 3                             | 9,8                                                      | 3,0                                                       |
| 4                             | 9,2                                                      | 2,7                                                       |

Принято считать, что наиболее обоснованные в научном отношении данные о качестве сварных соединений дают длительные механические испытания их на осевое растяжение. Так как эти испытания требуют очень больших затрат времени, трудоемкости и потому выполняются очень редко, то в международной практике контроля стыковых сварных соединений ПЭ труб, выполненных НИ, преимущественно используются кратковременные испытания технологических образцов на осевое растяжение [17-21].

Главной оценкой качества сварного шва при испытаниях на растяжение является характер разрушения. Пластичский характер разрушения свидетельствует о его хорошем качестве, хрупкий – о неудовлетворительном.

Нами разрушающие испытания проводились в соответствии с ГОСТ 11262-80. Из каждого сварного стыка фрезеровались по пять технологических образцов-лопаток, как показано на рис. 3.

Испытания проводили через 24 часа после проведения сварки. Каждый образец маркировался таким образом, чтобы его первоначальное положение в изделии можно было определить. Скорость растяжения образцов из ПЭ-100, согласно требованиям ГОСТ 11262-2017, принималась равной  $50 \pm 5$  мм/мин.

В зажимах разрывной машины Р-50 технологические образцы закреплялись по меткам, определяющим положение кромок зажимов таким образом, чтобы продольные оси зажимов и ось образца совпадали между собой и с направлением движения подвижного зажима, как показано на рис. 4. Зажимы сдавливались равномерно, чтобы исключалось скольжение образца в процессе испытания, но при этом не происходило его разрушение в месте закрепления. За результат испытания принималось минимальное значение относительного удлинения при разрыве.

Вид закрепленного в зажимах разрывной машины образца непосредственно перед его разрушением показан на рис. 4.б.



**Рис. 3.** Технологические образцы с маркировкой, готовые к испытаниям

**Fig. 3.** Technological samples with marking, ready to tests

В процессе испытания на разрывной машине Р-50 записывались кривые нагрузки/деформации вплоть до разрыва образца и на этой кривой отмечалась нагрузка, соответствующая пределу те-

кучести, а также фиксировалась конечная длина образца при разрыве, как показано штрих-пунктирными линиями на графике, представленном на рис. 5.



**а**



**б**

**Рис. 4.** Технологический образец, закрепленный в захватах разрывной машины Р-50: **а** – до приложения растягивающей нагрузки; **б** – непосредственно перед его разрушением

**Fig. 4.** The technological sample fixed in captures of the explosive R-50 machine: **а** – to the application of a tensile load; **б** – just before its destruction

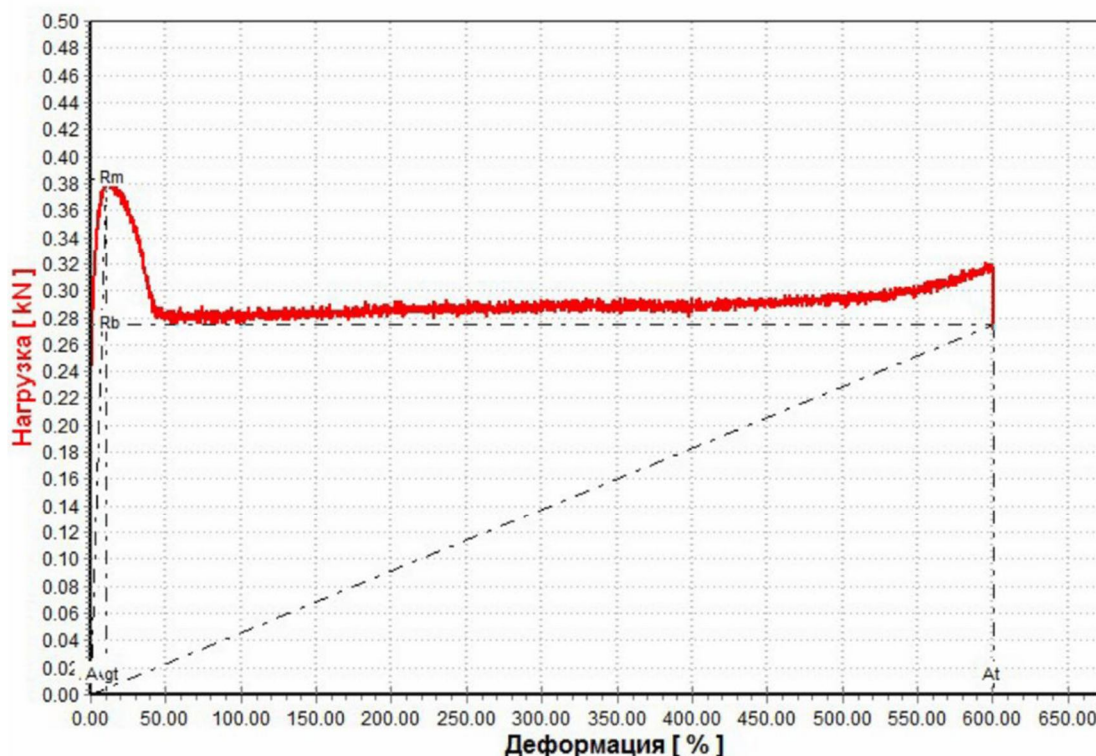


Рис. 5. График нагрузки/деформации вплоть до разрыва технологического образца

Fig. 5. The schedule of loading/deformation up to a rupture of a technological sample

## Результаты и их обсуждение

Внешний вид сварных соединений, выполненных сваркой нагретым инструментом встык, должен отвечать предъявляемым требованиям [1, 14, 22-24].

Сопоставление полученных результатов показывает, что они полностью удовлетворяют требованиям к сварному соединению для полиэтиленовых труб диаметром 110 мм SDR 11,0, указанным в СП 42-103-2003 (допускаемая ширина грата от 6,5 до 10,0 мм и высота грата от 2,5 до 4,5 мм). Кроме того, как показывает визуально-измерительный контроль, изменение температуры нагревателя от 205 до 220 °С не оказывает существенного влияния на качество свар-

ных соединений полиэтиленовых труб диаметром 110 мм SDR11,0.

В соответствии с требованиями ГОСТ при испытании на растяжение в осевом направлении 80 % и более испытываемых образцов должны иметь пластичный характер разрушения, соответствующий I типу разрушения. Оставшиеся образцы могут иметь характер разрушения, соответствующий II типу, а характер разрушения III типа, демонстрирующий хрупкое разрушение, не допустим. Также в ходе испытаний технологических образцов ПЭ труб, удовлетворяющих требованиям, предъявляемым к качеству сварки, обязательно должно обеспечиваться условие удлинения образца в размере не менее 350%.

Механические испытания всех полученных нами технологических образцов дали 100 %-ный результат пластичного характера разрушения, соответствующий I типу разрушения, при величине удлинения от 500 до 600 %.

## Выводы

1. Строительство газопроводных полиэтиленовых трубопроводов осуществляется с соблюдением требований соответствующей нормативной документации. Такие работы в целом являются весьма ответственными с точки зрения обеспечения качества и надежности для долговременной эксплуатации построенного объекта.

2. В данной работе определены требуемые параметры режимов сварки НИ труб из ПЭ систем газоснабжения

диаметром от 90 мм до 315 мм и на основе проведенного анализа выбрано оборудование, необходимое для процедуры сварки при единственном высоком давлении.

3. Экспериментальная проверка путем механических испытаний технологических образцов на осевое растяжение подтвердила высокое качество сварки НИ труб из ПЭ-100 диаметром 110 мм (SDR 11,0), выполненных по процедуре при единственном высоком давлении.

4. Высокое качество экспериментальных стыков труб из ПЭ-100 предполагает возможность использования машины «Волжанин-ССПТ-315» для сварки НИ труб из ПЭ всего регламентированного техническими характеристиками диапазона по сварочной процедуре при единственном высоком давлении.

## Список литературы

1. Кимельблат В.И., Волков И.В., Жуков А.В. Технологические особенности сварки встык труб из разных марок полиэтилена // Территория Нефтегаз. 2015. № 4. С. 84-89.

2. Волков И.В., Кимельблат В.И. Процедуры и основные параметры сварки полиэтилена // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т.17. № 14. С. 293-296.

3. Волков И.В., Кимельблат В.И. Современное состояние и актуальные новации техники для сварки полиэтиленовых труб нагретым инструментом встык // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т.17. № 16. С. 175-178.

4. Кимельблат В.И., Волков И.В., Стоянов О.В. Сварка полимерных труб и фитингов с закладными электронагревателями. Казань: КНИТУ, 2013. 156 с.

5. Кимельблат В.И. Трубопроводы из термопластов // Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал. 2014. № 1 (1). С. 72-92.

6. Данзанова Е.В., Герасимов А.И., Ботвин Г.В. Влияние параметров сварки на прочность сварного стыкового соединения полиэтиленовых труб // Полимерные трубы. 2015. № 3 (49). С. 48-52.

7. Фаттахов М.М. Применение труб из термопластов при строительстве и реконструкции распределительных трубопроводов // Нефтегазовое дело. 2006. № 1. С. 12.
8. Volodin V.P. Extrusion multichannel, multi-layer, reinforced pipes and tubular profiles // Polymeric materials. March 2008. № 3 (106), p. 33.
9. Сайт ООО «АДР-Технология». URL: [http://www.adr-t.ru/support/technology/butt\\_welding/](http://www.adr-t.ru/support/technology/butt_welding/).
10. Кимельблат В. И., Волков И. В. Проблемы нормативно-технической документации на контактную сварку полимерных труб встык // Сварка и диагностика. 2011. № 1. С. 58-61.
11. Кимельблат В.И. Сварка ПЭ труб: тенденции развития // Пластикс. 2014. №6 (135). С. 38-43.
12. Кимельблат В.И., Волков И.В., Чупрак А.И. Вариации реологических свойств как стимул оптимизации основных параметров сварки нагретым инструментом встык // Сварка и диагностика. 2012. № 2. С. 49–52.
13. Нестеров Г.Д., Нестерова Н.С. Информационная система для сварки полиэтиленовых труб // Вестник ИМСИТ. 2018. № 3 (75). С. 34-36.
14. Кимельблат В.И., Волков И.В., Мысяк Р.С. Направления развития визуально-измерительного контроля сварки нагретым инструментом встык // Вестник Технологического университета, 2015. Т.18. № 5. С. 56-59.
15. Волков И.В., Прокопьев Н.В., Кимельблат В.И. Как контролировать грат сварных соединений ПЭ труб встык? 1. Малые диаметры и толщины труб // Полимерные трубы. 2015. № 3 (49). С. 58-60.
16. Волков И.В., Прокопьев Н.В., Кимельблат В.И. Как контролировать грат сварных соединений пэ труб встык? 2. Средние и большие трубы // Полимерные трубы. 2015. № 4 (50). С. 54-59.
17. Ботвин Г.В., Данзанова Е.В., Герасимов А.И. Методика испытаний на прочность сварного соединения полипропиленовых труб // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 9. С. 70-72.
18. Demchenko V. L., Iurzhenko M. Peculiarities of constant magnetic field effect on the nanostructural organization and properties of hard-to-weld polyethylene-polypropylene joints // 2017 IEEE 7th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP). DOI: 10.1109/nap.2017.8190258.
19. Кимельблат В.И. Оценка качества сварных соединений и эксплуатационных характеристик полимерных трубопроводных систем // Ремонт, восстановление, модернизация. 2014. № 11. С. 13–16.

20. Demchenko V. L., Yurzenko M. V. Structure and properties of the welded joints of single-type polyethylenes formed under the action of constant magnetic fields // *Materials Science*. 2017. Is. 53(2). P. 186-193. DOI: 10.1007/s11003-017-0061-3.

21. Chebbo Z., Vincent M., Boujlal A., etc. Numerical and Experimental Study of the Electrofusion Welding Process of Polyethylene Pipes // *Polymer Engineering and Science*. 2015. Vol. 55. No. 1. P. 123-131.

22. Кимельблат В.И., Волков И.В., Глухов В.В. Оптимизация технологии контактной сварки встык. Учет свойств полимеров // *Полимерные трубы*. 2010. № 2 (28). С. 32-36.

23. Ботвин Г.В., Данзанова Е.В., Герасимов А.И. Методика испытаний на прочность сварного соединения полипропиленовых труб // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2017. Т. 83. № 9. С. 70-72.

24. Юрженко М.В. Первичный контроль качества сварных соединений полиэтиленовых труб при сварке нагретым инструментом встык (обзор) // *Наукові нотатки*. 2019. № 66. С. 400-405.

## References

1. Kimelblat V.I., Volkov I.V., Zhukov A.V. Tekhnologicheskie osobennosti svarki vстыk trub iz raznykh marok polietilena [Technological features of welding end-to-end pipes from different grades of polyethylene]. *Territoriya Neftegaz = Territory Neftegaz*, 2015, no. 4, pp. 84-89.

2. Volkov I.V., Kimelblat V.I. Protsedury i osnovnye parametry svarki polietilena [Procedures and main parameters of welding of polyethylene]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Kazan Technological University*, 2014, vol.17, no. 14, pp. 293-296.

3. Volkov I.V., Kimelblat V.I. Sovremennoe sostoyanie i aktual'nye novatsii tekhniki dlya svarki polietilenovykh trub nagretyim instrumentom vстыk [Current state and relevant innovations of the equipment for welding of polyethylene pipes heated tool end-to-end]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Kazan Technological University*, 2014, vol.17, no. 16, pp. 175-178.

4. Kimelblat V.I., Volkov I.V., Stoya O.V. *Svarka polimernykh trub i fittingov s zakladnymi elektronagrevatelyami* [Welding of polymeric pipes and a fitting with mortgage electric heaters: the monograph]. Kazan, KNITU Publ., 2013, 156 p.

5. Kimelblat V.I. Truboprovody iz termoplastov [Pipelines from thermoplastics]. *Polimery v stroitel'stve = Polymers in Construction*, 2014, no. 1 (1), pp. 72-92.

6. Danzanova E.V., Gerasimov A.I., Botvin G. V. Vliyanie parametrov svarki na prochnost' svarnogo stykovogo soedineniya polietilenovykh trub [Influence of parameters of welding on durability of weld abutting connection of polyethylene pipes]. *Polimernye truby = Polymeric Pipes*, 2015, no. 3 (49), pp. 48-52.

7. Fattakhov M.M. Primenenie trub iz termoplastov pri stroitel'stve i rekonstruktsii raspredelitel'nykh truboprovodov [Application of pipes from thermoplasts at construction and reconstruction of distributive pipelines]. *Neftegazovoe delo = Oil and Gas Business*, 2006, no. 1, pp. 12.

8. Volodin V.P. Extrusion multichannel, multi-layer, reinforced pipes and tubular profiles. *Polymeric materials*, March 2008, no. 3 (106), p. 33.

9. Website of LLC ADR-Tekhnologiya. Available at: [http://www.adr-t.ru/support/technology/butt\\_welding/](http://www.adr-t.ru/support/technology/butt_welding/).

10. Kimelblat V.I., Volkov I. V. Problemy normativno-tekhnicheskoi dokumentatsii na kontaktnuyu svarku polimernykh trub vtyk [Specifications and technical documentation problems on contact welding of polymeric pipes vtyk]. *Svarka i diagnostika = Welding and Diagnostics*, 2011, no. 1, pp. 58-61.

11. Kimelblat V.I. Svarka PE trub: tendentsii razvitiya [Welding of PE of pipes: development trends]. *Plastiks*, 2014, no. 6 (135), pp. 38-43.

12. Kimelblat V.I., Volkov I.V., Chuprak A.I. Variatsii reologicheskikh svoystv kak stimul optimizatsii osnovnykh parametrov svarki nagretym instrumentom vстыk [Variations of rheological properties as incentive of optimization of main parameters of hot tool welding end-to-end]. *Svarka i diagnostika = Welding and Diagnostics*, 2012, no. 2, pp. 49-52.

13. Nesterov G.D., Nesterova N.S. Informatsionnaya sistema dlya svarki polietilenovykh trub [An information system for welding of polyethylene pipes]. *Vestnik IMSIT = IMSIT Bulletin*, 2018, no. 3 (75), pp. 34-36.

14. Kimelblat V.I., Volkov I.V., Mysyak R.S. Napravleniya razvitiya vizual'no-izmeritel'nogo kontrolya svarki nagretym instrumentom vстыk [Directions of development of visual and measuring control of hot tool welding end-to-end]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Technological University*, 2015, vol.18, no. 5, pp. 56-59.

15. Volkov I.V., Prokopyev N.V., Kimelblat V.I. Kak kontrolirovat' grat svarnykh soedinenii PE trub vстыk? 1. Malye diametry i tolshchiny trub [How to control a fin of weld joints of PE of pipes end-to-end? 1. Small diameters and thickness of pipes]. *Polimernye truby = Polymeric Pipes*, 2015, no. 3 (49), pp. 58-60.

16. Volkov I.V., Prokopyev N.V., Kimelblat V.I. Kak kontrolirovat' grat svarnykh soedinenii pe trub vстыk? 2. Srednie i bol'shie truby [How to control a fin of weld joints pe

pipes end-to-end? 2. Average and big pipes]. *Polimernye truby = Polymeric Pipes*, 2015, no. 4 (50), pp. 54-59.

17. Botvin G. V., Danzanova E.V., Gerasimov A.I. Metodika ispytaniy na prochnost' svarnogo soedineniya polipropilenovykh trub [Test procedure for durability of a weld joint of polypropylene pipes. Factory laboratory]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Factory Laboratory. Diagnostics of Materials*, 2017, vol. 83, no. 9, pp. 70-72.

18. Demchenko V. L., Iurzhenko M. Peculiarities of constant magnetic field effect on the nanostructural organization and properties of hard-to-weld polyethylene-polypropylene joints/2017 *IEEE 7th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP)*. DOI: 10.1109/nap.2017.8190258.

19. Kimelblat V.I. Otsenka kachestva svarnykh soedineniy i ekspluatatsionnykh kharakteristik polimernykh truboprovodnykh sistem [Assessment of quality of weld joints and utilization properties of polymeric pipeline systems]. *Remont, vosstanovlenie, modernizatsiya = Repair, Restoration, Modernization*, 2014, no. 11, pp. 13-16.

20. Demchenko V. L., Yurzhenko M. V. Structure and properties of the welded joints of single-type polyethylenes formed under the action of constant magnetic fields. *Materials Science*, 2017, is. 53(2), pp. 186-193. DOI: 10.1007/s11003-017-0061-3.

21. Chebbo Z., Vincent M., Boujlal A., etc. Numerical and Experimental Study of the Electrofusion Welding Process of Polyethylene Pipes. *Polymer Engineering and Science*, 2015, vol. 55, no. 1, pp. 123-131.

22. Kimelblat V.I., Volkov I.V., Glukhov V.V. Optimizatsiya tekhnologii kontaktnoi svarki vстыk. Uchet svoystv polimerov [Optimization of technology of contact welding end-to-end. Accounting of properties of polymers]. *Polimernye truby = Polymeric Pipes*, 2010, no. 2 (28), pp. 32-36.

23. Botvin G. V., Danzanova E.V., Gerasimov A.I. Metodika ispytaniy na prochnost' svarnogo soedineniya polipropilenovykh trub [Test procedure for durability of a weld joint of polypropylene pipes.]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Factory Laboratory. Diagnostics of Materials*, 2017, vol. 83, no. 9, pp. 70-72.

24. Yurzhenko M.V. Pervichnyi kontrol' kachestva svarnykh soedineniy polietilenovykh trub pri svarke nagretym instrumentom vстыk (obzor) [Primary quality control of weld joints of polyethylene pipes at hot tool welding end-to-end (overview)]. *Naukovi notatki*, 2019, no. 66, pp. 400-405.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Иванов Николай Иванович**, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Машиностроительные технологии и оборудование», Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ni1949@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3181-9364>

**Nikolay I. Ivanov**, Cand. of Sci.(Engineering), Associate Professor, Engineering Technology and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ni1949@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3181-9364>

**Чевычелов Дмитрий Александрович**, студент, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: dchevychelov@bk.ru

**Dmitry A. Chevychelov**, Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: dchevychelov@bk.ru

**Писевич Евгений Юрьевич**, студент, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ievgen46@vk.com

**Evgeny Yu. Pisevich**, Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ievgen46@vk.com

**Чевычелов Сергей Александрович**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Машиностроительные технологии и оборудование», Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tschsa@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8958-2191>

**Sergey A. Chevychelov**, Cand. of Sci. (Engineering), Head of the Machine-building Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: tschsa@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8958-2191>

**Разумов Михаил Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование», Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mika\_1984\_@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2015-3322>, Researcher ID: N-3272-2016

**Mikhail S. Razumov**, Candidate of Engineering, Sciences, Associate Professor, Department of Engineering Technology and Equipment, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: mika\_1984\_@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2015-3322>, Researcher ID: N-3272-2016

## Экспериментальное определение несущей способности железобетонной плиты перекрытия

А.В. Масалов <sup>1</sup> ✉, Ю.Б. Филатов <sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва 129337, Российская Федерация

✉ e-mail: masalow.al@ya.ru

### Резюме

**Цель исследования.** Экспериментальное определение и анализ несущей способности, деформативности и трещиностойкости железобетонной плиты перекрытия, опёртой по трём сторонам. На основании результатов испытаний оценить уровень адекватности расчётной модели плиты.

**Методы.** Подготовлена методика испытания серийного образца железобетонной плиты перекрытия многоэтажного здания на основании действующего стандарта на проведение испытаний конструкций. Плита опёрта на испытательном стенде по трём сторонам (перекрытие лоджии) контролируемой нагрузкой, моделирующей эксплуатационную нагрузку. Нагружение проводили штучными грузами, известного веса, перемещаемыми мостовым краном. Измерение прогибов проводили с помощью механических прогибомеров и индикаторов часового типа. Выполнены анализ и обоснование результатов испытаний.

**Результаты.** Плита была нагружена до уровня 325 кН или 20,1 кПа, что в 1,64 раза превысило контрольную нагрузку с коэффициентом безопасности 1,6, в 2,64 раза превысило расчётную нагрузку и в 3,08 раза нормативную. Максимальный зафиксированный прогиб при максимальной нагрузке составил 3,01 мм в долях пролёта 0,0009, что в 7,41 раза меньше допускаемого прогиба от нормативной нагрузки – 0,00667 от длины пролёта. Плита не была разрушена при испытании, раскрытия трещин не наблюдалось, прогибы не превысили допустимые. Испытания были прекращены из соображений безопасности.

**Закключение.** Многие строительные конструкции проектируются с большими запасами по первой и второй группам предельных состояний с использованием классических критериев. Уточнение расчётной схемы эксплуатации конструкций, оптимальный выбор конечного элемента при расчете, а также постепенное включение в своды правил методов расчета строительных конструкций на основе теории конструктивных систем с распределёнными параметрами при критических уровнях энергии, позволят разрабатывать более экономичные строительные конструкции.

**Ключевые слова:** железобетонная плита перекрытия; опирание по трём сторонам; испытания; контрольная нагрузка; прогибы; трещиностойкость; теория исследования конструктивных систем с распределёнными параметрами на критических уровнях энергии.

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

**Для цитирования:** Масалов А.В., Филатов Ю.Б. Экспериментальное определение несущей способности железобетонной плиты перекрытия // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(2): 42-61. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-42-61>.

Поступила в редакцию 20.05.2023

Подписана в печать 27.06.2023

Опубликована 02.08.2023

## Experimental Determination of the Bearing Capacity of a Reinforced Concrete Floor Slab

Alexander V. Masalov <sup>1</sup>✉, Yuri B. Filatov <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

<sup>2</sup> National Research Moscow State Construction University  
26 Yaroslavskoye rd., Moscow 129337, Russian Federation

✉ e-mail: masalov.al@ya.ru

### Abstract

**Purpose of research.** Experimental determination and analysis of the bearing capacity, deformability and crack resistance of a reinforced concrete floor slab supported on three sides

**Methods.** Testing a specimen of a reinforced concrete floor slab supported on three sides (loggia floor) by a controlled load simulating the operational one. Measurement of deflections. Analysis and justification of test results

**Results.** The slab was loaded to a level of 325 kN or 20.1 kPa. This load exceeded the control load by a factor of 1.64 with a safety factor of 1.6, exceeded the design load by a factor of 2.64, and exceeded the standard load by a factor of 3.08. The maximum recorded deflection at maximum load was 3.01 mm in or in span fractions of 0.0009, which is 7.41 times less than the allowable deflection from the standard load - 0.00667 of the span length. The testing has been terminated for safety reasons.

**Conclusion.** The points that could allow the developing of more economical building structures are: refinement of the design scheme for the operation of structures, the optimal choice of a finite element in the calculation, as well as the gradual inclusion in the sets of rules of methods for calculating building structures based on the theory of structural systems with distributed parameters at critical energy levels

**Keywords:** reinforced concrete floor slab supported on three sides; tests; control load; deflections; crack resistance; theory of the study of structural systems with distributed parameters at critical energy levels.

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

**For citation:** Masalov A. V., Filatov Y. B. Experimental Determination of the Bearing Capacity of a Reinforced Concrete Floor Slab. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(2): 42-61 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-42-61>.

Received 20.05.2023

Accepted 27.06.2023

Published 02.08.2023

\*\*\*

## Введение

Экспериментальные исследования поведения строительных конструкций под нагрузкой остаются одним из важнейших направлений исследований на протяжении долгого времени существования строительной науки. Это обусловлено теоретическими предпосылками расчетов, основанных на гипотезах о наступлении предельного состояния, невозможности учета всего многообразия строительных конструкций и возможных воздействий на них [1-10]. Одной из причин является бурное развитие композитных конструкций, для которых пока не существует достаточно адекватных расчетных моделей [11-19], но требуются экспериментальные результаты, позволяющие их построить.

Следует заметить, что для железобетонных конструкций, несмотря на их широкое применение и повышенное внимание к ним, пока не разработаны расчетные модели для случаев плоского и трехмерного напряженного состояния. Нормативные документы (СП 63.13330, СП 16.13330, СП 64.13330) требуют проведения расчетов пластин и оболочек по одномерным (балочным) моделям расчета. Этим объясняется интерес к экспериментальным исследованиям железобетонных конструкций, таких, как балки, пластины и оболочки.

Как правило, несущая способность железобетонных конструкций и элементов оказывается выше расчетной, что является причиной применения методов оптимального проектирования конструкций.

Настоящая статья посвящена экспериментальному исследованию несущей железобетонной плиты перекрытия, серийно применяющейся в домостроении в различных регионах России.

## Материалы и методы

С целью определения соответствия серийно выпускаемой плиты 17-этажного панельного жилого дома требованиям нормативно-технической документации были выполнены испытания контрольной нагрузкой по просьбе производителя.

Плита перекрытия под жилым помещением и лоджией опирается по трём сторонам. В расчётной схеме опирание принято шарнирным. Нагрузки на плиту приведены в табл.1. Габаритные размеры плиты 4480x5090x160. Армирование каркасами, сетками и отдельными стержнями, диаметром 5, 10 и 14 мм. Применяемая стержневая арматура класса А400, арматурная проволока Вр500. Проектный класс бетона В20.

Таблица 1. Нагрузки на плиту

Table 1. Plate loads

| Наименование нагрузки / Load name      | Нормативное значение, кПа / Standard value, kPa | Расчётное значение, кПа / Design value, kPa | Расчётное значение при испытании, C=1,3, кПа / Design value during testing, C=1.3, kPa | Расчётное значение при испытании, C=1,6, кПа / Design value during testing, C=1.6, kPa |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Нагрузка от собственного веса плиты | 4                                               | 4,4                                         | 5,7                                                                                    | 7,04                                                                                   |
| 2. Нагрузка от веса пола               | 1                                               | 1,3                                         | 1,7                                                                                    | 2,08                                                                                   |
| Нагрузка временная                     | 1,5                                             | 1,95                                        | 2,54                                                                                   | 3,12                                                                                   |
| Всего                                  | 6,5                                             | 7,65                                        | 9,94                                                                                   | 12,24                                                                                  |

Проектирование плиты проводилось ведущим проектным государственным предприятием региона с использованием программного комплекса SCAD. Авторы статьи опирались на данные проекта, прошедшего государственную экспертизу.

Контрольную нагрузку в кН определяли, умножив расчётное значение нагрузки, при испытании с коэффициентом безопасности  $C=1,6$ , равное 12,24 кПа на расчётную площадь плиты  $3,20 \times 5,06 = 16,2 \text{ м}^2$ . Контрольная нагрузка составила  $12,24 \times 16,2 = 198 \text{ кН}$ .

Выполнены следующие виды работ: подготовка методики испытаний, разработка оснащения для проведения измерений, подготовка и проведение испытаний, составление отчёта по испытаниям, анализ результатов.

Методика была составлена с учётом требований ГОСТ 8829-94 «Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жёсткости и трещиностойкости». Указанный стандарт действовал на время проведения испытаний. Методика испытаний плиты также соответствовала действующему в настоящее время ГОСТ 8829-2018.

Испытания нагружением выполняются с целью комплексной проверки обеспечения требуемых технических показателей плит перекрытия – прочности, жесткости и трещиностойкости, предусмотренных проектной документацией на эти изделия, технологическими процессами производства плит. В результате испытаний должны определяться

фактические значения разрушающих нагрузок при испытаниях изделий по прочности (первая группа предельных состояний) и фактические значения прогибов и ширины раскрытия трещин под контрольной нагрузкой при испытаниях по жесткости и трещиностойкости (вторая группа предельных состояний).

Оценка прочности, жесткости и трещиностойкости изделия осуществляется по результатам испытаний на основании сопоставления фактических значений разрушающей нагрузки, прогиба и ширины раскрытия трещин под контрольной нагрузкой с соответствующими контрольными значениями, установленными в проектной документации на изделие.

Нагружение производили штучными грузами. В качестве них использовали поддоны размером 1х1 м с 12, 24 и 36 стеновыми камнями. Масса каждого поддона со стеновыми камнями 252,

504 и 756 кг соответственно. Подачу грузов на плиту выполняли мостовым краном.

Плиту установили на испытательный стенд (рис. 1). Габаритные размеры стенда в плане 6,00х3,30, высота 1,60 м. Сечения угловых стоек и опорного пояса - 2 швеллера №14, средних стоек - 2 швеллера №12, раскосы из уголка 50х50х5.

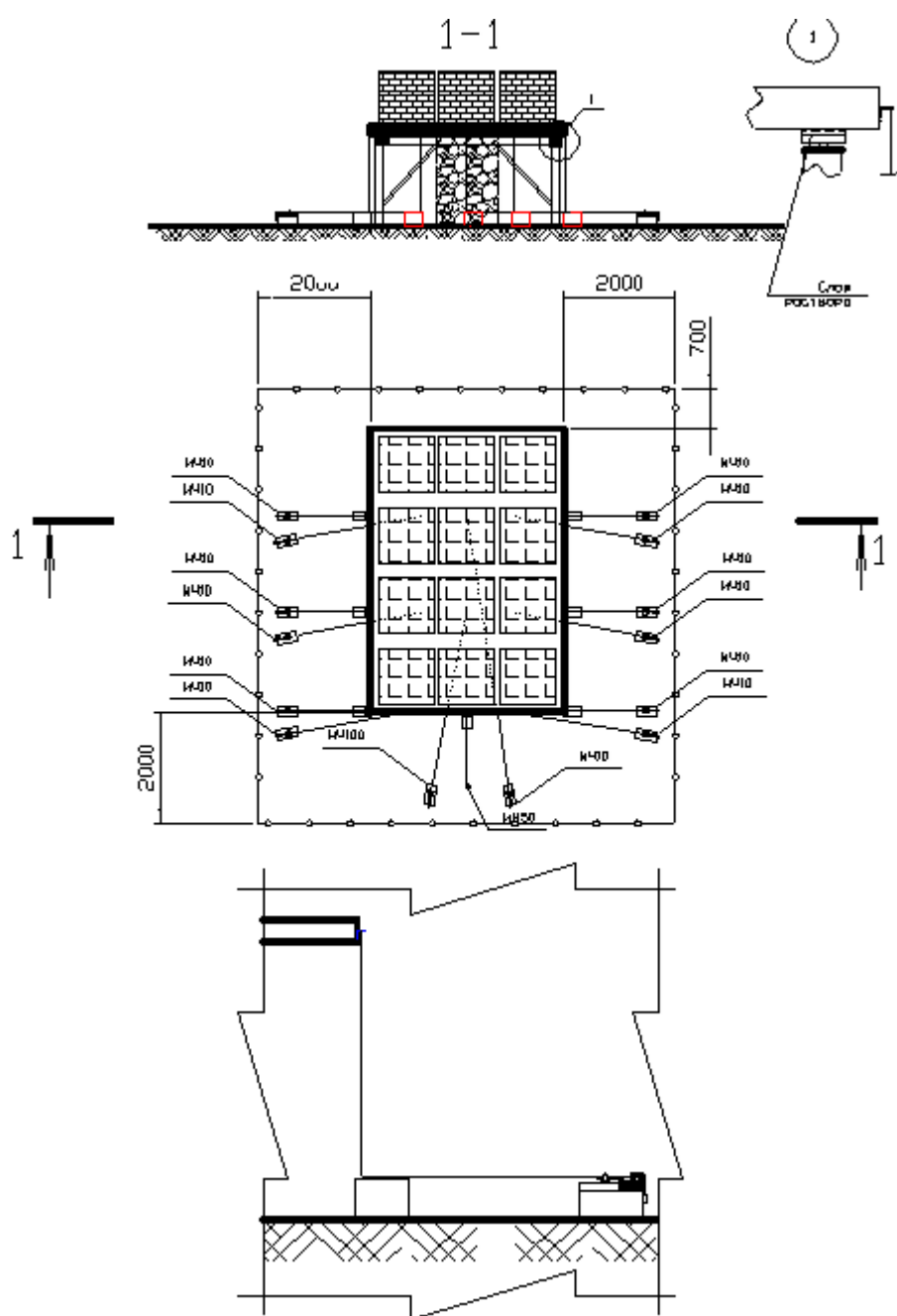
Плиту опирали согласно рис. 2 на стенд по трём сторонам через шарнирные устройства и выравнивающий слой раствора, толщиной 25-30 мм.

Для измерения прогибов и перемещений применяли индикаторы часового типа ИЧ-10 и ИЧ-50 по ГОСТ 577—68, марки и стальную проволоку диаметром 0,6 мм. Схема установки приборов приведена на рис. 2. Прогибы и перемещения измеряли в 15 точках в четвертях и в середине пролёта в поперечном и продольном направлениях.



**Рис.1.** Плита нагружена до уровня 1,64 контрольной нагрузки

**Fig.1.** The slab is loaded to the level of 1.64 of the reference load

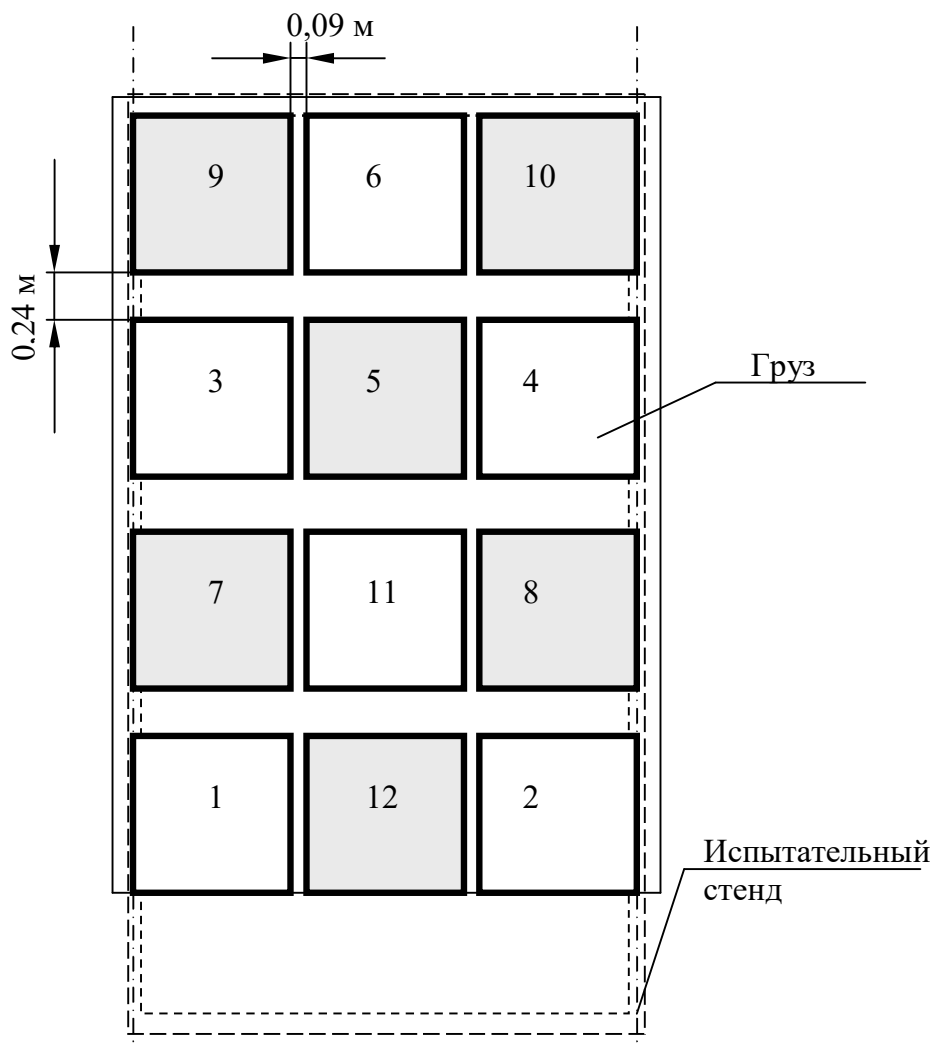


**Рис. 2.** Схема расстановки приборов

**Fig. 2.** Measuring instrument layout

Для контроля трещинообразования нижнюю поверхность плиты окрасили меловым раствором. Для фиксирования процесса раскрытия трещин использовали фотокамеру. Под плитой установили страховочные опоры согласно схеме рис. 2. Зазоры между плитой и

страховочными опорами 30-40 мм. Марки, для прикрепления стальной проволоки на поверхность плиты установили на гипсовый раствор. Нанесли разметку на плиту с использованием мелованного шнура (рис. 3), согласно которой следует устанавливать грузы.



**Рис. 3.** Схема расстановки и последовательность укладки грузов

**Fig. 3.** Scheme of arrangement and sequence of load stowage

Установили первый ряд грузов, 1-6 грузы, на плиту по разметке согласно схеме рис. 3. Через 10 минут сняли показания с приборов и осмотрели нижнюю часть плиты. Установили первый ряд грузов, 7-12 грузы, на плиту по разметке согласно схеме рис. 3. Через 10 минут сняли показания с приборов и осмотрели нижнюю часть плиты. Установили второй ряд грузов и т.д.

Для проведения измерений прогибов плиты по схеме, указанной на рис. 2, бы-

ло разработано и изготовлено специальное оснащение для работы с индикаторами часового типа ИЧ-10 и ИЧ-50. Чертежи оснащения приведены на рис. 4, 5, 6.

Приборы были установлены согласно схеме проведения измерений (рис. 2). (см. также рис. 7, 8, 9). Платформы роликовых опор во избежание случайного сдвига были зафиксированы гипсовым раствором. Натяжение проволоки осуществлялось грузами массой 1 кг.

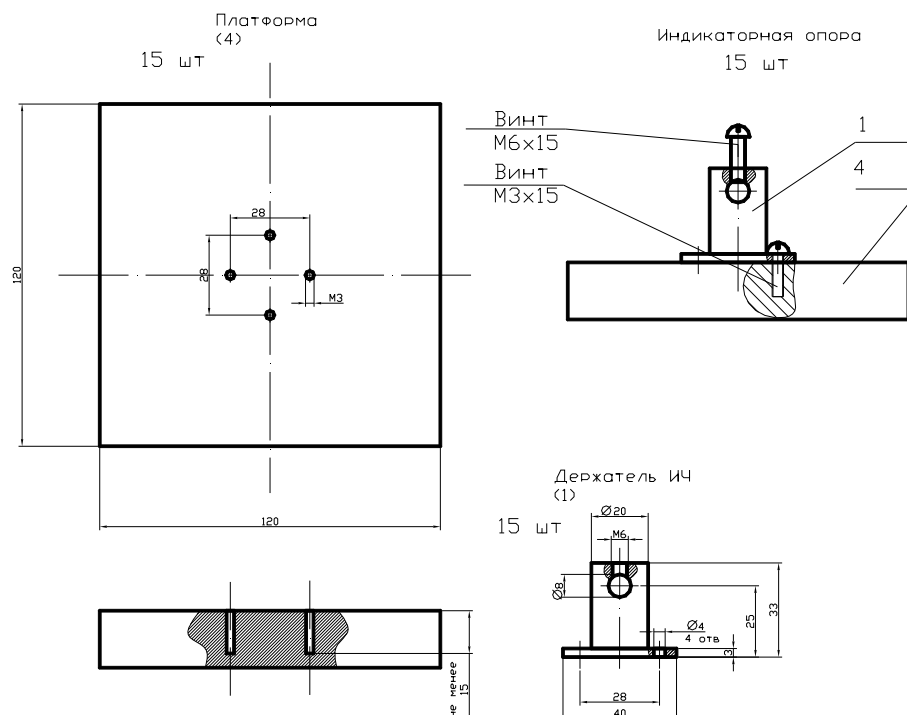


Рис. 4. Индикаторная опора. Детали индикаторной опоры

Fig. 4. Indicator support. Indicator support parts

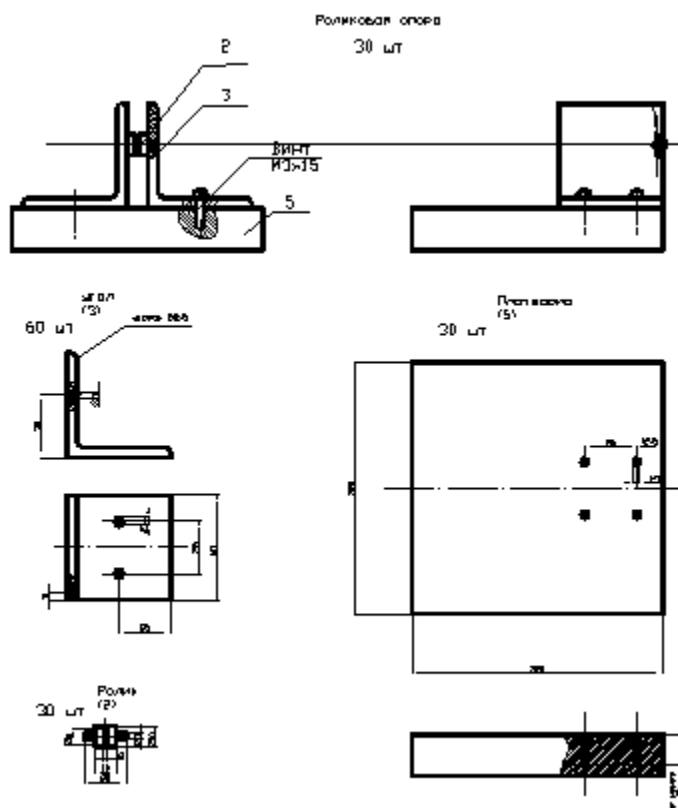


Рис. 5. Роликовая опора. Детали роликовой опоры

Fig. 5. Roller support. Roller parts

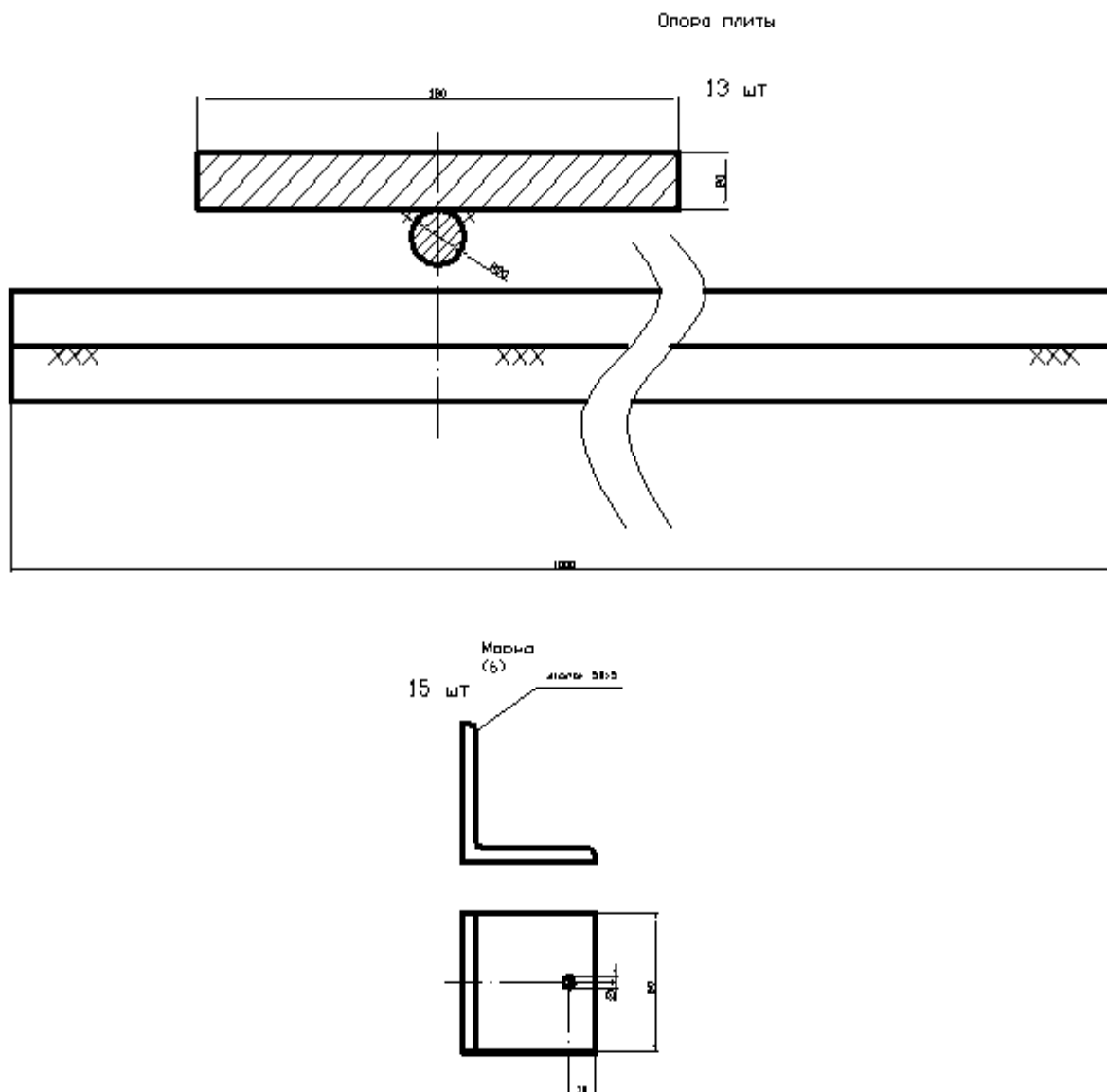


Рис. 6. Опора плиты. Марка

Fig. 6. Plate support. Mark

Ступени нагружения представлены в табл. 2.

Нумерация приборов, точек измерения и расстояния между точками измерения представлены на рис. 9.

Прогибы плиты в точках измерения определяли с учётом осадок опор по

$$\text{формуле } d = c - a - (b - a) \frac{e}{s},$$

где  $d$  – истинный прогиб в точке измерения  $P$ ;

$a, b$  – измеренные перемещения на опорах (осадки опор);

$c$  – измеренное перемещение точки  $P$ ;

$e$  – размер, определяющий положение точки  $P$ ;

$s$  – пролёт плиты (рис. 10).

Характерные результаты измерения прогибов представлены в табл. 3 и на рис. 11, 13, 14, 15, 16, 17.



а)



б)

**Рис. 7. Измерительное оснащение**

**Fig. 7. Measuring equipment**

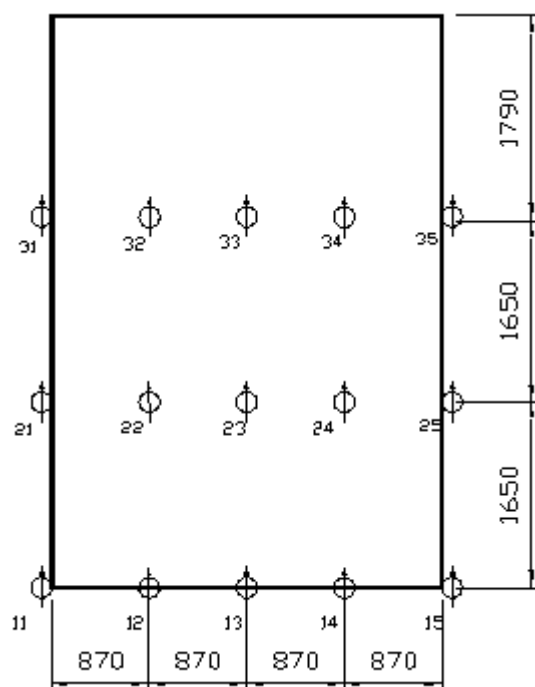


**Рис. 8. Марки**

**Fig. 8. Marks**

**Таблица 2.** Ступени нагружения**Table 2.** Loading stages

| Номер ступени нагружения /<br>Number of loading stage | Грузы, количество поддонов<br>х<br>количество рядов стеновых камней<br>на поддоне / Loads, number of pallets<br>х<br>number of rows of wall stones on the<br>pallet | Общая нагрузка,<br>кН / Total load,<br>kN | Доля от контрольной нагрузки / Fraction of<br>the control load |
|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 0                                                     | Собственный вес плиты                                                                                                                                               | 70,85                                     | 0,36                                                           |
| 1                                                     | 6 х 2                                                                                                                                                               | 101,09                                    | 0,51                                                           |
| 2                                                     | 6 х 2                                                                                                                                                               | 131,33                                    | 0,67                                                           |
| 3                                                     | 6 х 1                                                                                                                                                               | 146,47                                    | 0,75                                                           |
| 4                                                     | 6 х 1                                                                                                                                                               | 161,59                                    | 0,82                                                           |
| 5                                                     | 6 х 3                                                                                                                                                               | 201,95                                    | 1,02                                                           |
| 6                                                     | 6 х 3                                                                                                                                                               | 242,31                                    | 1,22                                                           |
| 7                                                     | 7,5 х 3                                                                                                                                                             | 324,21                                    | 1,64                                                           |

**Рис. 9.** Нумерация приборов, точек измерения и расстояния между точками измерения**Fig. 9.** Numbering of instruments, measuring points and distances between measuring points

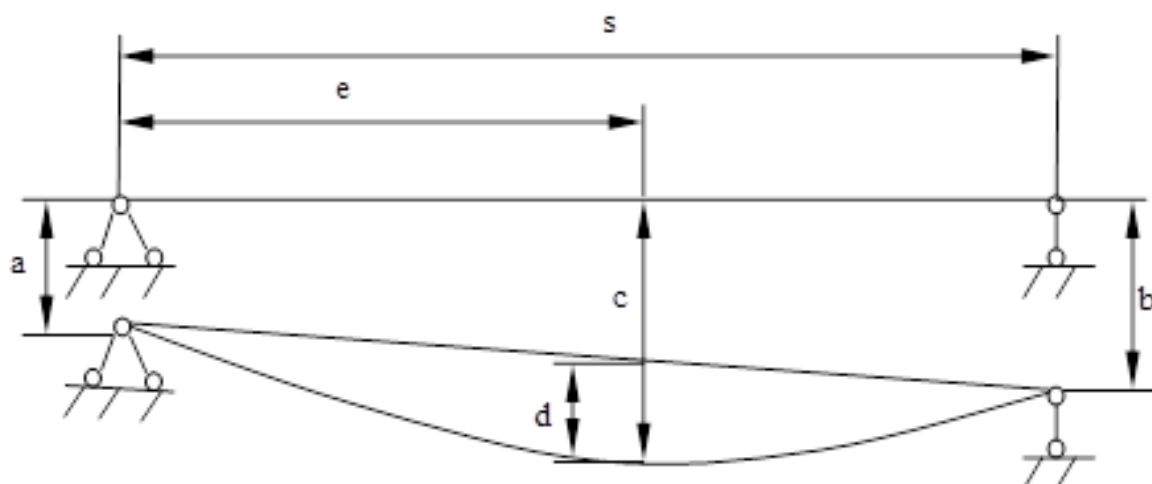


Рис. 10. Схема вычисления истинного прогиба в точке плиты

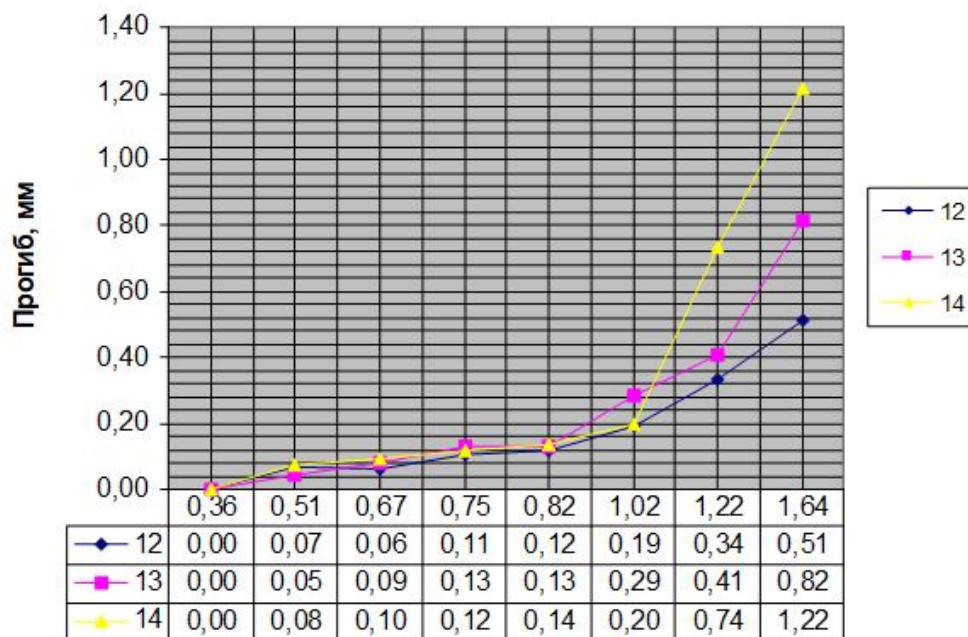
Fig. 10. Scheme for calculating true deflection at a slab point

Таблица 3. Результаты измерения прогибов

Table 3. Deflection measurement results

| Степень нагружения | Отсчёт по прибору |      |       |      |      |
|--------------------|-------------------|------|-------|------|------|
|                    | 11                | 12   | 13    | 14   | 15   |
| Уровень нагружения | Прогиб, мм        |      |       |      |      |
| 0                  | 0,00              | 0,02 | 10,02 | 0,01 | 0,13 |
| 0,36               | 0,00              | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 0,00 |
| 1                  | 0,00              | 0,13 | 10,14 | 0,20 | 0,28 |
| 0,51               | 0,00              | 0,07 | 0,05  | 0,08 | 0,00 |
| 2                  | 0,00              | 0,15 | 10,24 | 0,31 | 0,40 |
| 0,67               | 0,00              | 0,06 | 0,09  | 0,10 | 0,00 |
| 3                  | 0,00              | 0,22 | 10,33 | 0,40 | 0,49 |
| 0,75               | 0,00              | 0,11 | 0,13  | 0,12 | 0,00 |
| 4                  | 0,00              | 0,24 | 10,34 | 0,45 | 0,53 |
| 0,82               | 0,00              | 0,12 | 0,12  | 0,14 | 0,00 |
| 5                  | 0,00              | 0,34 | 10,56 | 0,59 | 0,64 |
| 1,02               | 0,00              | 0,19 | 0,29  | 0,20 | 0,00 |
| 6                  | 0,00              | 0,61 | 10,94 | 1,51 | 1,15 |
| 1,22               | 0,00              | 0,34 | 0,41  | 0,74 | 0,00 |
| 7                  | 0,00              | 0,79 | 11,35 | 2,00 | 1,16 |
| 1,64               | 0,00              | 0,51 | 0,82  | 1,22 | 0,00 |
| Разгрузка          | 0,00              | 0,74 | 11,33 | 2,00 | 1,15 |
| уровень нагрузки   | 0,00              | 0,47 | 0,80  | 1,23 | 0,00 |
| Разгрузка          | 0,00              | 0,65 | 11,30 | 1,97 | 1,15 |
| уровень нагрузки   | 0,00              | 0,53 | 0,77  | 1,20 | 0,00 |

### Прогибы в точках измерения 12, 13, 14



### Уровень нагружения, доли от контрольной нагрузки

Рис. 11. Прогибы в точках измерения 12, 13, 14

Fig. 11. Deflection at measurement points 12, 13, 14

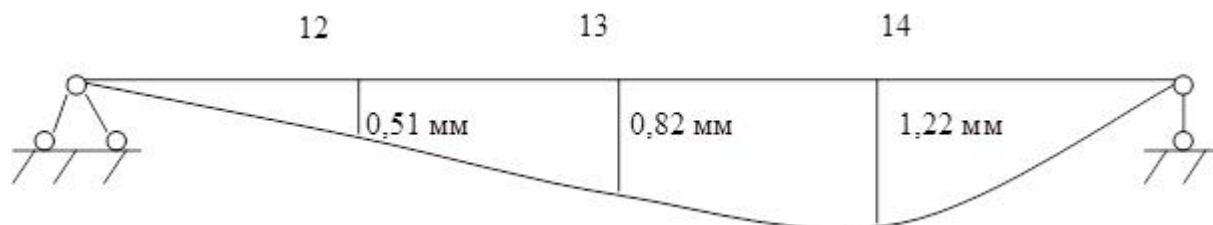


Рис. 12. Схема прогибов в точках измерения 12, 13, 14

Fig. 12. Scheme of deflections at measurement points 12, 13, 14

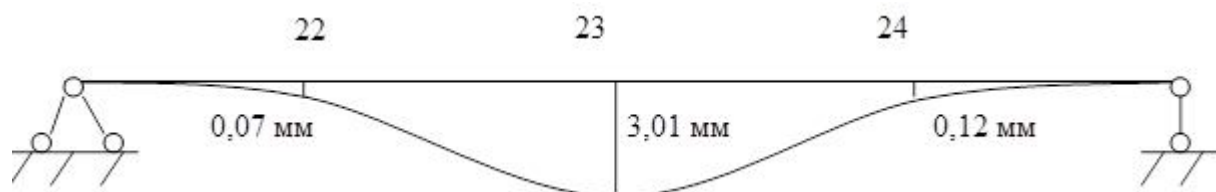
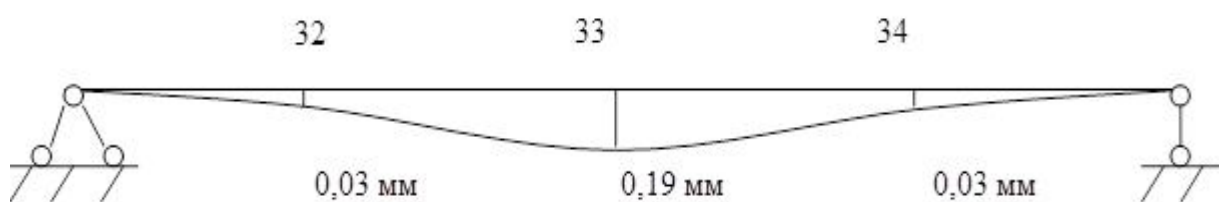


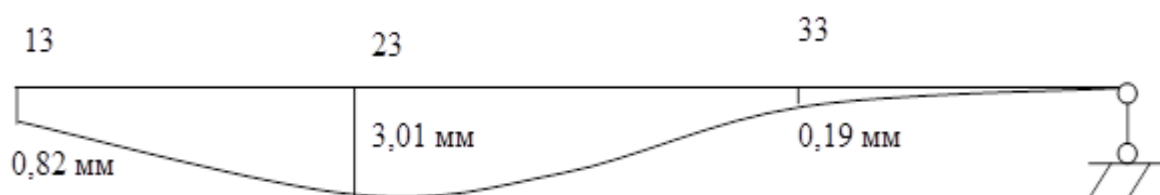
Рис. 13. Схема прогибов в точках измерения 22, 23, 24

Fig. 13. Scheme of deflections at measurement points 22, 23, 24



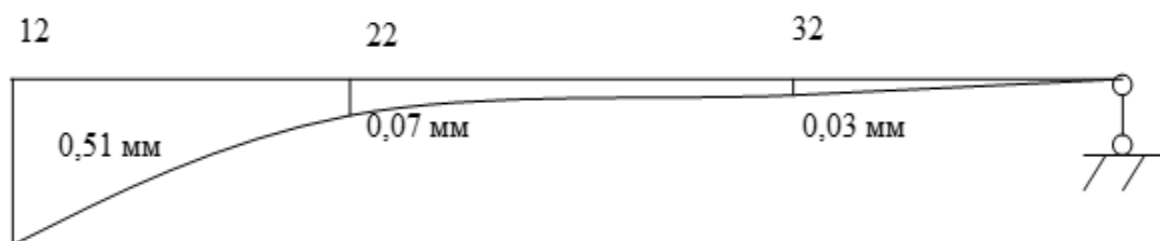
**Рис. 14.** Схема прогибов в точках измерения 32, 33, 34

**Fig. 14.** Scheme of deflections at measurement points 32, 33, 34



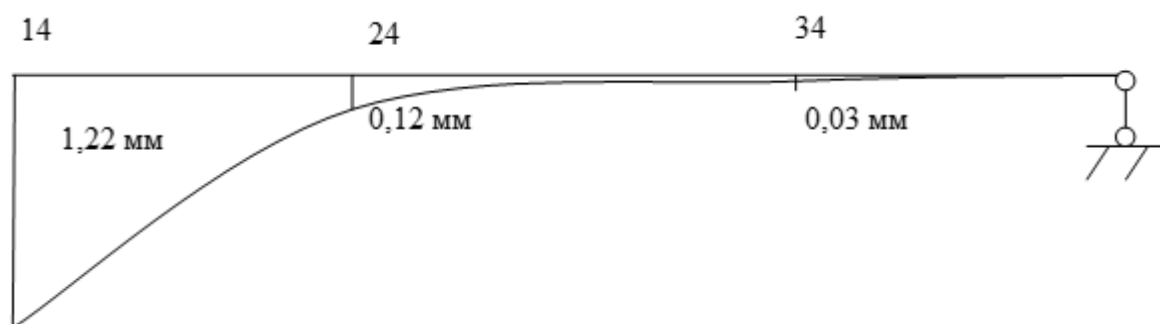
**Рис. 15.** Схема прогибов в точках измерения 13, 23, 33

**Fig. 15.** Scheme of deflections at measurement points 13, 23, 33



**Рис. 16.** Схема прогибов в точках измерения 12, 22, 32

**Fig. 16.** Scheme of deflections at measurement points 12, 22, 32



**Рис. 17.** Схема прогибов в точках измерения 14, 24, 34

**Fig. 17.** Scheme of deflections at measurement points 14, 24, 34

Асимметричная линии прогибов в точках измерения 12, 13, 14 вызвана, видимо, несимметричным армированием плиты в части, близкой к свободному краю.

Прогиб плиты в точке 23 оказался больше, чем в точке 13, что можно объяснить меньшим армированием плиты в средней её части, чем вблизи свободной стороны.

По линиям прогибов 22, 23, 24 и 32, 33 и 34 в четвертях пролётов наблюдаются перегибы кривой, что объясняется тем, что плита работает не по балочной схеме, она опёрта по трём сторонам.

Линии прогибов по точкам 12, 22, 32 и 14, 24, 34 имеют вполне ожидаемую форму: прогибы максимальны у свободного края плиты, имеют среднее значение в её середине и минимальны у опёртого края.

На каждой ступени нагружения проводили осмотр нижней части плиты с целью обнаружения возникших трещин, однако в процессе испытаний визуально трещин обнаружено не было.

Испытания были остановлены по указанию представителя руководства организации-заказчика испытаний из соображений безопасности проведения работ.

### **Результаты и их обсуждение**

Плита была нагружена до уровня 325 кН или 20,1 кПа, что в 1,64 раза превысило контрольную нагрузку с коэффициентом безопасности 1,6, в 2,64 раза превысило расчётную нагрузку и в 3,08 раза нормативную.

Максимальный зафиксированный прогиб при максимальной нагрузке составил 3,01 мм или в долях пролёта 0,0009, что в 7,41 раза меньше допускаемого прогиба от нормативной нагрузки – 0,00667 от длины пролёта. При сравнении значений прогибов следует также иметь в виду, что максимальная нагрузка превышает нормативную в 3,08 раз.

В процессе проведения испытаний не было зафиксировано разрушения или других признаков предельного состояния или местных разрушений: акустической эмиссии, нарастания прогибов без увеличения нагрузки. Приборы не показывали приращений прогибов за время после окончания нагружения очередных ступеней до начала нагружения следующих. Это говорит о том, что при расчёте был заложен большой запас прочности, жёсткости и трещиностойкости.

Запасы по прочности и жёсткости и трещиностойкости, заложенные в стандартизированные СП методы расчёта отмечаются и проектировщиками – практиками. Чаще всего это объясняется одновременным учётом различных коэффициентов надёжности.

По нашему мнению, полученные запасы прочности и жёсткости и трещиностойкости испытанной плиты перекрытия, опёртой по трём сторонам, можно объяснить не только запасами, заложенными при проектировании. Существует теория исследования конструктивных систем с распределёнными параметрами на критических уровнях энер-

гии, показывающая, что классические теории сопротивления материалов, дают значительные запасы прочности и жёсткости [19, 20]. Большинство стандартизированных методик расчёта строительных конструкций, отражённых в действующих сводах правил, основаны именно на классических теориях. Это в значительной степени объясняет те запасы прочности и жёсткости, которые были экспериментально определены в нашей работе.

## Выводы

Уточнение расчётной схемы работы конструкций, оптимальный выбор конечного элемента при расчёте, а также постепенное включение в своды правил методик расчёта строительных конструкций, основанных на теории конструктивных систем с распределёнными параметрами на критических уровнях энергии, позволит разрабатывать более экономичные строительные конструкции.

## Список литературы

1. Турков А. В., Макаров А. А. Экспериментальные исследования систем перекрестных балок из деревянных элементов на квадратном плане с размером ячеек 0,4x0,4 м на динамические и статические нагрузки при изменении податливости связей // Строительство и реконструкция. 2016. № 6(68). С. 51-56. EDN XBKCBH.
2. Коновалов А. М., Кугушев В. И., Яковлев А. Ю. Результаты экспериментального исследования процесса перераспределения энергии собственных колебаний под воздействием демпфирующих факторов // Контроль. Диагностика. 2019. № 5. С. 46-51. DOI 10.14489/td.2019.05.pp.046-051. EDN RNNJBT.
3. Митасов В. М., Чхум А. Деформирование железобетонных балок с формообразующими элементами при длительных нагрузках // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 3. С. 79-84. EDN YUZRZJ.
4. Ахрамочкина Т. И. Теоретические и экспериментальные исследования сталежелезобетонных конструкций с применением гнутых стальных профилей // Строительство: наука и образование. 2021. Т. 11, № 4. С. 27-40. DOI 10.22227/2305-5502.2021.4.3. – EDN AKOINX.
5. Ахрамочкина Т. И. Экспериментальные исследования силы сцепления стальной оцинкованной пластины и бетона // Строительство: наука и образование. 2021. Т. 11, № 2. С. 1-16. DOI 10.22227/2305-5502.2021.2.1. EDN KBWBVW.
6. Турков А. В., Макаров А. А., Ветрова О. А. Экспериментальные исследования систем перекрестных балок на квадратном плане с размером ячеек 0,4x0,4 м с покрытием при различных схемах опирания на динамические и статические нагрузки // Строительство и реконструкция. 2017. № 1(69). С. 82-89. EDN YGDJGB.
7. Сапожников С. Б., Иванов М. А., Щербаков И. А. Оценка предельной нагрузки сварных соединений высокопрочных сталей с учетом их механической и геометриче-

ской неоднородности // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2020. № 1. С. 99-108. DOI 10.15593/perm.mech/2020.1.08. EDN ОСВРВЕ.

8. Филатов В. Б., Жильцов Ю. В., Коваленко М. В. Экспериментальное исследование работы жёсткого поперечного армирования железобетонных балок в зоне среза // Вестник евразийской науки. 2020. Т. 12, № 2. С. 16. EDN RKMCKI.

9. Viet Duc Nguyen, Van Binh Phung Static bending, free vibration, and buckling analyses of two-layer FGM plates with shear connectors resting // Alexandria Engineering Journal. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.07.038>

10. Pietro Croce et al. / Procedia Structural Integrity 11 (2018). P. 363–370.

11. Atef Eraky, Ahmed M. Anwar b , Alaa Saad a , Ayman Abdo, Damage detection of flexural structural systems using damage index method – Experimental approach // Alexandria Engineering Journal. 2015. 54, 497–507. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2015.05.015>

12. Ning Zhuang, Honghan Dong, Da Chen, Yeming Ma. Experimental Study of Aged and Seriously Damaged RC Beams Strengthened Using CFRP Composites // Advances in Materials Science and Engineering Volume 2018, Article ID 6260724, 9 pages <https://doi.org/10.1155/2018/6260724>

13. Chittaranjan B. Nayak, Giridhar N. Narule, Harshwardhan R. Surwase. Structural and cracking behaviour of RC T-beams strengthened with BFRP sheets by experimental and analytical investigation // Journal of King Saud University – Engineering Sciences 34 (2022) 398–405. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.01.001>

14. N. Jeevan a, B.S. Keerthi Gowda b, D.P. Archana a, Abdul Razak c, Mohamed Abbas d e, C. Ahamed Saleel Experimental study on flexural strengthening of RC beams with NSM technique by different orientation of CFRP laminate // Ain Shams Engineering Journal. February 2023., Vol. 14. Is. 1. 101823 <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101823>

15. Guangzhen Qu, 1,2 Pingming Huang,1 Guangli Zhou , 2 and Sizhong Lv Experimental Research on Fatigue Behavior of Existing Reinforced Concrete Beams // Advances in Civil Engineering Volume 2020, Article ID 8858945, 13 pages <https://doi.org/10.1155/2020/8858945>

16. Qingfu Li,1,2 Wei Guo , 1,2 Chenhui Liu,1,2 Yihang Kuang , 1,2 and Huitao Geng Experimental and Theoretical Studies on Flexural Performance of Stainless Steel Reinforced Concrete Beams // Advances in Civil Engineering Volume 2020, Article ID 4048750, 13 pages <https://doi.org/10.1155/2020/4048750>

17. Ступишин Л. Ю., Мошкевич М. Л. Решение задач об изгибе балки на основе вариационного критерия критических уровней энергии // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16, № 3. С. 306-316. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.306-316. EDN NCBVQD.

18. Ступишин Л. Ю. Критические уровни внутренней потенциальной энергии деформации твердых деформируемых тел. М., 2022. 387 с.

19. Ступишин Л. Ю., Масалов А. В. Архитектурно-конструктивные принципы строительства деревянных зданий возрастом более ста лет // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(3): 41-55. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-41-55>. EDN OFGJZU.

## References

1. Turkov A., Makarov A. A. Eksperimental'nye issledovaniya sistem perekrestnykh balok iz derevyannykh elementov na kvadratnom plane s razmerom yacheek 0,4x0,4 m na dinamicheskie i staticheskie nagruzki pri izmenenii podatlivosti svyazei [Pilot studies of systems of cross beams from wooden elements on the square plan with a size of cells of 0,4x0,4 m for dynamic and static loadings at change of the pliability of communications]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya = Construction and Reconstruction*. 2016, no. 6(68), pp. 51-56. EDN XBKCBH.

2. Konovalov A.M., Kugushev V.I., Yakovlev A. Yu. Rezul'taty eksperimental'nogo issledovaniya protsessa pereraspredeleniya energii sobstvennykh kolebaniy pod vozdeistviem dempfiruyushchikh faktorov [The results of experimental studies of the process of redistribution of self-oscillation energy under the influence of attenuates]. *Kontrol'. Diagnostika = Control. Diagnostics*, 2019, no. 5, pp. 46-51. DOI 10.14489/td.2019.05. pp.046-051. EDN RNNJBT.

3. Mitsov V. M. Chkhum A. Deformirovanie zhelezobetonnykh balok s formoobrazuyushchimi elementami pri dlitel'nykh nagruzkakh [Deformation of reinforced concrete beams with forming elements under long-term loading]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern Knowledge-intensive Technologies*, 2018, no. 3, pp. 79-84. EDN YUZRZJ.

4. Akhramochkina Tatiana I. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya stalezhelezobetonnykh konstruksii s primeneniem gnutykh stal'nykh profilei [Theoretical and experimental studies of steel-reinforced concrete structures that have bent steel sections]. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie = Construction: Science and Education*, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 27-40. DOI 10.22227/2305-5502.2021.4.3. EDN AKOINX.

5. Akhramochkina T. I. Eksperimental'nye issledovaniya sily stsepleniya stal'noi otsinkovannoi plastiny i betona [Experimental studies of the adhesion force between a zinc-coated steel plate and concrete]. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie = Construction: Science and Education*. 2021, vol. 11, no. 2, pp. 1-16. DOI 10.22227/2305-5502.2021.2.1. EDN KBWBVW.

6. Turkov A., Makarov A., Vetrova O. Eksperimental'nye issledovaniya sistem perekrestnykh balok na kvadratnom plane s razmerom yacheek 0,4x0,4 m s pokrytiem pri razlichnykh skhemakh opiraniya na dinamicheskie i staticheskie nagruzki [Pilot studies of systems of cross beams on the square plan with a size of cells of 0,4x0,4 m the covering at various schemes supporting on dynamic and static loadings]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya = Construction and Reconstruction*, 2017, no. 1(69), pp. 82-89. EDN YGDJGB.

7. Sapozhnikov S.B., Ivanov M.A., Shcherbakov I.A. Otsenka predel'noi nagruzki svarnykh soedinenii vysokoprochnykh stalei s uchetom ikh mekhanicheskoi i geometricheskoi neodnorodnosti [The ultimate load estimation of welded joints of high-strength steels subject to mechanical and geometric heterogeneity]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo poli-tekhnicheskogo universiteta. Mekhanika = Bulletin of the Perm National Research Polytechnical University. Mechanics*, 2020, no. 1, pp. 99-108. DOI 10.15593/perm.mech/2020.1.08. EDN OCBPBE.
8. Filatov V.B., Zhiltsov Yu.V., Kovalenko M.V. Eksperimental'noe issledovanie raboty zhestkogo poperechnogo armirovaniya zhelezobetonnykh balok v zone sreza [Experimental study of the work of the rigid transverse reinforcement of reinforced concrete beams in the shear zone]. *Vestnik evraziiskoi nauki = Bulletin of Eurasian Science*, 2020, vol. 12, no. 2, pp. 16. EDN RKMCKI.
9. Viet Duc Nguyen, Van Binh Phung Static bending, free vibration, and buckling analyses of two-layer FGM plates with shear connectors resting. *Alexandria Engineering Journal*, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.07.038>
10. Pietro Croce et al. / *Procedia Structural Integrity* 11 (2018) 363–370.
11. Atef Eraky, Ahmed M. Anwar b , Alaa Saad , Ayman Abdo, Damage detection of flexural structural systems using damage index method – Experimental approach. *Alexandria Engineering Journal* (2015) 54, 497–507. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2015.05.015>
12. Ning Zhuang, Honghan Dong, Da Chen, and Yeming Ma. Experimental Study of Aged and Seriously Damaged RC Beams Strengthened Using CFRP Composites. *Advances in Materials Science and Engineering*. Vol. 2018, Article ID 6260724, 9 pages <https://doi.org/10.1155/2018/6260724>
13. Chittaranjan B. Nayak, Giridhar N. Narule, Harshwardhan R. Surwase. Structural and cracking behaviour of RC T-beams strengthened with BFRP sheets by experimental and analytical investigation. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences* 34 (2022) 398–405. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.01.001>
14. N. Jeevan, B.S. Keerthi Gowda, D.P. Archana, Abdul Razak, Mohamed Abbas . Ahamed Saleel Experimental study on flexural strengthening of RC beams with NSM technique by different orientation of CFRP laminate. *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 14, is. 1, February 2023, 101823 <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101823>
15. Guangzhen Qu, Pingming Huang, Guangli Zhou, and Sizhong Lv Experimental Research on Fatigue Behavior of Existing Reinforced Concrete Beams. *Advances in Civil Engineering*. Vol. 2020, Article ID 8858945, 13 pages <https://doi.org/10.1155/2020/8858945>
16. Qingfu Li, Wei Guo, Chenhui Liu, Yihang Kuang, Huitao Geng Experimental and Theoretical Studies on Flexural Performance of Stainless Steel Reinforced Concrete Beams. *Advances in Civil Engineering*. Vol. 2020, Article ID 4048750, 13 pages <https://doi.org/10.1155/2020/4048750>

17. Stupishin L. Yu., Moshkevich M. L. Reshenie zadach ob izgibe balki na osnove variatsionnogo kriteriya kriticheskikh urovnei energii [Problems of beam bending solution on the basis of variation criterion of critical energy levels]. *Vestnik MGSU*, 2021, vol. 16, no. 3, pp. 306-316. DOI 10.22227/1997-0935.2021.3.306-316. EDN NCBVQD.

18. Stupishin L. Yu. *Kriticheskie urovni vnutrennei potentsial'noi energii de-formatsii tverdykh deformiruemyykh tel* [Critical levels of internal potential deformation energy of solid deformable bodies]. Moscow, 2022. 387 p.

19. Stupishin L. Yu., Masalov A.V. Architectural and Structural Principles of Construction of Wooden Buildings over a Hundred Years Old. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(3): 41-55 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-41-55>.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Масалов Александр Васильевич**, кандидат технических наук, доцент, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: masalow.al@ya.ru

**Alexander V. Masalov**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: masalow.al@ya.ru

**Филатов Юрий Борисович**, кандидат технических наук, доцент кафедры строительной и теоретической механики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: FilatovYB@mgsu.ru

**Yuri B. Filatov**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Structural and Theoretical Mechanics National Research Moscow State Construction University, Moscow, Russian Federation, e-mail: FilatovYB@mgsu.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-62-74>



## Efficiency of Operation of Air Heat Pumps with Evaporators of Various Designs

Tat'yana N. Il'ina <sup>1</sup>✉, Pavel A. Orlov <sup>1</sup>, Alina O. Echina <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

46, Kostyukova str., Belgorod 308012, Russian Federation

✉ e-mail: [ilina50@rambler.ru](mailto:ilina50@rambler.ru)

### Abstract

**Resume.** The development of the heat pump market ensures the growth of energy prices, the fight against global warming and the stimulation of the growth rates of countries in transition to "clean energy sources". the most environmentally friendly and energy efficient, taking into account the cost of their installation and the impact of air source heat pumps compared to geothermal ones. However, their use in countries with cold climates is limited by the formation of frost on the evaporator unit heat exchanger, which significantly increases their heating capacity and conversion efficiency.

**Purpose of research.** The purpose of this work is to compare the efficiency of heat pumps with an evaporative circuit heat exchanger manufactured by MITSUI (Japan) and a heat exchanger with a MOVEBIT defroster manufactured by ALTEC (Russia).

**Methods.** The research methodology is based on large laboratory tests of an evaporator with an oscillatory circuit of the MOVEBIT system (ALTEC - Russia) and an industrial heat exchanger MITSUI (Japan), a graphical analysis of the operation of a heat pump with common evaporators, and a theoretical substantiation of the transformation ratio. To compare the main standardized performance indicators, the transformation coefficient (COP – coefficient of performance) is used, showing the ratio of received energy to applied work.

**Results.** The analysis of the results of the heat pump operation showed that while maintaining the humidity at a constant level of  $\varphi \approx 65\%$  and lowering the temperature from  $+10^{\circ}\text{C}$  to  $+5^{\circ}\text{C}$ , a decrease in the heat output of the unit is observed, regardless of the type of MOVEBIT and MITSUI heat exchanger, which is explained by the formation of condensate. With a further decrease in temperature to zero and below, ice forms on the evaporator of the heat exchanger. Taking into account the cost of removing ice on the MITSUI heat exchanger, the transformation ratio of the heat pump unit (HPU) is 2.08. The removal of ice by the MOVEBIT system practically does not require additional costs and the transformation ratio of the installation is 4.45, which is similar to the operation of an air source heat pump at positive temperatures.

**Conclusion.** Our studies show that the best prospect for de-icing is the application of mechanical oscillations with the use of magneto-constrictive transducers. The COP of the air source heat pump with the MOVEBIT system exceeds the COP of the heat pump with the MITSUI standard evaporator by 2 times at a temperature of  $0^{\circ}\text{C}$  and below.

**Keywords:** Heat pump; evaporator; ice; transformation coefficient; energy consumption; heating capacity.

**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 carried out as part of the implementation of the program to support universities "Priority 2030" on the basis of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov using the equipment of the Center for High Technologies at BSTU. V.G. Shukhov.

**For citation:** Il'ina T. N., Orlov P.A., Echina A.O. Efficiency of Operation of Air Heat Pumps with Evaporators of Various Designs. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(2): 62-74 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-62-74>.

Received 06.04.2023

Accepted 19.05.2023

Published 02.08.2023

## Эффективность работы воздушных тепловых насосов с испарителями различных конструкций

Т. Н. Ильина<sup>1</sup> ✉, П.А. Орлов<sup>1</sup>, А.О. Ечина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова  
ул. Костюкова, д.46, г. Белгород 308012, Российская Федерация

✉ e-mail: ilina50@rambler.ru

### Резюме

Развитие рынка тепловых насосов обусловлено ростом цен на энергоресурсы, борьбой с глобальным потеплением и стимулированием правительствами развитых стран перехода на «чистые источники энергии». Наиболее экологически безопасными и энергоэффективными с учетом затрат на их прокладку и эксплуатацию являются воздушные тепловые насосы по сравнению с геотермальными. Однако их применение в странах с холодным климатом ограничено образованием наледи на теплообменнике испарительного блока, что значительно снижает их теплопроизводительность и коэффициент преобразования.

**Цель исследования.** Целью настоящей работы является сравнение эффективности работы тепловых насосов с теплообменником испарительного контура производства MITSUI (Япония) и теплообменника с антиобледенителем MOVEBIT производства АЛТЕК (Россия).

**Методы.** Методология исследования базируется на проведении лабораторных испытаний испарителя с колебательным контуром системы MOVEBIT (АЛТЭК – Россия) и теплообменника промышленного производства MITSUI (Япония), графоаналитического анализа работы теплового насоса с различными испарителями, теоретического обоснования полученных значений коэффициента трансформации. Для сравнения основных стандартизированных эксплуатационных показателей используется коэффициент трансформации (COP), показывающий отношение полученной энергии к затраченной работе.

**Результаты.** Анализ результатов работы теплового насоса показал, что при сохранении влажности на постоянном уровне  $\varphi \approx 65\%$  и понижении температуры с  $+10^\circ\text{C}$  до  $-5^\circ\text{C}$  наблюдается снижение теплопроизводительности установки, независимо от вида теплообменника MOVEBIT и MITSUI. Однако при использовании теплообменника MOVEBIT теплопроизводительность установки на 10,1% выше, чем с теплообменником MITSUI. Это объясняется наличием на испарителе теплообменника MITSUI наледи, уменьшающей его теплопередающие способности.

**Заключение.** Проведенные нами исследования показали, что наиболее перспективным способом удаления наледи является применение механических колебаний с помощью магнитострикционных излучателей. COP воздушного теплового насоса с системой MOVEBIT превышает COP теплового насоса со стандартным испарителем MITSUI в 2 раза при температуре  $0^\circ\text{C}$  и ниже.

**Ключевые слова:** тепловой насос; испаритель; наледь; коэффициент трансформации; энергопотребление; теплопроизводительность.

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

**Финансирование.** Данная работа проводилась в рамках реализации программы поддержки вузов "Приоритет 2030" на базе Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова с использованием оборудования Центра высоких технологий при БГТУ им. В.Г. Шухова.

**Для цитирования:** Ильина Т. Н., Орлов П.А., Ечина А.О. Эффективность работы воздушных тепловых насосов с испарителями различных конструкций // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(2): 62-74. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-62-74>.

Поступила в редакцию 06.04.2023

Подписана в печать 19.05.2023

Опубликована 02.08.2023

\*\*\*

## Introduction

The development of the heat pump market is resulted from the rising of energy prices, the fight against global warming and stimulating the transition to "clean energy sources" by the governments of developed countries. The Russian government, like other advanced countries of the world, has focused on the influx of new promising projects [1]. The general global trend of transition of heat supply of engineering systems to the use of renewable energy sources should be noted [2-4], as well as secondary thermal emissions using heat pumps [5-7]. All types of air source heat pump evaporators carry out heat exchange between air and the refrigerant passing through the vapor-liquid phase. The efficiency of heat transfer is determined by factors such as the speed of the refrigerant, its quantity, temperature difference, the material of the heat exchanger, the shape, the presence of various deposits in the form of dust, ice. The existence of various types of evaporators is motivated by the design requirements and technical conditions for a heat pump [8-12]. The most environmentally friendly and energy efficient, taking into account the cost of their installation and operation, are air source heat pumps compared to geothermal ones [13]. However, their use in countries with cold climates is limited by the

formation of frost on the heat exchanger of the evaporator unit, which significantly reduces their heating capacity and conversion efficiency. Our studies have shown that the most promising way to remove frost is the use of mechanical oscillations with the use of magneto-constrictive transducers [14].

The purpose of this work is to compare the efficiency of heat pumps with an evaporative circuit heat exchanger manufactured by MITSUI (Japan) and a heat exchanger with a MOVEBIT defroster manufactured by ALTEC (Russia) [15]. To compare the main standardized performance indicators, COP is used – the coefficient of performance, which shows the ratio of the received energy  $Q_r$  to the energy loss for its transformation  $Q_l$ , which includes the costs of the compressor, fans and consumption of various electronic equipment responsible for the operation of the heat pump.

## Materials and methods

Due to the of lack of mass-produced air source heat pumps capable of operating with zero overheating on the market, a number of changes were made to the equipment used in the tests: an after-boil receiver tank was additionally installed on the suction line, and the throttle device was equipped with a stepper motor with electronic control of the refrigerant supply,

for visual control, sight glasses were installed in the liquid and gas lines. In laboratory tests, a 9m<sup>2</sup> refrigerator, an ultrasonic air humidifier in the refrigerator, an air heat pump with electronic throttling control, a heat exchanger manufactured by ALTEK (Russia), a heat exchanger manufactured by MITSUI (Japan), and measuring equipment TESTO (Germany) were used. As part of laboratory tests, it was decided to take into account the cost of electricity for the operation of the compressor, respectively  $Q_l$ , watt (W):

$$Q_l = L + Q_f - Q_v, \quad (1)$$

notation  $Q_f$  – the energy costs for frost control, W;

$L$  – the indicated output, W;

$Q_v$  – the expenditure of energy consumed by EEV (electronic expansion valve), fans of the outdoor and indoor units, Wt.

The evaporator cooling capacity  $Q_u$ , which is designed for laboratory testing purposes, is determined by equation, W:

$$Q_u = Q_k - Q_l. \quad (2)$$

notation  $Q_k$  – the total refrigerant heat rejection effect, W;

$Q_l$  – the heating capacity of the compressor, W.

The selection of the evaporator area  $F_u$  is carried out according to the formula [16], W:

$$F_u = \frac{Q_u}{K_u \cdot \Delta t_m}. \quad (3)$$

The mean temperature difference in the evaporator  $\Delta t_m, ^\circ\text{C}$ :

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_h - \Delta t_l}{\ln(\Delta t_h / \Delta t_l)} \quad (4)$$

notation  $\Delta t_h$  и  $\Delta t_l$  – the highest or the lowest differential temperature between the heat-transfers at the inlet and outlet of the heat exchanger respectively,  $^\circ\text{C}$ ;

$$\Delta t_h = t_1 - t_2;$$

$$\Delta t_l = t_3 - t_2;$$

$t_1$  – the air inlet temperature of the evaporator,  $^\circ\text{C}$ ;

$t_2$  – the boiling point of the refrigerant,  $^\circ\text{C}$ ;

$t_3$  – the air downstream temperature of the evaporator,  $^\circ\text{C}$ .

A new generation evaporator with an oscillatory circuit of the MOVEBIT system has passed a series of tests and has shown its promise. The surface of the heat exchanger is 6 m<sup>2</sup>. Subtracting rounding angles and other elements that do not affect the heat transfer process, we take the surface  $F_t$  equal to 5.9 m<sup>2</sup>.

The capacity of the (axial) fan is 700 m<sup>3</sup>/h.

We find the heat output by the formula, W:

$$Q_m = p \cdot S \cdot V \cdot c \cdot (t_2 - t_1), \quad (5)$$

notation:  $p$  – the air density – 1.2041 kg/m<sup>3</sup> at  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ ;

$S$  – the area of the cross-section of the airway – 0.0177 m<sup>2</sup>;

$Q_m$  – the air flow rate, m/s [annex 15 table 1];

$t_l$  – the air inlet temperature of the condenser,  $^\circ\text{C}$  [annex 11 table 1];

$t_2$  – the air downstream temperature of the condenser, °C [annex 12 table 1];

$c$  – the heat capacity volume of the air – 1050 J/kg·K.

Calculation of the cost of electricity for defrosting the evaporator is based on the calculation of condensate on the evaporator and the cost of energy for its removal by means of electrical heating. The calculation is carried out according to the equation:

$$Q_r = p \cdot V \cdot \lambda \cdot m_k + p \cdot V \cdot c \cdot m_k \cdot \Delta t, \quad (6)$$

notation:  $\lambda$  – the specific melting heat of ice is taken – 340 KJ/kg;

$m_k$  – the specific ice mass (condensate), kg;

$c$  – the specific heat (for ice 2.1 KJ/kg °C);

$\Delta t$  – the difference between the initial ice temperature and the melting point °C;

$p$  – the air density, kg/m<sup>3</sup>;

$V$  – the air mass passing through the evaporator, m<sup>3</sup>.

The amount of condensate crystallizing on the surface of the evaporator during the passage of an air flow with a volume ( $V = 1 \text{ m}^3$ ) through the evaporator in the form of ice and frost is calculated by the formula:

$$m_i = \frac{d_n - d_i}{10^3}, \quad (7)$$

notation:  $d_n$  – the moisture content of the external air, g/kg;

$d_i$  – the moisture content of the air at the boiling point of the refrigerant in the evaporator (the figure is taken according to the i-d diagram), g/kg.

## Results and discussion

Tests of the heat pump unit (HPU) were carried out at outdoor temperatures of -5, 0, 5.10 °C. The results of testing HPU with an evaporator manufactured by MITSUI and MOVEBIT are presented in the table 1.

Based on the test results presented in the table, using equation (1), we can calculate the energy costs for the operation of the compressor:

$$Q_l = L + Q_f - Q_v = 700 + 168 + 10 = 878, \text{ W}. \quad (8)$$

Using formula (2), we determine the cooling capacity of the evaporator  $Q_i$  intended for laboratory testing:

$$Q_u = Q_k - Q_l = 3000 - 700 = 2300, \text{ Wt}. \quad (9)$$

The calculated heat transfer surface, for test conditions, is calculated according to equation (4).

The heat transfer coefficient  $K$  is calculated according to the formulas [17, 18], but in this case it is determined with a high degree of accuracy from the tabular values  $K = 23.8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ .

An analysis of the results of the heat pump operation showed that while maintaining the humidity at a constant level  $\varphi \approx 65\%$  and lowering the temperature from +10°C to +5°C, a decrease in the heat output of the unit is observed, regardless of the type of heat exchanger, MOVEBIT and MITSUI. However, when using the MOVEBIT heat exchanger, the heating capacity of the installation is 10.1% higher than with the MITSUI heat exchanger. This is due to the presence of frost on the evaporator of the MITSUI heat exchanger, which reduces its heat transfer capabilities.

**Table 1.** Test results of HPU at temperatures before the evaporator unit -5, 0, 5, 10°C

| №  | Measurable values                                                      | Units of measurement | The evaporator manufactured by MITSUI |            |            |            | The evaporator manufactured by MOVEBIT |       |       |       |
|----|------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------|------------|------------|------------|----------------------------------------|-------|-------|-------|
|    |                                                                        |                      | Temperature                           |            |            |            |                                        |       |       |       |
|    |                                                                        |                      | 10 °C                                 | 5 °C       | 0°C        | -5°C       | 10°C                                   | 5°C   | 0°C   | -5°C  |
| 1  | The low pressure                                                       | bar                  | 6.56                                  | 5.52       | 3.81       | 3.35       | 5.40                                   | 4.07  | 3.55  | 3.02  |
| 2  | The temperature of the refrigerant gas                                 | °C                   | -1.6                                  | -6.1       | -14.9      | -17.6      | -6.7                                   | -13.4 | -16.4 | -19.7 |
| 3  | The temperature of the gas pipeline                                    | °C                   | 6.4                                   | 1.8        | -8.1       | -10.7      | 0.6                                    | -8.3  | -7.0  | -9.1  |
| 4  | The overheating                                                        | K                    | 8.0                                   | 7.9        | 6.8        | 6.9        | 7.3                                    | 5.2   | 9.4   | 10.7  |
| 5  | The air inlet temperature of the evaporator                            | °C                   | 10.0                                  | 5.0        | 0.0        | -5.0       | 10.0                                   | 5.0   | 0.0   | -5.0  |
| 6  | The air downstream temperature of the evaporator                       | °C                   | 6.8                                   | 1.7        | -4.0       | -8.6       | 6.7                                    | 1.3   | -3.4  | -8.0  |
| 7  | The high pressure                                                      | bar                  | 22.23                                 | 21.44      | 20.07      | 20.20      | 21.80                                  | 20.90 | 20.20 | 19.70 |
| 8  | The gas temperature                                                    | °C                   | 38.3                                  | 36.9       | 34.3       | 34.5       | 37.5                                   | 35.9  | 34.6  | 33.6  |
| 9  | The temperature of the liquid pipeline                                 | °C                   | 28.2                                  | 26.9       | 25.9       | 28.0       | 29.3                                   | 26.7  | 26.1  | 25.2  |
| 10 | The over cooling                                                       | K                    | 10.1                                  | 9.9        | 8.5        | 6.5        | 8.2                                    | 9.2   | 8.5   | 8.3   |
| 11 | The air inlet temperature of the condenser                             | °C                   | 21.6                                  | 21.4       | 21.4       | 22.6       | 21.5                                   | 21.7  | 21.4  | 21.0  |
| 12 | The air downstream temperature of the condenser                        | °C                   | 34.7                                  | 32.7       | 33.0       | 32.5       | 35.1                                   | 35.2  | 33.4  | 32.4  |
| 13 | The electricity costs to defrost the evaporator actual /calculated     | W/h                  | 0<br>22                               | 158<br>196 | 529<br>492 | 402<br>350 | 0                                      | 12    | 12    | 12    |
| 14 | The humidity inside the chamber                                        | %                    | 64.3                                  | 65.5       | 66.4       | 63.3       | 67                                     | 64.1  | 63.2  | 65.9  |
| 15 | The air flow rate downstream of the capacitor                          | m/s                  | 10.50                                 | 10.71      | 10.11      | 10.46      | 10.39                                  | 10.7  | 10.39 | 9.94  |
| 16 | The active power (the wattage)                                         | W                    | 637                                   | 692        | 643        | 670        | 643                                    | 653   | 602   | 557   |
| 17 | The heating capacity                                                   | W                    | 2927                                  | 2602       | 2502       | 2204       | 3012                                   | 3003  | 2721  | 2417  |
| 18 | COP with no de-icing costs / taking into account the costs of de-icing | COP                  | 4.60                                  | 4.05       | 3.58       | 3.29       | 4.70                                   | 4.60  | 4.52  | 4.34  |
|    |                                                                        |                      | 4.60                                  | 3.00       | 2.10       | 2.05       | 4.70                                   | 4.50  | 4.40  | 4.20  |

The second factor in reducing productivity is lowering the temperature of the low-grade heat source. The calculations assume a decrease in the transformation ratio by 1% with a decrease in the temperature of the source of low-grade heat (air) by 1°C. Accordingly, a decrease in COP is a natural test result.

When measuring the parameters of the heat pump, the costs of electricity for the operation of the defrosting system were highlighted in a separate column, item 13 of the table. Defrosting requires the maximum amount of energy at  $t_l = 0^\circ\text{C}$  and is  $Q = 529\text{ W}$ , which exceeds the calculated amount of electricity by 7%. This is due to an increase in energy consumption for heating not only ice, but also the heating of structural and heat transfer elements that make up the evaporator, as well as the air surrounding the evaporator.

A decrease in the ambient temperature does not lead to an increase in the energy consumption for defrosting the evaporator. As the experiments showed, with a decrease in the temperature in the chamber by 5°C, the energy consumption decreased by 24%, exceeding the calculated values by 4%. This is an acceptable indicator that does not distort the overall dynamics of energy consumption for defrosting a standard evaporator using the electric heating method [19, 20].

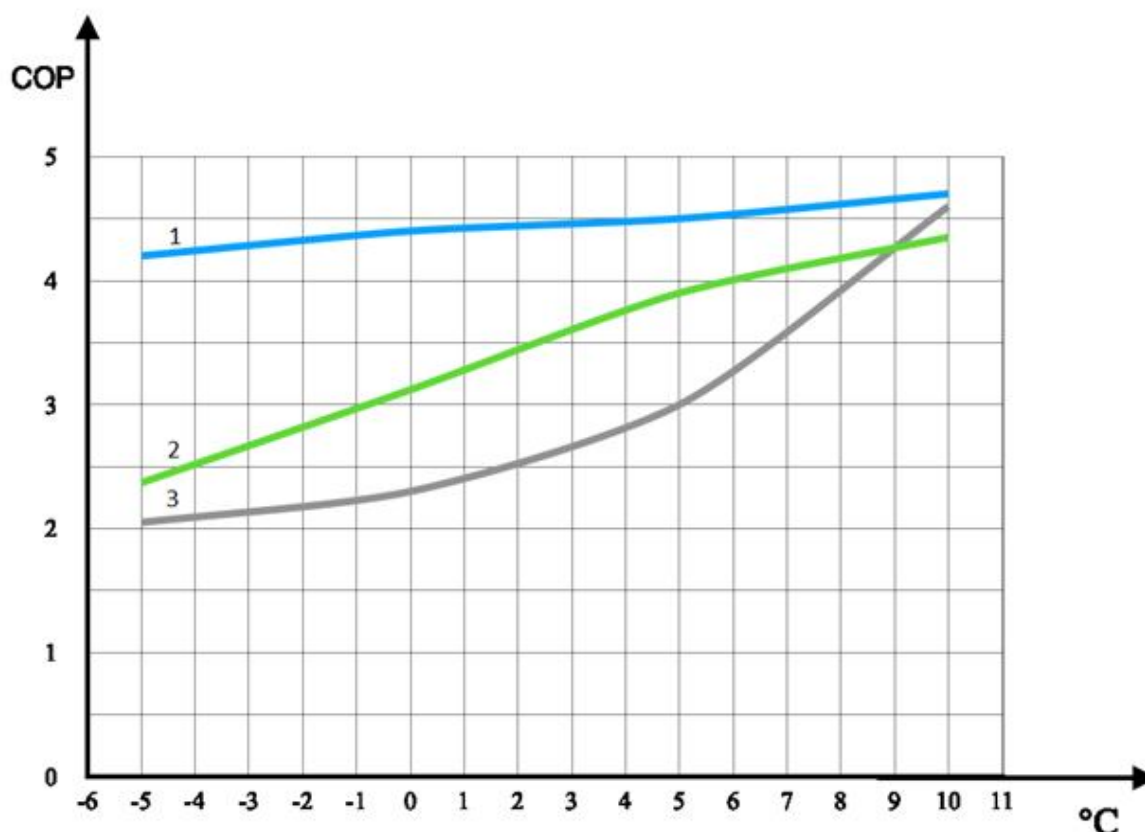
When the outdoor temperature rises above 0°C, the energy consumption for defrosting is reduced. At a temperature of +10°C, its theoretical consumption is 22 W.

Practical tests have shown that the accumulation of condensate in the form of frost occurs only in places that do not fall under the air flows created by the fan (on the evaporator coils and in non-insulated sections of the cold pipes).

In the case of the tested heat exchanger equipped with the oscillatory circuit of the MOVEBIT system, the energy consumption was 12 W, regardless of the ambient temperature. A graphical representation of the efficiency of an air source heat pump against ambient temperature using a standard MITSUI evaporator and a MOVEBIT oscillating evaporator is shown in (fig. 1).

To compare the efficiency of heat exchangers (fig. 1) shows the operation of an air source heat pump with a MITSUBISHI heat exchanger, which, according to some estimates, is considered to be the best on the HTH market [20-22]. The graph shows a similar transformation ratio with a laboratory heat pump, a small difference in values is due to the peculiarity of the ZUBADAN technology. This is due to more stable operation by controlling the compressor discharge temperature through injection and increasing the refrigerant superheat in the POWER RECEIVER.

A sharp decrease in the performance of an air source heat pump at low temperatures is explained by the operation of the defrosting system. This process clearly demonstrates a graph of changes in the transformation ratio over time (fig. 2), which does not take into account the cost of electricity for defrosting.

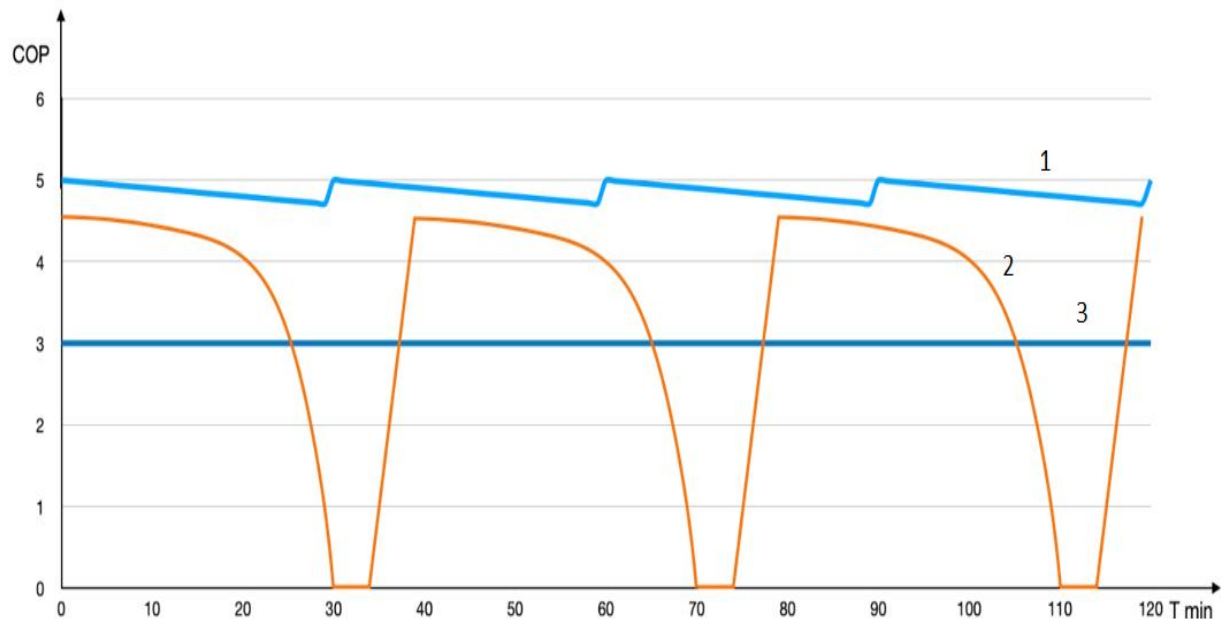


**Fig.1.** Dependence of the HPU transformation coefficient on the outside air temperature when using heat exchangers of various manufacturers in the evaporative circuit:  
1 – MOVEBIT, 2 – MITSUBISHI, 3 – MITSUI

Line 1 shows the change in the COP of the heat pump with the MOVEBIT evaporator at 0°C for 120 minutes. The oscillation amplitude has a very small interval along the y-axis, and the resulting direct COP has higher values than curve 2 of the MITSUBISHI evaporator heat pump. Fluctuations have large COP values from 0 to 4.6, therefore, the resulting MITSUI 3 straight line has lower values than that of the MOVEBIT heat exchanger (fig. 2).

In more detail, the process of ASHP operation and its performance is explained in (fig. 3). The segment bounded by points A-B has the maximum COP, because the evaporator has the maximum heat transfer

capacity. After passing point "B", the process of ice formation begins with a faster intensity (segment B-C). At a certain point, the superheat begins to decrease, approaching zero degrees, which requires urgent cleaning of the evaporator or turning off the compressor. At point "C" the compressor is switched off and the evaporator goes into defrosting mode "C-C'". Points "C' -d'" – evaporator defrosting mode time, "d' -d" – end of defrosting mode. The compressor is switched on at point "d". In the "d-A" section, the compressor begins to pump refrigerant through the system. At point "A'" the heat pump reaches its maximum heat output.



**Fig. 2.** Change in the transformation coefficient of TNU (COP) at a temperature of 0 ° C for 120 min. with evaporators: 1 – MOVEBIT, 2 – MITSUI, 3 – resulting direct efficiency of the MITSUI heat exchanger

The transformation ratio of a heat pump is limited by the area  $S_o$ :

$$S_o = S_t - S_p, \quad (10)$$

notations:  $S_t$  – the area, which is bounded by the points OABC и  $dA' O'$ ;

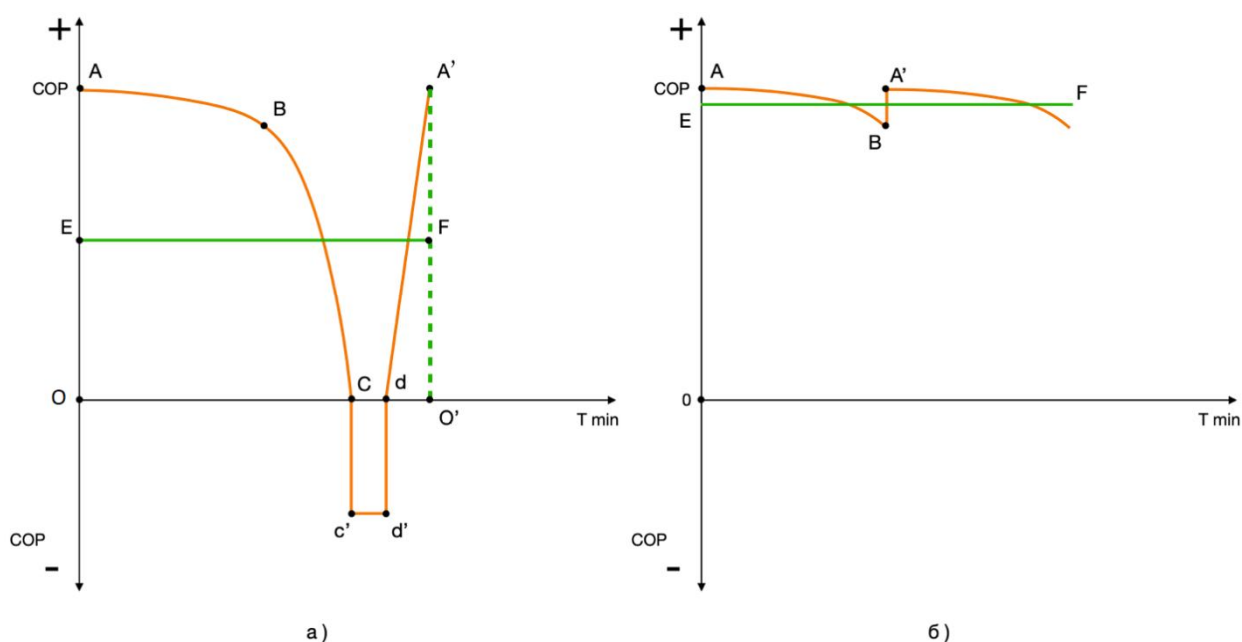
$S_p$  – the area, which is bounded by the points  $Cc'd'd$ ;

$S_o$  – the area, which is bounded by the points OEFO'.

The average transformation ratio of the heat pump will correspond to a straight line passing through the points E-F (fig. 3a).

In (fig. 3b), the operation of a heat pump with a MOVEBIT evaporator is detected by a graphical method. The curve bounded by points A-B shows the operation of the heat pump with the presence of dense crystallized condensate in the form

of frost 0.1-0.4 mm. Provided with such thickness of thermal insulation properties, there is no observation of the heat transfer of the evaporator and the COP of the entire heat pump. In the "B" setting, the oscillatory circuit is turned on, the exposure time is 0.2-1.5 seconds (section "B-A'"). As a result of resonance, the evaporator is cleaned of frost and ice. Stopping the compressor is not required. The resulting direct COP for the MOVEBIT evaporator, limited by the EF points, is significantly higher than in option "a". The energy consumption for the operation of the oscillatory circuit is 12–14 W/h, therefore, any change in the energy consumption required for the operation of the heat pump installation does not depend [23].



**Fig. 3.** The effect of ice on the efficiency of HPU: **a** – with the MITSUI evaporator, **б** – with the MOVEBIT evaporator

## Conclusion

The conducted studies have shown the high efficiency of the MOVEBIT oscillating circuit evaporator. The coefficient of transformation (COP) of an air source heat pump with the MOVEBIT system exceeds the COP of a heat pump with a standard MITSUI evaporator by 2 times at a temperature of  $0^{\circ}\text{C}$  and below. Graph-analytical and theoretical calculations confirmed the increase in the transformation

ratio and productivity of the heat pump by a factor of two in the temperature range from  $0^{\circ}\text{C}$  to  $-5^{\circ}\text{C}$ . The integration of outdoor units into existing air source heat pumps cuts energy consumption in half, which opens up great prospects for using a heat pump installation over a wide temperature range. Measures for the transition of standard evaporators to MOVEBIT evaporators do not require significant changes in the design of the air source heat pump.

## References

1. Ministry of Energy. Energy Strategy of the Russian Federation for the period up to 2035. <https://minenergo.gov.ru/node/10269>, pp. 1-20.
2. Meghann Smith, Anthony Bevacqua, Sheryl Tembe, Pankaj Lal. Life cycle analysis (LCA) of residential ground source heat pump systems: A comparative analysis of energy efficiency in New Jersey. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, vol. 47. DOI: 10.1016/j.seta.2021.101364.

3. Tolga Ural, Gulsah Karaca Dolgun, Onur Vahip Guler, Ali Kecebas. Performance analysis of a textile based solar assisted air source heat pump with the energy and exergy methodology. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, vol. 47. DOI: 10.1016/j.seta.2021.101534.
4. Mohanraj M., Karthick L., Dhivagar R. Performance and economic analysis of a heat pump water heater assisted regenerative solar still using latent heat storage. *Applied thermal Engineering*, 2021, vol. 196. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117263.
5. Mohanraj M., Karthick L., Dhivagar R.. Performance and economic analysis of a heat pump water heater assisted regenerative solar still using latent heat storage. *Applied thermal Engineering*, 2021, vol. 196.
6. Ilyina T. N., Mukhamedov R. Yu., Verevkin O. V. Perspektivy ispol'zovaniya teplovykh nasosov v sistemakh otopleniya maloetazhnykh zhilykh domov Belgorodskoi oblasti [Prospects for the use of heat pumps in heating systems for low-rise residential buildings in the Belgorod region]. *Vestnik BGTU im V. G. Shukhova = Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*, 2009, no.3, pp. 142-146.
7. Moroz Yu. S., Nikulin A. V., Tretyakova N. A. *Rekuperatsiya tepla* [Heat recovery]. Yekaterinburg, 2021, pp. 138-141.
8. Mysovskikh P. V., Petrikov I. N. Osobennosti primeneniya sistem rekuperatsii tepla v sistemakh ventilyatsii obshchestvennykh zdanii [Peculiarities of application of heat recovery systems in ventilation systems of public buildings]. *Molodoi uchenyi = Young Scientist*, 2021, no. 9 (351), pp. 17-19.
9. USA Corporate Sales Global Market Insights Inc kguf <https://www.nachedeu.com/global-market-insights-inc-european-market-tep>, pp. 5-20.
10. Report on the dynamics of the heat pump market from the IEA. <https://www.iea.org/reports/heat-pumps>. P.1-20.
11. Suszanowicz D. Optimization of heat loss through ventilation for residential buildings D Suszanowicz. *atmosphere*, 2018.
12. De Antonellis. S.; intini. M.; Joppolo. C.M.; Leone, C // Design Optimization of Heat Wheels for Energy Recovery in HVAC Systems. *Energies*. 2014. 7. 7348-7367. <https://doi.org/10.3390/en7117348>.
13. Orlov P.A., Il'ina T.N., Orlov K.P. Promising methods of ice control of air heat pump evaporators. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1926. 012017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1926/1/012017>.
14. Orlov P.A., Ilyina T.N., Orlov K.P. Vozdeistvie mekhanicheskikh kolebaniy na obledenenie isparitelei vozdushnogo teplovogo nasosa [Influence of mechanical vibrations on icing of evaporators of an air heat pump]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova = Vestnik BSTU im. V.G. Shukhov*, 2021, vol. 6, no. 6. pp.36-44.

15. Orlov P. A., Il'ina T. N., Orlov K. P. Test of heat pump unit with MOVEBIT anti-icing system. *Constructions materials and productions*, 2022, vol. 5, no. 2, pp. 43-50.
16. Mamchenko V.O., Malyshev A.A. *Plastinchatye teploobmenniki v nizkotemperaturnoi tekhnike i biotekhnologicheskikh protsessakh* [Lamellar heat exchangers in low-temperature engineering and biotechnological processes]. St. Petersburg, 2014, 116 p.
17. *Marketingovoe issledovanie rossiiskogo rynka plastinchatykh teploobmennikov* [Marketing research of the Russian market of plate heat exchangers]. Available at: <https://research.techart.ru/report/heat-exchange-equipment-market-research.htm>.
18. Isaev S.E., Chernov A.F. Bazhan P.I., A Nazin.N. Metodika rascheta kozhukhotrubnykh teploobmennyykh apparatov [Calculation method for shell-and-tube heat exchangers]. *Gazeta «Energetika i promyshlennost' Rossii» = Newspaper "Energetika i promyshlennost' Rossii"*. Nizhny Novgorod, 2006, no. 12, 76 p.
19. Kalabin S.E. Ekonomicheskii effekt ot vnedreniya energosberegayushchego oborudovaniya: plastinchatykh teploobmennikov, blochnykh individual'nykh teplovykh punktov [Economic effect from the introduction of energy-saving equipment: plate heat exchangers, block individual heat points]. *Zhurnal «S.O.K.» = Journal "S.O.K."*, 2005, no. 8.
20. Polyakova V. Yu., Kalinina T. O., Kichin K. V. Analiz energoeffektivnosti teplovykh nasosov v sistemakh teplosnabzheniya po territorial'no-klimaticheskomu priznaku [Analysis of the energy efficiency of heat pumps in heat supply systems according to territorial and climatic characteristics]. *Molodoi uchenyi = Young Scientist*, 2016, no. 27 (131), pp. 142-146.
21. Yuritsin S. A., Kizurov A. S. Regulirovaniya parametrov teplonasosnoi ustanovki [Regulation of the parameters of a heat pump installation]. *Molodoi uchenyi = Young Scientist*, 2015, no. 6.5 (86.5), pp. 17-21.
22. Laxaeva U.S., Kabanova I.A. [Evaluation of the efficiency of an air heat pump]. *Aktual'nye voprosy energetiki. Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Actual issues of energy. Materials of the All-Russian scientific-practical conference with international participation]. Omsk, 2021, pp. 9-13 (In Russ.).
23. Fedoseev V.N., Aloyan R.M., Zaitseva I.A., Ostryakova Yu.E. [Organizational and technical possibilities of using an air heat pump as an effective source of energy]. *Teoriya i praktika tekhnicheskikh, organizatsionno-tekhnologicheskikh i ekonomicheskikh reshenii. Sbornik nauchnykh trudov* [Theory and practice of technical, organizational, technological and economic solutions. Collection of scientific papers]. Ivanovo, 2019, pp. 152-157 (In Russ.).

---

**Информация об авторах / Information about the Authors**

**Ильина Татьяна Николаевна**, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: ilinatat50@mail.ru

**Tat'yana N. Il'ina**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: ilinatat50@mail.ru

**Орлов Павел Анатольевич**, аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: orlovpavel67@gmail.com

**Pavel A. Orlov**, Post-Graduate Student, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: orlovpavel67@gmail.com

**Ечина Алина Олеговна**, магистрант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: echalina99@mail.ru

**Alina O. Echina**, Post-Graduate Student, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: echalina99@mail.ru

## Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-75-89>

## Разработка математической модели процессов уплотнения слоя дорожной одежды

Е.Г. Пахомова <sup>1</sup>, Л.В. Макая <sup>2</sup>, К.А. Андрианов <sup>2</sup>, А.Ф. Зубков <sup>2</sup>,  
П.В. Монастырев <sup>2</sup> ✉, Д.М. Мордасов <sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Тамбовский государственный технический университет,  
ул. Советская, д. 106/5, г. Тамбов 392000, Российская Федерация

✉ e-mail: monastyrev68@mail.ru

### Резюме

**Цель исследования.** Целью данной работы является разработка математической модели, обобщающей силовые характеристики катков, которые влияют на процесс уплотнения с учетом изменения свойств уплотняемого материала. Предложенная математическая модель позволяет моделировать процесс уплотнения слоя материала при разных методах уплотнения и изменении свойств уплотняемого материала.

**Методы.** При разработке математической модели процессов уплотнения использовались методы математического моделирования при определении напряжений в зоне контакта вальца катка с поверхностью уплотняемого слоя. Установление закономерностей изменения свойств уплотняемого материала под действием нагрузки проводилось на основе реологических исследований, по результатам которых получены зависимости характеристик слоя смеси (коэффициенты жесткости и вязкого сопротивления) от действующей нагрузки. Для уточнения полученных результатов моделирования влияния нагрузки и свойств материала на качество работы проведены экспериментальные исследования на стенде модели CRT-RC-H2, по результатам которых установлена связь между деформацией слоя и его коэффициентом уплотнения.

**Результаты.** Предложенная математическая модель позволяет моделировать процесс уплотнения слоя дорожной одежды при применении разных катков и изменении характеристик слоя материала в процессе уплотнения. По результатам исследования установлена связь между качеством уплотнения (коэффициентом уплотнения) и деформацией слоя под действием нагрузки.

**Заключение.** 1. По результатам математического моделирования установлены аналитические зависимости для расчета контактных напряжений в зоне контакта жесткого вальца катка с поверхностью уплотняемого слоя материала.

2. По результатам реологических испытаний установлены связи между деформацией и характеристиками уплотняемого слоя материала под действующей нагрузкой.

3. Установлена связь между деформацией слоя смеси и коэффициентом уплотнения слоя асфальтогранулята.

4. Представленная математическая модель процесса уплотнения позволяет моделировать технологию уплотнения слоев дорожной одежды.

**Ключевые слова:** математическая модель; асфальтогранулят; деформация слоя; процесс уплотнения; контактные напряжения.

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

**Для цитирования:** Разработка математической модели процессов уплотнения слоя дорожной одежды / Е.Г. Пахомова, Л.В. Макая, К.А. Андрианов, А.Ф. Зубков, П.В. Монастырев, Д.М. Мордасов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(2): 75-89. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-75-89>.

Поступила в редакцию 10.05.2023

Подписана в печать 28.06.2023

Опубликована 02.08.2023

## Development of a Mathematical Model of Compaction Processes Road Layer

Ekaterina G. Pakhomova <sup>1</sup>, Lionel V. Makaya <sup>2</sup>, Konstantin A. Andrianov <sup>2</sup>,  
Anatoly F. Zubkov <sup>2</sup>, Pavel V. Monastirev <sup>2</sup> ✉, Denis M. Mordasov <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

<sup>2</sup> Tambov State Technical University  
106/5 Sovetskaya str., Tambov 392000, Russian Federation

✉ e-mail: monastirev68@mail.ru

### Abstract

**Purpose of research.** The purpose of this work is to develop a mathematical model that generalizes the power characteristics of rollers that affect the compaction process, taking into account changes in the properties of the compacted material. The proposed mathematical model makes it possible to simulate the process of compaction of a material layer with different compaction methods and changes in the properties of the compacted material.

**Objectives.** To achieve this goal, it is necessary to establish the influence of the parameters of the roller roller, taking into account the sealing method used, on the magnitude of stresses in the zone of its contact with the surface of the material layer. The efficiency of the sealing process depends on the compliance of the stresses in the contact zone of the roller roller with the characteristics of the material, which are determined on the basis of experimental data.

**Methods.** When developing a mathematical model of compaction processes, mathematical modeling methods were used to determine stresses in the contact zone of the roller roller with the surface of the compacted layer. The establishment of patterns of changes in the properties of the compacted material under the influence of load was carried out on the basis of rheological studies, the results of which obtained the dependence of the characteristics of the mixture layer (coefficients of stiffness and viscous resistance) on the acting load. To clarify the obtained results of modeling the effect of load and material properties on the quality of work, experimental studies were carried out on the CRT-RC-H2 model stand, according to the results of which a connection was established between the deformation of the layer and its compaction coefficient.

**Results.** The proposed mathematical model makes it possible to simulate the process of compaction of the pavement layer when using different rollers and changing the characteristics of the material layer during the compaction process. According to the results of the study, a relationship was established between the quality of the seal (compaction coefficient) and the deformation of the layer under load.

**Conclusion.** 1. Based on the results of mathematical modeling, analytical dependences have been established for calculating contact stresses in the contact zone of the rigid roller roller with the surface of the compacted material layer. 2. According to the results of rheological tests, the connections between the deformation and the characteristics of the compacted layer of the material under the operating load are established.

3. The relationship between the deformation of the mixture layer and the compaction coefficient of the asphalt granulate layer is established.

4. The presented mathematical model of the compaction process makes it possible to simulate the technology of compaction of layers of pavement.

**Keywords:** mathematical model; asphalt granulate; layer deformation; compaction process; contact stresses.

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

**For citation:** Pakhomova E. G., Makaya L. V., Andrianov K. A., Zubkov A. F., Monastyrev P. V., Mordasov D. M. Development of a Mathematical Model of Compaction Processes Road Layer. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(2): 75-89 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-75-89>.

Received 10.05.2023

Accepted 28.06.2023

Published 02.08.2023

\*\*\*

## Введение

Работоспособность дорожной конструкции зависит от соблюдения технологии строительства, обеспечивающей выбор параметров машин с учетом свойств применяемого материала. Основной операцией при устройстве дорожных одежд является процесс уплотнения. Наибольший эффект обеспечивается при условии соответствия контактных напряжений под рабочим органом машины прочностным характеристикам уплотняемого материала [1-7].

Строительство автомобильной дороги связано с использованием разных материалов (грунт, песок, щебень, асфальтобетонные и цементобетонные смеси), каждый из которых обладает своими свойствами и прочностными характеристиками. Установленные пределы прочности и влияющие на них факторы позволяют обосновать технологические режимы применяемых машин. Для обеспечения задач по повышению срока эксплуатации автомо-

бильных дорог применяют новые материалы, которые требуют дополнительных исследований.

Машины для уплотнения материала характеризуются разной массой, характеристиками и режимами воздействия на уплотняемый материал. Под действием нагрузки в слое материала возникает деформация, изменяющая свойства уплотняемого материала (плотность, жесткость, вязкость, пористость) и для достижения требуемого качества уплотнения необходимо повышение нагрузки в процессе уплотнения.

## Материалы и методы

Анализ параметров катков с жестким металлическим вальцом показал, что обобщающей величиной, характеризующей воздействие вальца на материал, является отношение  $Q/Br$  (Кн/м<sup>2</sup>) или  $q/r$ , где  $q$  – линейное давление вальца (Кн/м),  $r$  – радиус вальца (м).

Установлено, что силовые характеристики катков находятся в определенных интервалах с учетом типа катка и

его массы [1-3]. Статистический анализ параметров катков показал, что в зависимости от типа катка отношение  $q/r$  составляет для легких катков 0,025-0,038, средних 0,035-0,052 и тяжелых более 0,052. Для вибрационных катков отношение  $q/r$  находится в пределах 0,09-0,15.

Установлено, что величина контактных напряжений под вальцом катка в статическом режиме работы определяется следующей зависимостью [1]:

$$\sigma_k = \sqrt{qE_d/r}, \text{ МПа} \quad (1)$$

где  $E_d$  – модуль деформации уплотняемого слоя материала, МПа.

При работе вибрационных катков величина контактных напряжений под вальцом возрастает за счет вибрации, что позволяет повысить величину контактных напряжений. Величина контактных напряжений под вибрационным вальцом катка определяется по формуле

$$\sigma_k = K_3 \sqrt{qE_d/r}, \text{ МПа} \quad (2)$$

где  $K_3$  – коэффициент эффективности, зависящий от относительной вынуждающей силы, представляющий собой отношение вынуждающей силы ( $P$ ) к силе тяжести вальца и части рамы катка ( $Q$ ), приходящейся на валец.

Численное значение коэффициента определяется по формуле

$$K_3 = 1,67 + 1,31 \ln(P/Q), \text{ безразмерная величина.} \quad (3)$$

Из представленных выше зависимостей видно, что контактные напряжения зависят также от свойств материала, которые характеризуются модулем деформации уплотняемого материала ( $E_d$ ).

Экспериментально установлено, что контакт вальца катка с поверхностью слоя зависит от свойств материала. С учетом свойств материала угол контакта вальца при первом проходе катка ( $\beta_0$ ) определяется зависимостями с учетом вида грунта, град:

- глина:

$$\beta_0 = 24,75 - 5,69 \ln(E), \quad (4)$$

- суглинок:

$$\beta_0 = 22,94 - 6,18 \ln(E), \quad (5)$$

- мелкозернистая смесь:

$$\beta_0 = 24,53 - 5,02 \ln(E), \quad (6)$$

- крупнозернистая смесь:

$$\beta_0 = 17,53 - 4,04 \ln(E) \quad (7)$$

- асфальтогранулят:

$$\beta_0 = 19,67 - 4,87 \ln(E). \quad (8)$$

Коэффициенты корреляции уравнений находятся в пределах 0,97-0,99.

В процессе уплотнения за счет числа проходов по одному следу меняется деформативная способность материала и угол контакта вальца. Изменение угла контакта вальца в зависимости от числа проходов катка по одному следу с учетом вида материала можно определить по формулам:

- грунт:

$$\beta = \beta_0 - 3,80 \ln(N), \quad (9)$$

- мелкозернистая смесь:

$$\beta = \beta_0 - 3,74 \ln(N), \quad (10)$$

- крупнозернистая смесь:

$$\beta = \beta_0 - 4,09 \ln(N), \quad (11)$$

- асфальтогранулят:

$$\beta = \beta_0 - 4,10 \ln(N), \quad (12)$$

где  $N$  – число проходов катка по одному следу. Коэффициенты корреляции уравнений составляют 0,96-0,98.

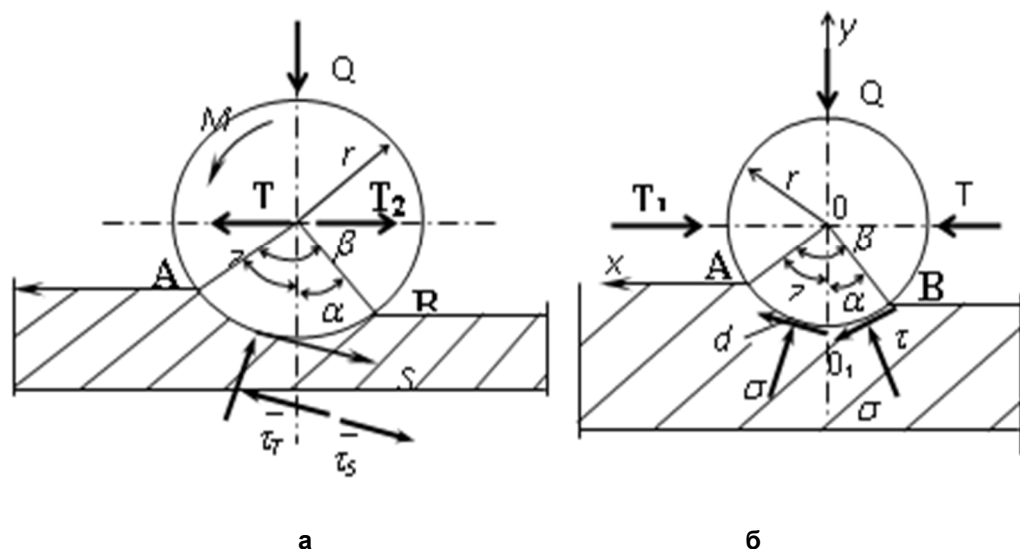
Установлено, что с числом проходов катка изменяется не только угол  $\beta$ , но и угол  $\alpha$ . Экспериментально установлено, что между углами контакта  $\beta$  и  $\alpha$  имеется связь, которая имеет вид:

$$\alpha/\beta = 0,016 \ln(n) + 0,465, \quad (13)$$

где  $n$  – номер прохода катка по одному следу. Коэффициент корреляции уравнения равен 0,99.

Установленные закономерности изменения углов контакта вальца с поверхностью слоя в процессе уплотнения позволяют моделировать контактные напряжения в зоне контакта вальца с учетом свойств материала и параметров катка.

На рис. 1 представлена схема контакта вальцов катка с поверхностью слоя материала. Контактная поверхность вальца с материалом зависит от деформативной способности материала и определяется углом контакта вальца  $\beta$ .



**Рис. 1.** Взаимодействие вальцов катка с уплотняемым материалом: **а** – ведущий валец; **б** – ведомый;  $Q$  – масса вальца и нагрузка от рамы катка; кН;  $M$  – крутящий момент, приложенный к ведущему вальцу катка, кН·м;  $r$  – радиус вальца, м;  $T$  – усилие от рамы катка на валец, кН;  $\alpha$  – угол, отражающий упругую деформацию, град.;  $\beta$  – угол, отражающий полную деформацию материала под вальцом;  $\sigma, \tau$  – нормальные и касательные напряжения в зоне контакта вальца с материалом;  $T_1$  – сила сопротивления движению вальца катка со стороны уплотняемого материала;  $S$  – сила тяги катка, кН

**Fig. 1.** The interaction of the rollers of the roller with the compacted material: **a** – the driving roller; **b** – the driven one;  $Q$  – the mass of the roller and the load from the roller frame; кН;  $M$  – the torque applied to the driving roller of the roller, кН·м;  $r$  – the radius of the roller, м;  $T$  – the force from the roller frame on the roller, кН;  $\alpha$  – angle reflecting elastic deformation, deg.;  $\beta$  – angle reflecting the complete deformation of the material under the roller;  $\sigma, \tau$  – normal and tangential stresses in the contact zone of the roller with the material;  $T_1$  – the force of resistance to the movement of the roller roller from the side of the compacted material;  $S$  – the traction force of the roller, кН

Экспериментально установлено, что напряжения под вальцом катка равномерно распределяются по его ширине. Следовательно расчет напряжений по дуге контакта вальца можно вести как для плоской задачи. В общем виде напряжение в зоне контакта вальца с материалом определяется:

$$\vec{\sigma} = \vec{\sigma}_y + \vec{\sigma}_x + \vec{\tau}_y + \vec{\tau}_x + \vec{\sigma}_s + \vec{\tau}_s, \text{ МПа} \quad (14)$$

где  $\vec{\sigma}_y, \vec{\sigma}_x, \vec{\tau}_y, \vec{\tau}_x, \vec{\sigma}_s, \vec{\tau}_s$  – составляющие общего напряжения от действия силовых факторов вальца катка.

Начальные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} &\text{– при } \varphi=0 \rightarrow \sigma_{0y} = \tau_{Qx} = \tau_{Fx} = \tau_{Fy} = \tau_{Sy} = \\ &= \tau_{sx} = 0, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} &\text{– при } \varphi=\beta \rightarrow \sigma_{Qy} = \tau_{Qx} = \tau_{Fx} = \tau_{Fy} = \tau_{Sy} = \\ &= \tau_{sx} = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Граничные условия можно представить в виде:

$$\varphi=z \rightarrow d\sigma_{Qy}/d\varphi=0, \quad (17)$$

$$d\tau_{Fx}/d\varphi=0, \quad (18)$$

$$d\tau_{sx}/d\varphi=0, \quad (19)$$

$$\sigma_{Qx} = \tau_{Fy} = \tau_{sy} = 0. \quad (20)$$

В качестве аппроксимирующей функции принята зависимость:

$$\sigma = a_0 + a_1\varphi + a_2\varphi^2 + a_3\varphi^3 + a_4\varphi^4, \quad (21)$$

где  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$  – коэффициенты ряда;  $\varphi$  – переменная величина, определяющая точку в зоне контакта вальца с материалом.

Начальные и граничные условия имеют вид:

Начальные условия:

$$\begin{aligned} &\text{– при } \varphi=0 \rightarrow \sigma_{Qy} = \tau_{Qx} = \tau_{Fx} = \\ &= \tau_{Fy} = \tau_{Sy} = \tau_{sx} = 0, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} &\text{– при } \varphi=\beta \rightarrow \sigma_{Qy} = \tau_{Qx} = \tau_{Fx} = \tau_{Fy} = \tau_{Sy} = \\ &= \tau_{sx} = 0. \end{aligned} \quad (23)$$

Граничные условия:

$$\varphi = \frac{zd\sigma_{Qy}}{d\varphi} = 0; \quad (24)$$

$$\frac{d\tau_{Fx}}{d\varphi} = 0; \quad (25)$$

$$\frac{d\tau_{sx}}{d\varphi} = 0; \quad (26)$$

$$\sigma_{Qx} = \tau_{Fy} = \tau_{sy} = 0. \quad (27)$$

С учетом действия сил на валец, начальных и граничных условий получены зависимости для расчета составляющих общего напряжения под вальцом, которые имеют вид:

$$\vec{\sigma}_{Qy} = (A_{11}\varphi + A_{21}\varphi^2 + A_{31}\varphi^3 + A_{41}\varphi^4) / \Delta; \quad (28)$$

$$\vec{\sigma}_{Qx} = (B_{11}\varphi + B_{21}\varphi^2 + B_{31}\varphi^3 + B_{41}\varphi^4) / \Delta; \quad (29)$$

$$\vec{\tau}_{Fy} = (D_{11}\varphi + D_{21}\varphi^2 + D_{31}\varphi^3 + D_{41}\varphi^4) / \Delta; \quad (30)$$

$$\vec{\tau}_{Fx} = (\Phi_{11}\varphi + \Phi_{21}\varphi^2 + \Phi_{31}\varphi^3 + \Phi_{41}\varphi^4) / \Delta; \quad (31)$$

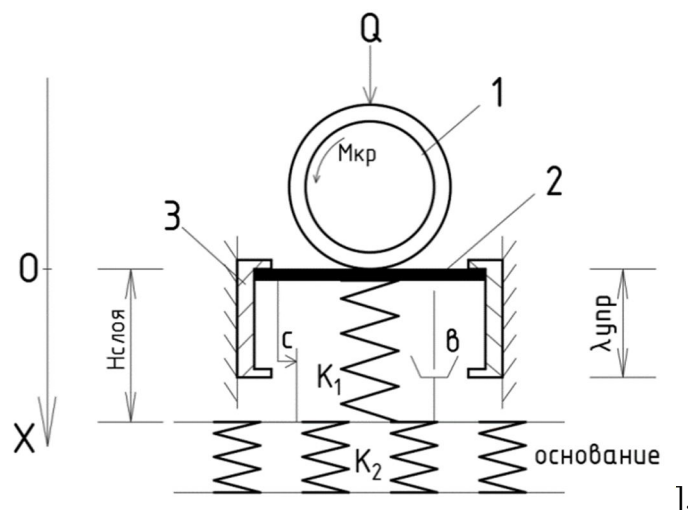
$$\vec{\tau}_{Sy} = (S_{11}\varphi + S_{21}\varphi^2 + S_{31}\varphi^3 + S_{41}\varphi^4) / \Delta; \quad (32)$$

$$\vec{\tau}_{Sx} = (O_{11}\varphi + O_{21}\varphi^2 + O_{31}\varphi^3 + O_{41}\varphi^4) / \Delta, \quad (33)$$

где  $A_{il}, B_{il}, \Phi_{il}, D_{il}, S_{il}, O_{il}$  – коэффициенты, зависящие от параметров катка и свойств материала;  $\Delta$  – определитель системы уравнений [8].

Для расчета напряжений в зоне контакта вальца с материалом разработанная программа для ЭВМ, позволяющая установить зависимость величины напряжений от числа проходов катка по одному следу и свойств уплотняемого материала [9].

Анализ работ, связанных с уплотнением материалов, показал, что моделирование процесса выполняется с применением теории реологии. В реологических моделях свойства материала представляются в виде моделей, характеризующих упругость, вязкость и трение. Реологическая модель уплотнения асфальтогранулята представлена на рис. 2.



**Рис. 2.** Реологическая модель уплотнения битумоминеральной смеси: **1** – валец катка; **2** – поверхность покрытия; **3** - невесомая пробка.  $Q$  - сила тяжести, передаваемая от вальца катка на уплотняемую поверхность, кН;  $K_1$  и  $K_2$  – коэффициенты жесткости материала и основания, МПа/мм;  $\eta$  – коэффициент вязкого сопротивления, МПа·с;  $\lambda_{упр}$  – деформация (перемещение невесомой пробки), характеризующая упругую деформацию материала, мм;  $X_1$  – перемещение поверхности покрытия под действием нагрузки, мм;  $X_2$  – перемещение пробки, характеризующее остаточную деформацию, мм

**Fig. 2.** Rheological model of compaction of bitumen-mineral mixture: **1** – roller roller; **2** – coating surface; **3** - weightless plug.  $Q$  - is the gravity force transmitted from the roller roller to the compacted surface, kN;  $K_1$  and  $K_2$  - are the stiffness coefficients of the material and the base, MPa / mm;  $\eta$  - is the coefficient of viscous resistance, MPa·s;  $\lambda_{upr}$  - is the deformation (movement of the weightless plug) characterizing the elastic deformation of the material, mm;  $X_1$  - is the movement of the coating surface under the action of a load, mm;  $X_2$  – the movement of the plug, characterizing the residual deformation, mm

## Результаты и их обсуждение

На поверхность слоя материала действует сила  $Q$ , представляющая нагрузку от вальца катка. В зоне контакта вальца возникают напряжения, способствующие развитию деформации материала. Невесомая пробка **3** под действием нагрузки перемещается вместе с площадкой **2** и моделирует остаточную деформацию материала. Пробка **3** перемещается вместе с площадкой **2** вниз при условии, что  $x_1 - x_2 = 0$ . При снятии нагрузки площадка **2** перемещается вверх до верхнего упора пробки **3**. Ско-

рость подъема пробки определяется скоростью перемещения вальца.

Из представленной реологической модели видно, что развитие деформации уплотняемого слоя зависит от прочности нижележащего слоя. При его недостаточной прочности в процессе уплотнения происходит его доуплотнение при условии высокой уплотняющей способности катка. Если  $K_1 > K_2$ , то происходит уплотнение основания под дорожной одеждой, а при условии, что  $K_1 < K_2$  – уплотняется слой материала.

Начальные условия перемещения поверхности покрытия и пробки имеют вид:

$$T=t_0; x_1=0; x_2=\lambda_{\text{упр}}; \quad (34)$$

$$N=(k_1+k_2)x_1+bx_2 \text{ при } x_2-x_1 \leq \lambda_{\text{упр}}; \quad (35)$$

$$N=x_2=\lambda_{\text{упр}} \text{ при } x_2-x_1 > \lambda_{\text{упр}}; \quad (36)$$

$$x_2=x_{2\text{max}}-v_0t \text{ при } x_2-x_1 > \lambda_{\text{упр}}, \quad (37)$$

где  $N$  – сила, действующая на частицу материала, кН,  $v_0$  – скорость перемещения пробки.

Представленная модель процесса уплотнения позволяет установить влияние нагрузки (напряжения) на остаточную деформацию слоя под действием нагрузки. Требования к прочности основания зависят от вида грунта, дорожно-климатической зоны и определяются нормативным документом, согласно которому модуль жесткости грунта находится в пределах от 0,3 до 1,8 МПа.

По результатам проведенных исследований установлена зависимость влияния размера частиц материала, толщины слоя и напряжения на общий коэффициент жесткости слоя (асфальтогранулята) при устройстве дорожных конструкций, который определяется зависимостью:

$$K_{\text{ж}}=3,82 K_{\sigma} K_{\phi} K_h, \quad (38)$$

где  $K_{\sigma}$ ,  $K_{\phi}$ ,  $K_h$  – безразмерные коэффициенты, учитывающие влияние напряжения, в зависимости от размера частиц асфальтогранулята и толщины слоя.

Численное значение коэффициентов определяется выражениями:

$$K_{\text{ж}\sigma}=-0,079\sigma^3+0,182\sigma^2+0,76\sigma+0,195; \quad (39)$$

$$K_{\phi}=0,96e^{0,046N}; \quad (40)$$

$$K_h=1,56e^{-4,78h}, \quad (41)$$

где  $\sigma$  – напряжение, МПа;  $h$  – толщина слоя, м;  $N$  – размер частиц материала.

Под действием нагрузки изменяется не только коэффициент жесткости, но коэффициент вязкости слоя. В общем виде коэффициент вязкости слоя определяется по формуле:

$$\eta=0,289 K_{\text{фрак}} K_{\sigma} K_h,$$

где  $K_{\sigma}$ ,  $K_{\text{фрак}}$ ,  $K_h$  – безразмерные коэффициенты, учитывающие влияние напряжения в зависимости от размера частиц асфальтогранулята и толщины слоя.

Численное значение коэффициентов определяется по формулам:

$$K_{\eta\sigma}=-0,094\sigma^3+0,23\sigma^2+0,72\sigma+0,22, \text{ с/мм}^2; \quad (43)$$

$$K_{\text{фрак}}=0,138N^3-0,99N^2+2,33N-0,48; \quad (44)$$

$$K_h=0,826\ln(h)+3,48, \quad (45)$$

где  $\sigma$  – напряжение, МПа;  $h$  – толщина слоя, м;  $N$  – номер фракции. Коэффициент корреляции уравнений равен 0,99.

Установлено, что между коэффициентами вязкости и жесткости, независимо от толщины слоя и размера фракций гранулята, существует связь, которая имеет вид:

$$\eta=bK_{\text{ж}}, \quad (46)$$

где  $b$  – коэффициент, зависящий от толщины слоя при укладке, численное значение которого находится в пределах от 2,5 до 10.

Полученные закономерности изменения свойств уплотняемого материала от нагрузки и конструктивных параметров слоя позволяют моделировать воздействие нагрузки на деформацию слоя. Для расчета деформации слоя разработана программа на ЭВМ, позволяющая моделировать влияние свойств матери-

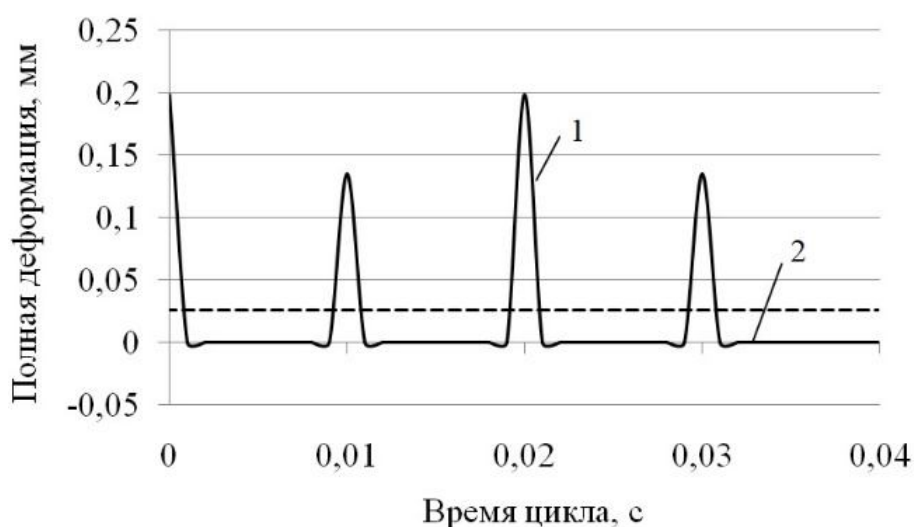
ала и параметров нагрузки на развитие деформаций в уплотняемом материале [10]. Интерфейс программы представлен на рис. 3.

В качестве примера на рис. 4 представлены результаты расчета деформации слоя при воздействии вибрационного вальца катка.

|                                       |                                    |         |                |                                   |     |
|---------------------------------------|------------------------------------|---------|----------------|-----------------------------------|-----|
| Динамическая нагрузка                 | <input type="text" value="0,15"/>  | Н/мм2   | Площадь штампа | <input type="text" value="4000"/> | мм2 |
| Напряжение рабочего органа            | <input type="text" value="0,1"/>   | Н/мм2   |                |                                   |     |
| w                                     | <input type="text" value="314"/>   | Рад/с   |                |                                   |     |
| m                                     | <input type="text" value="0,001"/> | граммы  |                |                                   |     |
| k                                     | <input type="text" value="5"/>     | Н/мм2   |                |                                   |     |
| b                                     | <input type="text" value="10"/>    | Н*с/мм2 |                |                                   |     |
| y                                     | <input type="text" value="5"/>     | град    |                |                                   |     |
| Упругий прогиб                        | <input type="text" value="0,1"/>   | мм      |                |                                   |     |
| <input type="button" value="Расчет"/> |                                    |         |                |                                   |     |

**Рис. 3.** Интерфейс программы по расчету деформации слоя

**Fig. 3.** Interface of the program for calculating the deformation of the layer



**Рис. 4.** Деформации слоя при уплотнении вибрационным вальцом катка за время действия одного цикла нагрузки: **1** – полная деформация; **2** – упругая деформация

**Fig. 4.** Deformations of the layer during compaction by a vibrating roller of the roller during the action of one load cycle: **1** – complete deformation; **2** – elastic deformation

Развитие деформации под действием нагрузки приводит к повышению плотности уплотняемого слоя. Величиной, характеризующей качество уплотнения, является коэффициент уплотнения.

Для уточнения полученных результатов моделирования влияния нагрузки и свойств материала на деформацию слоя и установления связи деформации с коэффициентом уплотнения в лабораторных условиях проведены исследования на стенде модели CRT-RC-H2. В процессе проведения эксперимента определялись плотность и деформация слоя после проходов рабочего органа катка. В качестве уплотняемого материала применялся асфальтогранулят фракций 5-20 и 20-40 мм. Коэффициент уплотнения слоя асфальтогранулята определялся неразрушающим методом с применением прибора ПАБ-1. Исследования проводились в соответствии с ПНСТ 185-2016 (EN 12697-33) [11-20].

По результатам моделирования установлены зависимости коэффициента уплотнения от деформации слоя, размера фракции и толщины, которые имеют вид:

- при толщине 0,05м:
  - для фракции 5-20 мм  $K_y = 0,73e^{0,013\lambda}$ ,
  - для фракции 20-40 мм  $K_y = 0,66e^{0,041\lambda}$
- при толщине 0,1м:
  - для фракции 5-20 мм  $K_y = 0,47e^{0,0363\lambda}$ ,
  - для фракции 20-40 мм  $K_y = 0,72e^{0,014\lambda}$ ,

где  $\lambda$  – деформация слоя материала, мм.

Коэффициент корреляции уравнений равен 0,96-0,98.

### Выводы

1. Выбор параметров уплотняющих машин необходимо осуществлять с учетом характеристик битумоминеральной смеси.
2. Установлены зависимости для определения контактных напряжений под вальцом катка с учетом силового воздействия на уплотняемую смесь.
3. Установлены взаимосвязи между характеристиками слоя асфальтогранулята при действии нагрузки и их влияние на его деформацию.
4. Получены аналитические зависимости между деформацией слоя и его коэффициентом уплотнения.

### Список литературы

1. Хархута Н.Я. Вопросы теории уплотнения дорожных покрытий // Уплотнение земляного полотна и дорожных одежд: тр. Союздорнии. М., 1980. С. 64-71.
2. Пермяков В.Б., Захаренко А.В. Обоснование величины контактных давлений для уплотнения асфальтобетонных смесей // Строительные и дорожные машины. 1989. № 5. С. 12-13.
3. Пермяков В.Б. Эффективность уплотнения асфальтобетонных смесей в дорожных покрытиях // Строительные материалы. 2005. №10. С.8-9.

4. Цупиков С.Г. Справочник дорожного мастера. Строительство, эксплуатация и ремонт автомобильных дорог / под ред. С.Г. Цупикова. М.: Инфра-Инженерия, 2009. 924 с.
5. Калгин Ю.И., Строкин А.С., Тюков Е.Б. Перспективные технологии строительства и ремонта дорожных покрытий с применением модифицированных битумов. Воронеж, 2014. 223с.
6. Руденский, А.В. Холодный асфальтобетон. Возможности продления сезона строительных и ремонтных работ // Новости в дор. деле: науч.-техн. информ. сб. Информавтодор. М., 2006. Вып.1. С. 11 - 42.
7. Калгин Ю.И. Дорожные битумоминеральные материалы на основе модифицированных битумов. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2006. 272 с.
8. Технология строительства и ремонта дорожных покрытий нежесткого типа с учетом температурных режимов асфальтобетонных смесей / А.Ф. Зубков, К.А. Андрианов, А.И. Антонов, В.Г. Однолько. Тамбов, 2017. 316 с.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020611722 «Расчет напряжений в зоне контакта вальца с уплотняемым материалом» С.А. Сенибабнов, И.С. Архелов, А.Ф. Зубков, К.А. Андрианов, А.М. Макаров
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017663676 «Расчет деформаций материала при действии динамической нагрузки», А.Ф. Зубков, К.А. Андрианов, А.М. Макаров, М.Э. Пилецкий
11. Influence of thickness and granulometric composition of granular asphalt on its strength characteristics when placing into the road pavement / E.G. Pakhomova, A.F. Zubkov, K.A. Andrianov, P.V. Monastirev // Journal of applied engineering science. 2020. Vol. 18. № 2. С. 192-197.
12. Макая Л.М., Зубков А.Ф., Андрианов К.А. Разработка математической модели процессов уплотнения слоя дорожной одежды // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений: тезисы докладов VIII-го международного симпозиума. Тамбов, 2023. С. 316-318.
13. Зарапина Л.С., Андрианов К.А., Зубков А.Ф. Влияние свойств материала, получаемого при холодном фрезеровании покрытий нежесткого типа, на деформацию слоя при устройстве дорожной одежды // Научный журнал строительства и архитектуры. 2022. № 1 (65). С. 85-95.
14. Определение реологических характеристик асфальтогранулята при устройстве слоев дорожной одежды / С.А. Сенибабнов, К.А. Андрианов, А.Ф. Зубков, А.А. Кузнецов // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. 2021. № 1 (12). С. 37-42.
15. Сенибабнов С.А., Андрианов К.А., Зубков А.Ф. Влияние толщины слоя асфальтогранулята и выбор параметров катков при укреплении обочин автомобильных дорог // Приволжский научный журнал. 2020. №4 (56). С. 163-173.

16. Эффективность применения асфальтогранулята при ремонте и реконструкции автомобильных дорог / Л.М. Макая, С.А. Сенибабнов, К.А. Андрианов, А.Ф. Зубков // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт. Материалы IX-ой Международной научно-практической конференции, посвящённой памяти академика РААСН Чернышова Е.М., Тамбов, 2022. С. 346-349.

17. Зубков А.Ф. Обоснование параметров контакта металлического вальца катка с уплотняемым материалом // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Дорожно-транспортное строительство. 2004. № 3. С. 77.

18. Piletskii M.E., Andrianov K.A., Zubkov A.F. Influence of the load-carrying capacity of vehicles when performing repair works of road pavements by means of the jet-injection method // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2020. № 1 (45). P. 42-54.

19. Зубков А.Ф., Зарапина Л.С., Андрианов К.А. Влияние нагрузки на модуль упругости слоя из асфальтогранулята при восстановлении покрытия дорожной одежды // Научный журнал строительства и архитектуры. 2022. № 1 (65). С. 96-105.

20. Зубков А.Ф., Андрианов К.А., Сенибабнов С.А. Моделирование процессов уплотнения асфальтогранулята с использованием экспериментальных данных // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений: тезисы докладов VIII-го международного симпозиума. Тамбов, 2023. С. 293-295.

## References

1. Kharkhuta N.Ya. [Questions of the theory of road surface compaction]. *Uplotnenie zemlyanogo polotna i dorozhnykh odezhd. tr. Soyuzdornii* [Compaction of earth bed and road pavements. Proc. of Soyuzdornia. Soyuzdornia]. Moscow, 1980, pp. 64-71 (In Russ.).

2. Permyakov V.B., Zakharenko A.V. Obosnovanie velichiny kontaknykh davlenii dlya uplotneniya asfal'tobetonnykh smesei [Justification of the contact pressure value for compaction of asphalt concrete mixtures]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny = SDM journal*, 1989, no. 5, pp. 12-13.

3. Permyakov V.B. Effektivnost' uplotneniya asfal'tobetonnykh smesei v dorozhnykh pokrytiyakh [Efficiency of compaction of asphalt-concrete mixtures in road pavements]. *Stroitel'nye materialy = Construction Materials*, 2005, no.10, pp. 8-9.

4. Tsupikov S.G. *Spravochnik dorozhnogo мастера. Stroitel'stvo, ekspluatatsiya i remont avtomobil'nykh dorog* [Reference book of a road master. Construction, operation and repair of motorways]; ed. by S.G. Tsupikov. Moscow, Infra-Engineering Publ., 2009, 924 p.

5. Kalgin Yu.I., Strokin A.S., Tyukov E.B. *Perspektivnye tekhnologii stroitel'stva i remonta dorozhnykh pokrytii s primeneniem modifitsirovannykh bitumov* [Perspective technol-

ogies of construction and repair of road surfaces with the use of modified bitumen]. Voronezh, 2014, 223 p.

6. Rudenskiy A.V. [Cold asphalt concrete. Possibilities of extending the season of construction and repair works]. *Novosti v dor. dele. Nauch.-tekhn. inform. sb. Informavtodor* [News in dor. business: Scientific and technical inform. sb. Informavtodor]. Moscow, 2006, is. 1, pp. 11 - 42 (In Russ.).

7. Kalgin Yu.I. *Dorozhnye bitumomineral'nye materialy na osnove modifitsi-rovannykh bitumov* [Road bitumen-mineral materials based on modified bitumen]. Voronezh, 2006, 272 c.

8. Zubkov A.F., Andrianov K.A., Antonov A.I., Odnolko V.G. *Tekhnologiya stroitel'stva i remonta dorozhnykh pokrytii nezhestkogo tipa s uchetom temperaturnykh rezhimov asfal'tobetonnykh smesei* [Technology of construction and repair of non-rigid road pavements taking into account the temperature conditions of asphalt concrete mixtures]. Tambov, 2017. 316 p.

9. Senibabnov S.A., Arkhelov I.S., Zubkov A.F., Andrianov K.A., Makarov A.M. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM* [Certificate of state registration of the computer programme No. 2020611722 "Calculation of stresses in the contact zone of the roller with the compacted material"]].

10. Zubkov A.F., Andrianov K.A., Makarov A.M., Piletsky M.M. Certificate of State Registration of Computer Programme No. 2017663676 *Raschet napryazhenii v zone kontakta val'tsa s uplotnyaemym materia-lom* ["Calculation of Material Deformations under Dynamic Load Action"]].

11. Pakhomova E.G., Zubkov A.F., Andrianov K.A., Monastirev P.V. Influence of thickness and granulometric composition of granular asphalt on its strength characteristics when placing into the road pavement. *Journal of applied engineering science*. 2020, vol. 18, no. 2, pp. 192-197.

12. Makaya L.M., Zubkov A.F., Andrianov K.A. [Development of the mathematical model of the processes of compaction of the pavement layer]. *Aktual'nye problemy komp'yuternogo modelirovaniya konstruksii i sooruzhenii. Tezisy dokladov VIII-go mezhdunarodnogo simpoziuma* [Actual problems of computer modelling of structures and constructions. Theses of reports of the VIII-th International Symposium]. Tambov, 2023, pp. 316-318 (In Russ.).

13. Zarapina L.S., Andrianov K.A., Zubkov A.F. Vliyanie svoistv materiala, poluchaemogo pri kholodnom frezerovanii pokrytii nezhestkogo tipa, na deformatsiyu sloya pri ustroistve dorozhnoi odezhdy [Influence of the material properties obtained by cold milling of non-rigid type pavements on the layer deformation during pavement construction]. *Nauchnyi zhurnal stroitel'stva i arkhitektury = Scientific Journal of Construction and Architecture*, 2022, no. 1 (65), pp. 85-95.

14. Senibabnov S.A., Andrianov K.A., Zubkov A.F., Kuznetsov A.A. Opredelenie reologicheskikh kharakteristik asfal'togranulyata pri ustroistve sloev dorozhnoi odezhdy [Determination of rheological characteristics of asphalt granulate in the process of pavement layer construction]. *Vestnik PGUAS: stroitel'stvo, nauka i obrazovanie = Vestnik PSUAS: Construction, Science and Education*, 2021, no. 1 (12), pp. 37-42.

15. Senibabnov S.A., Andrianov K.A., Zubkov A.F. Vliyanie tolshchiny sloya asfal'togranulyata n vybor paramtrov katkov pri ukreplenii obochin avtomobil'nykh dorog [Influence of the asphalt granulate layer thickness and the choice of roller parameters for road shoulder reinforcement]. *Privolzhskii nauchnyi zhurnal = Volga Region Scientific Journal*, 2020, no.4 (56), pp. 163-173.

16. Makaya L.M., Senibabnov S.A., Andrianov K.A., Zubkov A.F. [Efficiency of asphalt granulate application at repair and reconstruction of motor roads]. *Ustoichivoe razvitie regiona: arkhitektura, stroitel'stvo i transport. Materialy IX-oi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Sustainable development of the region: architecture, construction and transport. Proceedings of the IX-th International Scientific and Practical Conference]. Tambov, 2022, pp. 346-349 (In Russ.).

17. Zubkov A.F. Obosnovanie parametrov kontakta metallichesкого val'tsa katka s uplotnyaemym materialom [Justification of the contact parameters of the roller metal roller with the compacted material]. *Nauchnyi vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Dorozhno-transportnoe stroitel'stvo = Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Road and Transport Construction*, 2004, no. 3, 77 p.

18. Piletskii M.E., Andrianov K.A., Zubkov A.F. [Influence of the load-carrying capacity of vehicles when performing repair works of road pavements by means of the jet-injection method]. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*, 2020, no. 1 (45), pp. 42-54.

19. Zarapina L.S., Andrianov K.A. Vliyanie nagruzki na modul' uprugosti sloya iz asfal'togranulyata pri vosstanovlenii pokrytiya dorozhnoi odezhdy [Load effect on the elasticity modulus of the asphalt granulate layer at the road pavement rehabilitation]. *Nauchnyi zhurnal stroitel'stva i arkhitektury = Scientific Journal of Construction and Architecture*, 2022, no. 1 (65), pp. 96-105.

20. Zubkov A.F., Andrianov K.A., Senibabnov S.A. [Modelling of asphalt granulate compaction processes using experimental data]. *Aktual'nye problemy komp'yuternogo modelirovaniya konstruktsii i sooruzhenii. Tezisy dokladov VIII-go mezhdunarodnogo simpoziuma* [Actual problems of computer modelling of structures and constructions. Theses of reports of the VIII-th International Symposium]. Tambov, 2023, pp. 293-295 (In Russ.).

---

## Информация об авторах / Information about the Authors

**Пахомова Екатерина Геннадиевна**, кандидат технических наук, доцент, проректор по научной работе, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: [egpakhomova@yandex.ru](mailto:egpakhomova@yandex.ru)

**Ekaterina G. Pakhomova**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Vice-Rector for Scientific Work, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail address: [egpakhomova@yandex.ru](mailto:egpakhomova@yandex.ru)

**Мавунгу Макая Лионель**, аспирант, Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация, e-mail: [gsiad@mail.tambov.ru](mailto:gsiad@mail.tambov.ru)

**Makaya Lionel Mavungu**, Post-Graduate Student, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, e-mail: [gsiad@mail.tambov.ru](mailto:gsiad@mail.tambov.ru)

**Андрианов Константин Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Городское строительство и автомобильные дороги», Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация, e-mail: [konst-68@yandex.ru](mailto:konst-68@yandex.ru)

**Konstantin A. Andrianov**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department "Urban Construction and Highways", Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, e-mail: [konst-68@yandex.ru](mailto:konst-68@yandex.ru)

**Зубков Анатолий Федорович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Городское строительство и автомобильные дороги», Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация, e-mail: [afzubkov2013@yandex.ru](mailto:afzubkov2013@yandex.ru)

**Anatoly F. Zubkov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department "Urban Construction and Highways", Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, e-mail address: [afzubkov2013@yandex.ru](mailto:afzubkov2013@yandex.ru)

**Монастырев Павел Владиславович**, член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, доцент, директор института «Архитектура, строительство и транспорт», Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация, e-mail: [monastyrev68@mail.ru](mailto:monastyrev68@mail.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0885-0937>, Researcher ID: S-6516-2016

**Pavel V. Monastyrev**, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Director of the Institute of Architecture, Construction and Transport, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, e-mail: [monastyrev68@mail.ru](mailto:monastyrev68@mail.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0885-0937>, Researcher ID: S-6516-2016

**Мордасов Денис Михайлович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материалы и технология», Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация, e-mail: [dmmordasov@rambler.ru\\_mit@tstu.ru](mailto:dmmordasov@rambler.ru_mit@tstu.ru)

**Denis M. Mordasov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Materials and Technology Department, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, e-mail: [dmmordasov@rambler.ru\\_mit@tstu.ru](mailto:dmmordasov@rambler.ru_mit@tstu.ru)

## Алгоритм построения 3d сцен распознанных объектов по картам глубин

М.В. Бобырь<sup>1</sup> ✉, С.Г. Емельянов<sup>1</sup>, Н.А. Милостная<sup>1</sup>

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

✉ e-mail: maxbobyry@gmail.com

### Резюме

**Цель исследования.** Разработка алгоритма построения 3d сцен распознанных объектов по синтезируемым картам глубин, с целью повышения быстродействия обработки изображений в режиме реального времени.

**Методы.** Алгоритм построения 3d сцен основывается на методе построения стереоизображений с помощью трехуровневой нечеткой модели построения карт глубин. На первом уровне этой модели определяются границы объектов с помощью модифицированного алгоритма Канни, на втором уровне вычисляются значения диспарантности на основе модифицированного методами нечеткой логики алгоритма суммы абсолютных разностей, и на заключительном уровне вначале вычисляются градиенты расстояний от границ изображений до краев распознанных объектов и затем по полученным значениям диспарантности на втором и третьем уровне нечеткой иерархической модели вычисляются уточненные значения диспаритета, по которым осуществляется построение карты глубин и 3d сцен распознанных объектов.

**Результаты.** Разработан алгоритм построения 3d сцен распознанных объектов по синтезируемым картам глубин. Определено, что предложенный алгоритм имеет лучшее быстродействие по сравнению с существующими алгоритмами построения карт глубин, такими как алгоритм сопряженных точек и пирамидальный алгоритм.

**Заключение.** Результаты экспериментальных исследований показали, что предложенный алгоритм имеет меньшую сложность по сравнению с анализируемыми алгоритмами (сопряженных точек и пирамидальный). Минимальное среднее время выполнения операции построения 3d сцен составило порядка 1-2 минуты, что почти в 120 раз лучше по сравнению с алгоритмом сопряженных точек.

---

**Ключевые слова:** 3d сцена; стереозрение; карта глубин; нечеткая логика; выделение контуров объектов.

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

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 23-21-00071 – «Разработка модели компьютерного зрения для интеллектуальной навигации робототехнических систем, основанной на построении трехмерных сцен по картам глубин».

**Для цитирования:** Бобырь М.В., Емельянов С.Г., Милостная Н.А. Алгоритм построения 3d сцен распознанных объектов по картам глубин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(2): 90-104. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-90-104>.

Поступила в редакцию 27.04.2023

Подписана в печать 18.05.2023

Опубликована 02.08.2023

## Algorithm for Creating 3d Scenes of Recognized Objects from Depth Maps

Maksim V. Bobyr <sup>1</sup> ✉, Sergey G. Emelyanov <sup>1</sup>, Natalia A. Milostnaya <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University

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

✉ e-mail: maxbobyr@gmail.com

### Abstract

**Purpose of research.** Development of an algorithm for constructing 3d scenes of recognized objects from synthesized depth maps in order to improve the speed of real-time image processing.

**Methods.** The 3d scene construction algorithm is based on the method of stereo image construction using a three-level fuzzy depth map construction model. At the first level of this model the boundaries of objects are determined using a modified Canny algorithm, at the second level the values of disparity are calculated on the basis of the sum of absolute differences algorithm modified by fuzzy logic methods, and at the final level the gradients of distances from the boundaries of images to the edges of recognized objects are calculated first and then according to the obtained values of disparity at the second and third levels of the fuzzy hierarchical model, the refined values of disparity are calculated, which are used to carry out the analysis of the depth map.

**Results.** An algorithm for constructing 3d scenes of recognized objects using synthesized depth maps has been developed. It was determined that the proposed algorithm has better performance compared to existing depth map algorithms such as conjugate point algorithm and pyramidal algorithm.

**Conclusion.** The experimental results showed that the proposed algorithm has a lower complexity compared to the analyzed algorithms (conjugate points and pyramidal). The minimum average execution time of the 3d scene construction operation was about 1-2 minutes, which is almost 120 times better compared to the conjugate point algorithms.

**Keywords:** 3d scene; stereo vision; depth map; fuzzy logic; object contour extraction.

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

**Funding.** The work was carried out within the framework of the Russian Science Foundation grant No. 23-21-00071 "Development of a computer vision model for intelligent navigation of robotic systems based on the construction of three-dimensional scenes based on depth maps".

**For citation:** Bobyr M. V., Emelyanov S. G., Milostnaya N. A. Algorithm for Creating 3d Scenes of Recognized Objects from Depth Maps. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(2): 90-104 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-90-104>.

Received 27.04.2023

Accepted 18.05.2023

Published 02.08.2023

## Введение

При работе над новыми моделями машинного обучения для систем технического зрения возникают определенные задачи. Одна из них связана с созданием трехмерных сцен на основе вычисленных карт глубин стереоизображений и определением взаимного расположения объектов на них. Это необходимо для разработки маршрутов движения роботизированных комплексов. Решением данной проблемы является использование систем технического зрения с применением: лазерных дальнометров (лидары), использующих SLAM-модели [1], и/или системы стереозрения [2, 3]. Лидары являются активными устройствами и поэтому излучают сигналы в окружающую среду, при перехвате данного сигнала не трудно вычислить их местоположение в пространстве. Системы зрения, использующие видеокамеры, являются пассивными устройствами, то есть не излучают сигналы во внешнюю среду и поэтому определение их положения затруднительно. Для формирования 3d сцен подобные системы, используя видеоданные, полученные от двух и более видеокамер, формируют карты глубин, представляющие собой изображение с градациями серого цвета. Яркость элементов указывает на расстояние от видеокамеры до объектов. К основным моделям обработки стереоинформации относятся пирамидальный алгоритм и алгоритм сопряженных точек [4, 5, 6].

Алгоритм сопряженных точек (ConjugateGradientMethod) является наиболее применяемым методом построения стереоизображений [4]. Суть алгоритма сводится к выбору одной из точки на левом изображении вместе с ее малой окрестностью и её корреляции с соответствующей точкой на правом стереоизображении. Когда корреляция достигает максимума на правом изображении, то на левом изображении фиксируется соответствующая сопряженная точка, которая определяет дальнейшее направление работы алгоритма. Таким образом, выбор нового направления позволяет избегать повторного прохода по уже пройденным направлениям. Этот процесс итеративно выполняется для каждого пикселя левого стереоизображения, в начале устанавливается соответствие пиксель-к-пикселю, а затем находится величина диспарантности.

Эффективность алгоритма при размере изображения ( $W \times H$ ) оценивается как количество операций, необходимых для формирования карты глубин, и составляет  $(W \times H)^2$ . При обработке квадратной матрицы пропорционально  $W^4$ . Так, для матрицы  $128 \times 128$ , составит  $16384 \times 14 = 0.1$  секунды, а при обработке в формате HighDefinition ( $W=1024$ ) составит порядка 4 часов<sup>1</sup> [4].

---

<sup>1</sup> Милостная Н. А. Методология синтеза интеллектуальных высокопроизводительных нейронечетких систем технического зрения»: дис. ... д-ра техн. наук. Курск, 2023. 350 с.

Пирамидальный алгоритм построения карт глубин является методом обработки изображений, который используется для оценки глубины 3d сцены. Он основан на идее построения пирамиды изображений разного разрешения для эффективного анализа глубины.

Основными этапами данного метода являются следующие шаги:

1. Построение пирамиды изображений: Исходное изображение разделяется на несколько уровней разрешения (от низкого разрешения до высокого), создавая так называемую пирамиду изображений. Эта операция позволяет уменьшить вычислительную сложность алгоритма.

2. Вычисление карт глубин для каждого уровня пирамиды: для каждого уровня пирамиды изображений вычисляются карты глубин, например, с помощью алгоритма SAD [7] или других известных алгоритмов компьютерного зрения.

3. Объединение результатов: результаты обработки на разных уровнях пирамиды объединяются с учетом разрешения, чтобы получить итоговую карту глубин с высоким разрешением и последующим определением диспаратности на ней.

Пирамидальные алгоритмы позволяют эффективно обрабатывать изображения разного разрешения и получать более точные карты глубин. Показатель  $O(W^2)$  немного лучше, чем у предыдущего метода и составляет примерно 1-1.5 часа.

Однако общим недостатком этих методов является то, что не каждой точке

левого стереоизображения будет сопоставлена сопряженная точка на правом стереоизображении, что приводит к неравномерным разрывам в итоговой карте глубин, а также обработки стереоизображений в несколько проходов.

Таким образом, вопросы, связанные с повышением быстродействия обработки стереоизображений на основе нейро-нечеткого подхода являются актуальной задачей. При этом данный подход позволяет обеспечить увеличение быстродействия процесса обработки стереоинформации при достижении заданной точности вычислений. Под быстродействием понимается выполнение одного нейро-нечеткого вывода в единицу времени. Для успешной реализации данной проблемы необходимо выполнить следующие действия: сократить количество этапов обработки каждого пикселя на стереокартине; уменьшить число степеней свободы нейро-нечеткой модели за счет унификации количества переменных в модели дефазификации. Другое направление увеличения быстродействия систем стереозрения связано с применением вычислительных методов параллельной обработки данных [8, 9, 10, 11].

## Материалы и методы

Вычислительный процесс в системах технического зрения (СТЗ) представляет собой математическую модель, которая позволяет в режиме реального времени осуществлять оценку взаимного расположения объектов по получен-

ным данным от сенсоров. СТЗ могут использоваться в качестве измерительных устройств или управляющих систем для роботизированных комплексов, для реализации различных технологических операций, таких, как складирования объектов, контроль перемещения объектов на гибких производственных линиях и других операциях производственных процессов [12, 7, 13]. СТЗ эффективно и последовательно выполняет сложные и повторяющиеся задачи с высокой скоростью.

Основными этапами вычислительного процесса обработки информации в СТЗ и определения координат объектов по ним являются следующие:

1. Загрузка изображения, на котором требуется распознать объект и определить расстояние до него.

2. Преобразование цветовой модели изображения. Например, трансформирование RGB-изображения (полученного от КМОП-видеокамеры) в цветовую модель HSV (оттенок, насыщенность, значение).

3. Сегментация изображения на основе распознавания контуров объектов с использованием алгоритмов Канни [14, 15, 16] или Оцу [17]).

4. Фильтрация обнаруженных контуров объектов [18].

5. Выбор объекта, соответствующего заданным требованиям.

6. Определение координат центра масс распознанного объекта по детектируемым границам [19, 20].

Классификация СТЗ и её архитектура<sup>1</sup> представлена на рис. 1.

Обобщенная методология построения карт глубин состоит из следующей последовательности действий. Вычисления осуществляются над правым и левым стереоизображениями.

1. Трансформация RGB изображения и определение яркости  $I$  черно-белого изображения с градациями уровня серого:

$$I = 0,299R + 0,587G + 0,114B,$$

где  $R$ ,  $G$ ,  $B$  – значение интенсивности красного, зеленого и синего цветов в пикселе, соответственно.

2. Размытие полутонового изображения в рамке  $5 \times 5$ :

$$K = \sum_{x=-2}^2 \sum_{y=-2}^2 \frac{1}{b} G_m \cdot I,$$

где  $b$  – нормировочный коэффициент;  $G_m$  – матрица Гаусса.

3. Свертка изображения матрицей Собеля (окно  $3 \times 3$ ) и вычисление градиента яркости  $G$  изображения по формулам:

$$GX = \sum_{y=-1}^1 \sum_{x=-1}^1 S_x \cdot K = \sum_{y=-1}^1 \sum_{x=-1}^1 \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot K,$$

$$GY = \sum_{y=-1}^1 \sum_{x=-1}^1 S_y \cdot K = \sum_{y=-1}^1 \sum_{x=-1}^1 \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \cdot K,$$

$$G = \sqrt{GX^2 + GY^2},$$

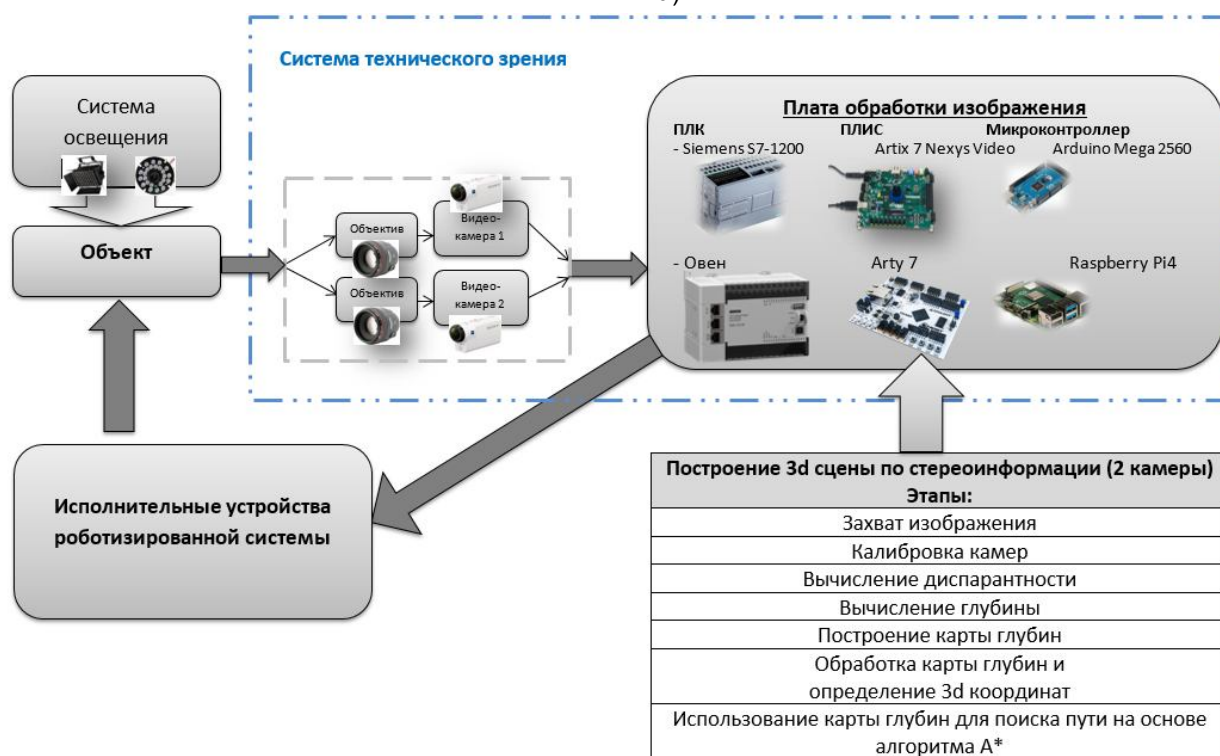
где  $S_x$ ,  $S_y$  – матрицы Собеля в вертикальном и горизонтальном направлениях.

<sup>1</sup> Милостная Н. А. Методология синтеза интеллектуальных высокопроизводительных нейронечетких систем технического зрения»: дис. ... д-ра техн. наук. Курск, 2023. 350 с.

4. Расчет угла градиента:  $\Theta = \text{round} \left( \frac{\text{atan} \left( \frac{GY}{GX} \right)}{\frac{\pi}{4}} \right) \Rightarrow \begin{cases} 0^\circ, & \text{если } \Theta = 4, \Theta = -4, \Theta = 0 \\ 45^\circ, & \text{если } \Theta = 1, \Theta = -3 \\ 90^\circ, & \text{если } \Theta = 2, \Theta = -2 \\ 135^\circ, & \text{если } \Theta = 3, \Theta = -1. \end{cases}$



а)



б)

Рис. 1. Система технического зрения: а – классификация; б – архитектура

**Fig. 1.** Technical vision system: **a** – classification; **б** – architecture

5. Фаззификация градиентов яркости по уравнению:

$$\Delta G_i = G - G_i.$$

6. Вычисление степеней принадлежности входных переменных:

$$\mu(\Delta G_i) = \begin{cases} \frac{\Delta G_i - a}{b - a}, & \text{if } \Delta G_i > a \ \& \ \Delta G_i \leq b \\ 1, & \text{if } \Delta G_i > b \ \& \ \Delta G_i \leq c \\ \frac{d - \Delta G_i}{d - c}, & \text{if } \Delta G_i > c \ \& \ \Delta G_i \leq d \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

7. Создание базы нечетких правил по обобщенному нечеткому правилу<sup>1</sup>:

$$R_{i=1...16} = \min[\mu(\Delta G_i), \mu(\Delta G_j), \mu(\Delta G_k)].$$

8. Вычисление границ детектируемого объекта:

$$DeFuzzy = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^4 R_i \cdot Edge_i}{\sum_{i=1}^4 R_i}, & \text{if } \Theta = 4, \Theta = -4, \Theta = 0 \\ \frac{\sum_{i=5}^8 R_i \cdot Edge_i}{\sum_{i=5}^8 R_i}, & \text{if } \Theta = 1, \Theta = -3, \\ \frac{\sum_{i=9}^{12} R_i \cdot Edge_i}{\sum_{i=9}^{12} R_i}, & \text{if } \Theta = 2, \Theta = -2, \\ \frac{\sum_{i=13}^{16} R_i \cdot Edge_i}{\sum_{i=13}^{16} R_i}, & \text{if } \Theta = 3, \Theta = -1. \end{cases}$$

9. Бинаризация изображения:

$$edge = \begin{cases} 1, & \text{if } DeFuzzy > Threshold \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

10. Удаление концевых точек и объединение разрывов на границах детектируемых объектов<sup>1</sup>.

11. Расчет уровней интенсивности на стереоизображениях в окне с рамкой  $m \times n$ :

$$SAD(x, y, d) = \sum_{m=-b}^{m=b} R \sum_{n=-b}^{n=b} G \sum_{m=-b}^{m=b} B |I_l(x+m, y+n) - I_r(x+m+d, y+n)|,$$

где  $I_l, I_r$  – интенсивность цвета на левом и правом стереоизображениях;  $x, y$  – координаты обрабатываемого пикселя на стереоизображениях;  $d$  – порог  $d = 0 \dots d_{max}$

12. Фаззификация разницы уровней яркости (см. п.6).

13. Формирование базы нечетких правил по зависимости:

$$R_{i=1...27} = IF \ SAD_i \ Is \ \mu(A_{1i}),$$

$$SAD_i \ Is \ \mu(A_{2i}),$$

$$SAD_i \ Is \ \mu(A_{3i}),$$

$$\text{Then } d \ Is \ Y_h.$$

14. Вычисление смещения каждого пикселя с помощью композиционного правила и мягких формул нахождения экстремумов функций:

$$N_i = \Theta(\mu(A_{1i}), \mu(A_{2i}), \mu(A_{3i})).$$

$$Y_i = \Psi(N_i, N_k, N_l),$$

где  $\Theta, \Psi$  – операции нахождения экстремумов функций:  $\Theta$  – одна из операций нахождения t-норм;  $\Psi$  – одна из операций нахождения s-норм.

<sup>1</sup> Милостная Н. А. Методология синтеза интеллектуальных высокопроизводительных нейронечетких систем технического зрения»: дис. ... д-ра техн. наук. Курск, 2023. 350 с.

15. Расчет четкого значения на выходе нечетко-логической системы на основе метода отношения площадей [21]

$$D_{d=1}^{d_{\max}} = \frac{S_{11}}{S_{12}} (Y_{11} - Y_1) + Y_1.$$

где  $S_{11}$ ,  $S_{12}$  – площади общей фигуры и усеченных функций принадлежности, соответственно.

16. Вычисление диспаратета:

$$DIS = \arg \min_{d \in [0 \dots d_{\max}]} \left( D_{d=1}^{d_{\max}} \right).$$

17. Вычисление распределения яркости по изображению:

$$CountL_{Li}^w = \begin{cases} 0, & \text{if } E = 1 \\ CountL_{Li} + 1 & \text{if } E = 0 \text{ (non-edge)} \end{cases},$$

$$CountL_{Ri}^0 = \begin{cases} 0, & \text{if } E = 1 \\ CountL_{Ri} + 1 & \text{if } E = 0 \text{ (non-edge)} \end{cases}.$$

18. Вычисление разницы градиентов от границ стереоизображений:

$$DifL_{x=1, y=1, d=1}^{w, h, 128} = |CountL_L(x, y) - CountL_R(x + d, y)|,$$

19. Фаззификация входных переменных и создание базы нечетких правил (см. п.п. 13 и 15).

20. Определение диспаритера (см. п. 16).

В дальнейшем предложенная методология может использоваться для перемещения мобильных роботов, на основе предложенного в научном исследовании [22, 23, 24] модифицированного алгоритма  $A^*$ .

Для построения 3d сцен по вычисленной карте глубин используется следующий алгоритм (рис. 2).

На каждом из этапов вышеуказанного алгоритма (рис. 2) делаются следующие операции. На первом шаге алгоритма осуществляется считывание

данных о величине диспарантности из карты глубин, и они записываются в массив данных для последующей обработки. Затем на втором шаге значения диспарантности преобразуются в значения глубины до порогового значения  $d_{\max}$ . После этого на третьем шаге осуществляется преобразование глубины в трехмерную модель. При реализации данной вычислительной операции создается облако точек, формирующих поверхность распознанных объектов на карте глубин.

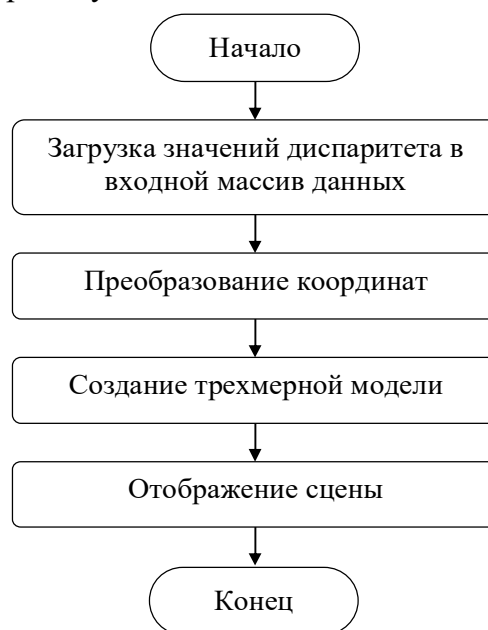


Рис. 2. Алгоритм построения 3d сцены

Fig. 2. Algorithm for constructing the 3D scene

На заключительном шаге полученная трехмерная модель визуализируется с помощью классических методов компь-

ютерной графики, где трехмерные объекты и их геометрия закрашиваются. Эти этапы позволяют преобразовать данные о расстоянии до объектов из карты глубин в трехмерную модель сцены.

### Результаты и их обсуждение

Алгоритмы распознавание контуров трехмерных объектов на основе информации, извлеченной из пар стереоизображений, были реализованы в виде специализированного программного обеспе-

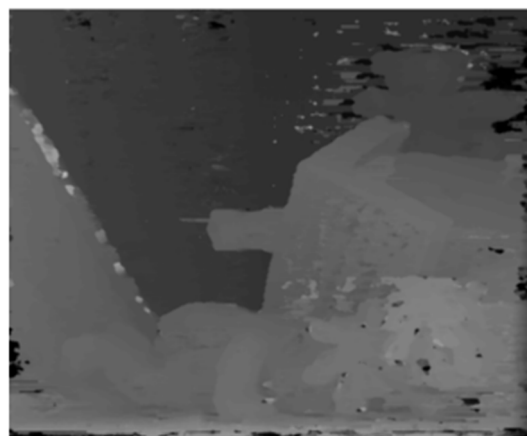
чения, разработанного на языке C# в среде MVS 2019. Программное обеспечение было установлено на ПК IntelCore i5-8600K (3,60 ГГц), ОЗУ 16 ГБ, Win10. Эксперименты повторялись 100 раз для каждого стереоизображения.

Визуализация построения 3d сцены по вычисленной карте глубин представлена на рис. 3.

Оценка производительности алгоритма построения 3d сцен для разных моделей сведена в табл. 1.



а)



б)



в)

**Рис. 3.** 3d сцена для изображения Тэдди-мишки: **а** – исходное изображение; **б** – карта глубин; **в** – 3d сцена

**Fig. 3.** 3D scene for the Teddy bear image: **a** – original image; **b** – depth map; **v** – 3D scene

**Таблица 1.** Производительность моделей построения 3d сцен

**Table 1.** Performance of 3D scene construction models

| Алгоритм / Algorithm | Изображение / Image | Сложность / Difficulty | Время, мин / Time, min |
|----------------------|---------------------|------------------------|------------------------|
| Сопряженных точек    | 128×128             | $N^4$                  | $\approx 240$          |
| Пирамидальный        | 128×128             | $N^3$                  | $\approx 60 \div 80$   |
| Предложенный метод   | 1130×1616           | $N$                    | $\approx 1 \div 2$     |

Анализ результатов, представленных в табл. 1, показал что предложенная методика построения 3d сцен имеет временную сложность  $O(N)$ , которая прямо зависит от количества пикселей в начальном изображении. Это определение основано на суммировании степеней временной сложности каждой процедуры предложенной методики.

### Выводы

В представленной работе описана методика построения 3d сцен на основе

значений диспарантности вычисленных по карте глубин обработанных стереоизображений. Проведены экспериментальные исследования, в результате которых было определено, что предложенная методика обладает наилучшими характеристиками по сравнению с пирамидальным методом и алгоритмом сопряженных точек. Также представлен процесс визуализации 3d сцены по вычисленной карте глубин.

### Список литературы

1. Elhashash M., Qin R. Cross-view SLAM solver: Global pose estimation of monocular ground-level video frames for 3D reconstruction using a reference 3D model from satellite images // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2022, 188, 62–74. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.03.018>
2. Bobyr M., Arkhipov A., Emelyanov S., Milostnaya N. A method for creating a depth map based on a three-level fuzzy model// Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 117. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105629>
3. Аврашков П. П., Коськин Н. А., Константинов И. С. Оценка эффективности различных моделей конвертации изображений в стереоформат с помощью карт глубины // Научно-технический вестник Поволжья. 2020. № 12. С. 165-168.

4. Потапов А. А., Гуляев Ю. В., Никитов С. А. Новейшие методы обработки изображений. М.: Физико-математическая литература, 2008. 496 с.
5. Гусев В. В. Оценка точности алгоритмов корреляционного совмещения и алгоритмов получения пирамидального представления изображений // Сфера знаний: структурные преобразования и перспективные направления развития научной мысли. Казань, 2018. С. 308-311.
6. Никитин С. В., Грузман И. С. Алгоритм поиска сопряженных точек // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. 2007. № 1. С. 51-54.
7. Бобырь М. В., Архипов А. Е., Якушев А. С. Распознавание оттенка цветовой метки на основе нечёткой кластеризации // Информатика и автоматизация. 2021. № 20(2). С. 407-434.
8. Реализация одного метода цифровой обработки изображений на параллельном компьютере / В. А. Франц, В. В. Воронин, В. И. Марчук, Д. С. Гавриленко // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. 2011. № 1. С. 312-317.
9. Белова О. П. Параллельная цифровая обработка изображений на базе ПЛИС на примере реализации медианного фильтра // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство: сборник научных статей по итогам четвертой международной научной конференции. Казань: ООО «Конверт», 2019. Ч. 2. С. 105-110.
10. Баев А. А., Роженов А. А. Применение параллельных вычислений в задачах обработки изображений флуоресцентных точечных излучателей // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2018. Т. 82, № 12. С. 1666-1670. DOI 10.1134/S0367676518120037.
11. Кий К. И., Анохин Д. А., Подопросветов А. В. Программная система обработки изображений с параллельными вычислениями // Программирование. 2020. № 6. С. 41-54. DOI 10.31857/S0132347420060047.
12. Бобырь М.В., Дородных А.А., Якушев А.С. Устройство и программная модель управления пневматическим мехатронным комплексом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018;19(9):612-617. <https://doi.org/10.17587/mau.19.612-617>
13. Daeef F. Application of the computer vision system for controlling a mobile robot in a dynamic environment // Computing, Telecommunications and Control. 2020. Vol. 13. No. 1. P. 19-30. DOI 10.18721/JCSTCS.13102.
14. Построение карты глубины с использованием модернизированного фильтра Канни. Часть 1 / М. В. Бобырь, А. Е. Архипов, А. С. Якушев, Ц. Цао // Промышленные АСУ и контроллеры. 2021. № 4. С. 12-20. DOI 10.25791/asu.4.2021.1271.

15. Построение карты глубины с использованием модернизированного фильтра Канни. Часть 2 / М. В. Бобырь, А. Е. Архипов, А. С. Якушев, С. Бхаттачарья // Промышленные АСУ и контроллеры. 2021. № 5. С. 3-15. DOI 10.25791/asu.5.2021.1277.
16. Костюхина Г. В., Шлеймович М. П. Настройка модифицированного детектора Канни на основе модели энергетических признаков вейвлет-преобразования // Южно-Сибирский научный вестник. 2019. № 2(26). С. 123-128. DOI 10.25699/SSSB.2019.2(26).32536.
17. Ракова В. В., Болсуновская М. В., Звягин П. Н. Точность распознавания контуров моделированных льдин // Полярная механика. 2018. № 4. С. 185-193.
18. Нечетко-логические методы в задаче детектирования границ объектов / М. В. Бобырь, А. Е. Архипов, С. В. Горбачев, Ц. Цао, С. Б. Бхаттачарья // Информатика и автоматизация. 2022. Вып. 21, том 2, с. 376–404.
19. Прикладные нейро-нечеткие вычислительные системы и устройства / М. В. Бобырь, С. Г. Емельянов, А. Е. Архипов, Н. А. Милостная. М.: Издательский Дом "Инфра-М", 2023. 263 с. (Научная мысль). DOI 10.12737/1900641.
20. Емельянов С. Г., Бобырь М. В., Бондаренко Б. А. Нечетко-логическая система распознавания цвета с помощью быстродействующего дефаззификатора // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 27(4): 103-116. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-103-116>.
21. Bobyr M. V., Milostnaya N. A., Bulatnikov V. A. The fuzzy filter based on the method of areas' ratio // Applied Soft Computing. 2022. Vol. 117. P. 108449. DOI 10.1016/j.asoc.2022.108449.
22. Емельянов С. Г., Бобырь М. В., Крюков А. Г. Исследование свойств алгоритма поиска в ширину для нахождения маршрута передвижения роботов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(4): 39-56. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-39-56>.
23. Bobyr M. V., Emelyanov S. G. A nonlinear method of learning neuro-fuzzy models for dynamic control systems // Applied Soft Computing. 2020. Vol. 88. P. 106030. DOI 10.1016/j.asoc.2019.106030.
24. Bobyr M. V., Yakushev A. S., Dorodnykh A. A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA // Measurement. 2020. Vol. 152. P. 107378. DOI 10.1016/j.measurement.2019.107378.

## References

1. Elhashash M., Qin R. Cross-view SLAM solver: Global pose estimation of monocular ground-level video frames for 3D reconstruction using a reference 3D model from satellite images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, 188, 62–74. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.03.018>

2. Bobyr M., Arkhipov A., Emelyanov S., Milostnaya N. A method for creating a depth map based on a three-level fuzzy model. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 117. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105629>
3. Avrashkov P. P., Kos'kin N. A., Konstantinov I. S. Otsenka effektivnosti raz-lichnykh modelei konvertatsii izobrazhenii v stereoformat s pomoshch'yu kart glubiny. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya = Scientific and Technical Volga Region Bulletin*, 2020, no. 12, pp. 165-168.
4. Potapov A. A., Gulyaev Yu. V., Nikitov S. A. *Noveishie metody obrabotki izobrazhenii* [Latest Image Processing Techniques]. Moscow, Fiziko-matematicheskaya literatura Publ., 2008, 496 p.
5. Gusev V. V. [Assessment of the accuracy of correlation matching algorithms and algorithms for obtaining pyramidal representation of images]. *Sfera znanii: strukturnye preobrazovaniya i perspektivnye napravleniya razvitiya nauchnoi mysli* [Field of knowledge: structural transformations and promising directions for the development of scientific thought]. Kazan', OOO "SitIvent" Publ., 2018, pp. 308-311 (In Russ.).
6. Nikitin S. V., Gruzman I. S. Algoritm poiska sopryazhennykh toчек [Algorithm for searching conjugate points]. *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya. Materialy dokladov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Electronics and control systems. Materials of reports of the International Scientific and Practical Conference*, 2007, no. 1, pp. 51-54.
7. Bobyr' M. V., Arkhipov A. E., Yakushev A. S. Raspoznavanie ottenka tsvetovoi metki na osnove nechetkoi klasterizatsii [Color mark shade recognition based on fuzzy clustering]. *Informatika i avtomatizatsiya = Computer Science and Automation*, 2021, no. 20(2), pp. 407-434.
8. Frants V. A., Voronin V. V., Marchuk V. I., Gavrilenko D. S. Realizatsiya odnogo metoda tsifrovoy obrabotki izobrazhenii na parallel'nom komp'yutere [Implementation of one method of digital image processing on a parallel computer]. *Informatsionnye tekhnologii. Radioelektronika. Telekommunikatsii = Information Technology. Radioelectronics. Telecommunications*, 2011, no. 1, pp. 312-317.
9. Belova O. P. [Parallel digital image processing based on FPGA using the example of a median filter implementation]. *Peredovye innovatsionnye razrabotki. Perspektivy i opyt ispol'zovaniya, problemy vnedreniya v proizvodstvo. Sbornik nauchnykh statei po itogam chetvertoi mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* [Advanced innovative developments. Prospects and experience of use, problems of implementation in production. Collection of scientific articles based on the results of the fourth international scientific conference]. Kazan', 2019, pp. 105-110 (In Russ.).
10. Baev A. A., Rozhentsov A. A. Primenenie parallel'nykh vychislenii v zadachakh obrabotki izobrazhenii fluorestscentnykh tochechnykh izluchatelei [Application of parallel computing in problems of image processing of fluorescent point emitters]. *Izvestiya Rossii-*

*sloi akademii nauk. Seriya fizicheskaya = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Physical Series*, 2018, vol. 82, no. 12, pp. 1666-1670. DOI 10.1134/S0367676518120037.

11. Kii K. I., Anokhin D. A., Podoprosvetov A. V. Programmnaya sistema obrabotki izobrazhenii s parallel'nymi vychisleniyami [Parallel image processing software system]. *Programmirovaniye = Programming*, 2020, no. 6, pp. 41-54. DOI 10.31857/S0132347420060047.

12. Bobyr' M.V., Dorodnykh A.A., Yakushev A.S. Ustroistvo i programmnaya model' upravleniya pnevmaticheskim mekhatronnym kompleksom [Device and software model for controlling a pneumatic mechatronic complex]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, Automation, Control*. 2018; 19(9): 612-617. <https://doi.org/10.17587/mau.19.612-617>

13. Daeef F. Application of the computer vision system for controlling a mobile robot in a dynamic environment. *Computing, Telecommunications and Control*, 2020, vol. 13, no. 1, pp. 19-3. DOI 10.18721/JCSTCS.13102.

14. Bobyr'M. V., Arkhipov A. E., Yakushev A. S., Tsao Ts. Postroenie karty glubiny s ispol'zovaniem modernizirovannogo fil'tra Kanni [Constructing a depth map using a modernized Canny filter. Chast' 1]. *Promyshlennyye ASU i kontrolyery = Industrial Automated Control Systems and Controllers*, 2021, no. 4, pp. 12-20. DOI 10.25791/asu.4.2021.1271.

15. Bobyr'M. V., Arkhipov A. E., Yakushev A. S., Tsao Ts. Postroenie karty glubiny s ispol'zovaniem modernizirovannogo fil'tra Kanni [Constructing a depth map using a modernized Canny filter. Chast' 2.]. *Promyshlennyye ASU i kontrolyery = Industrial Automated Control Systems and Controllers*, 2021, no. 5, pp. 3-15. DOI 10.25791/asu.5.2021.1277.

16. Kostyukhina G. V., Shleimovich M. P. Nastroika modifitsirovannogo detektora Kanni na osnove modeli energeticheskikh priznakov veivlet-preobrazovaniya [Setting up a modified Canny detector based on the wavelet transform energy signature model]. *Yuzhno-Sibirskii nauchnyi vestnik = South Siberian Scientific Bulletin*, 2019, no. 2(26), pp. 123-128. DOI 10.25699/SSSB.2019.2(26).32536.

17. Rakova V. V., Bolsunovskaya M. V., Zvyagin P. N. Tochnost' raspoznavaniya konturov modelirovannykh l'din [Accuracy of recognition of contours of simulated ice floes]. *Polyarnaya mekhanika = Polar Mechanics*, 2018, no. 4, pp. 185-193.

18. Bobyr' M. V., Arkhipov A. E., Gorbachev S. V., Tsao Ts., Bkhattachar'ya S. B. Nechetko-logicheskie metody v zadache detektirovaniya granits ob'ektov [Fuzzy logical methods in the problem of detecting object boundaries]. *Informatika i avtomatizatsiya = Informatics and Automation*, 2022, vyp. 21, vol. 2, pp. 376-404.

19. Bobyr'M. V., Emel'yanov S. G., Arkhipov A. E., Milostnaya N. A. *Prikladnyye neuro-nechetkie vychislitel'nye sistemy i ustroystva* [Applied neuro-fuzzy computing systems and devices]. Moscow, Infra-M Publ., 2023. 263 p. (Nauchnaya mysl'). ISBN 978-5-16-017976-6. DOI 10.12737/1900641.

20. Emelianov S. G., Bobyr M. V., Bondarenko B. A. Fuzzy-logic Color Recognition System Using a Fast Defuzzifier. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*

= *Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(4): 103-116 (In Russ.). [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2022-26-4-103-116](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-103-116).

21. Bobyr M. V., Milostnaya N. A., Bulatnikov V. A. The fuzzy filter based on the method of areas' ratio. *Applied Soft Computing*, 2022, vol. 117, pp. 108449. DOI 10.1016/j.asoc.2022.108449.

22. Emelianov S. G., Bobyr M. V., Kryukov A. G. Research of the Properties of the Breadth-First Search Algorithm for Finding the Movement Route of Robots. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(4): 39-56 (In Russ.). [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2022-26-4-39-56](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-39-56).

23. Bobyr M. V., Emelyanov S. G. A nonlinear method of learning neuro-fuzzy models for dynamic control systems. *Applied Soft Computing*, 2020, vol. 88, pp. 106030. DOI 10.1016/j.asoc.2019.106030.

24. Bobyr M. V., Yakushev A. S., Dorodnykh A. A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA. *Measurement*, 2020, vol. 152, pp. 107378. DOI 10.1016/j.measurement.2019.107378.

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Бобырь Максим Владимирович**, доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: [fregat\\_mn@rambler.ru](mailto:fregat_mn@rambler.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5400-6817>, Researcher ID: G-2604-2013

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

**Емельянов Сергей Геннадьевич**, доктор технических наук, профессор, ректор, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: [rector@swsu.ru](mailto:rector@swsu.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3012-0383>, Researcher ID: E-3511-2013

**Sergei G. Emelianov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Rector, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: [rector@swsu.ru](mailto:rector@swsu.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3012-0383>, Researcher ID: E-3511-2013

**Милостная Наталья Анатольевна**, кандидат технических наук, доцент, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: [nat\\_mil@mail.ru](mailto:nat_mil@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3779-9165>

**Natalya A. Milostnaya**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: [nat\\_mil@mail.ru](mailto:nat_mil@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3779-9165>

## Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-105-123>

## Математическая модель автоматизированной системы обучения игре на фортепиано

А.А. Остренко <sup>1</sup>, М.Н. Рыжкова <sup>1</sup> ✉

<sup>1</sup> Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
ул. Орловская, д. 23, г. Муром 602224, Российская Федерация

✉ e-mail: mas mash@mail.ru

### Резюме

**Цель исследования.** В наши дни актуальным является автоматизация дистанционного процесса обучения или самообучения. Однако для повышения его эффективности возникает потребность в лично-ориентированном подходе к ученику. Создание технологий адаптивного обучения становится приоритетной задачей. Целью данной работы стала разработка математической модели автоматизированной системы обучения игре на фортепиано, позволяющей реализовать принципы адаптации учебного процесса.

**Методы.** В статье представлена математическая модель автоматизированной системы обучения игре на фортепиано, для этого рассмотрен один из подходов к моделированию образовательных процессов и систем – кибернетический подход. Использование такого подхода позволяет рассмотреть модель образовательной системы с точки зрения внутренних блоков и их функций, позволяет выявить наборы входных и выходных данных и внутренние взаимосвязи различных компонентов системы. В основу математической модели положены операции алгебры логики и теории множеств.

**Результаты.** В статье получена функциональная схема системы, которая демонстрирует последовательность выполняемых системой действий, а также поток различных множеств входных и выходных данных. Функционал блоков описан в терминологии операторов, которые определяют последовательность и необходимое количество вопросов для определения начальных знаний, умений, навыков обучаемого и его целей, подбирают наиболее оптимальный начальный план обучения, оценивают прогресс и корректируют начальный план обучения в зависимости от результатов обучаемого. Описание входных и выходных данных показывает, какой информацией должна оперировать система для ее корректной и эффективной работы. Еще одним значимым результатом работы стала полученная в результате исследований математическая модель системы, определяющая взаимосвязь входных и выходных данных.

**Заключение.** Кибернетический подход к моделированию образовательной деятельности позволяет структурировать отдельную область образовательной системы, упорядочить сложные логические связи в образовательной системе, определить последовательность и варианты работы системы. Модель будет положена в основу информационной системы обучения игре на фортепиано.

**Ключевые слова:** математическая модель системы; функциональная схема; индивидуализация процесса обучения; автоматизированная система обучения; обучение игре на фортепиано; математическое моделирование.

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

**Для цитирования:** Остренко А.А., Рыжкова М.Н. Математическая модель автоматизированной системы обучения игре на фортепиано // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(2): 105-123. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-105-123>.

Поступила в редакцию 29.06.2023

Подписана в печать 14.07.2023

Опубликована 02.08.2023

## Mathematical Model of an Automated System for Learning to Play the Piano

Anna A. Ostrenko <sup>1</sup>, Mariya N. Ryzhkova <sup>1</sup> ✉

<sup>1</sup> Murom Institute (branch) Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nickolay Grigoryevich Stoletovs  
23 Orlovkaya str., Murom 602264, Russian Federation

✉ e-mail: [masmash@mail.ru](mailto:masmash@mail.ru)

### Abstract

**Purpose of research.** Nowadays, the automation of the distance learning process or self-study is relevant. However, to increase its effectiveness, there is a need for a personality-oriented approach to the student. The creation of adaptive learning technologies is becoming a priority. Development of a mathematical model of an automated system for learning to play the piano was the purpose of this work.

**Methods.** The article discusses one of the approaches to modeling educational processes and systems - the cybernetic approach. The use of this approach allows us to consider the model of the educational system from the point of view of internal blocks and their functions, it allows us to identify sets of input and output data and internal relationships of various components of the system. The mathematical model is based on the operations of the algebra of logic and set theory.

**Results.** Based on the cybernetic approach, the article provides a functional diagram of the system, which clearly demonstrates the sequence of actions performed, as well as the flow of various sets of input and output data. The functionality of the blocks is described in the terminology of operators, which determine the sequence and the required number of questionnaire questions to determine the initial knowledge, skills, and abilities of the trainee and his goals, select the most optimal initial training plan, assess progress and adjust the initial training plan depending on the results of the student. For each operator, sets of inputs and outputs are defined. The description of the data shows what information the system must operate in order for it to work correctly and efficiently. Another significant result of the work was the mathematical model of the system obtained as a result of research, which determines the relationship between input and output data.

**Conclusion.** The cybernetic approach to modeling educational activities, including in the system of additional education, allows you to structure complex logical connections in the educational system, to determine the sequence and options for the system. The model will form the basis of the information system for piano playing teaching.

**Keywords:** the system mathematical model; functional diagram; the learning process individualization; automated learning system; learning to play the piano; 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:** Ostrenko A.A., Ryzhkova M.N. Mathematical Model of an Automated System for Learning to Play the Piano. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(2): 105-123 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-105-123>.

Received 29.06.2023

Accepted 14.07.2023

Published 02.08.2023

\*\*\*

## Введение

В наши дни актуальным является автоматизация дистанционного процесса обучения или самообучения. Однако для повышения его эффективности возникает потребность в личностно-ориентированном подходе к ученику. Создание технологий адаптивного обучения становится приоритетной задачей [1]. В [2] рассматривается современное состояние адаптивного образования, его плюсы и минусы.

Наряду с обязательной образовательной программой, дистанционное обучение широко используется при дополнительном образовании, в частности информационные технологии активно внедряются в музыкальное образование. При этом адаптация образовательной программы под навыки, желания и способности учащегося – наиболее оптимальный вариант дополнительного образования.

Если рассматривать автоматизацию учебного процесса для освоения навыка игры на фортепиано, то видно, что она требует некоторых дополнительных условий для качественного функционирования.

Во-первых, визуализация является не просто вспомогательным, но одним

из обязательных условий для данного вида обучения. Лучше всего такой подход реализован с помощью пошаговой подсветки клавиш на экране или на самой клавиатуре (при наличии специальной техники), когда в зависимости от момента их нажатия они выделяются ярким цветом на фоне остальных.

Во-вторых, чтобы контролировать прохождение курса обучения необходимо отслеживать правильное нажатие клавиш во время игры. Эта функция может работать при наличии:

- 1) сенсорных датчиков экрана (если обучение происходит на виртуальной клавиатуре);
- 2) специальных аппаратных приспособлений для подключения клавиатуры к носителю обучающей программы (компьютеру, смартфону);
- 3) системы распознавания звука в программном обеспечении и микрофона (в частности, встроенный в смартфон или компьютер).

Для того, чтобы определить правильность исполнения мелодии распознаваемый звук преобразуют в набор его числовых характеристик и сравнивают с эталонным.

Для решения таких практических задач, как распознавание и преобразование звука в ноты используются мето-

ды автоматической транскрипции музыки (АТМ). Одним из распространенных способов кодирования музыкального фрагмента является его запись в виде MIDI-формата. Способы анализа и обработки звукового ряда рассмотрены в работах [3, 4, 5, 6].

Наиболее популярные сегодня автоматизированные системы обучения игре на фортепиано представлены в виде мобильных приложений «Пианино - Симулятор фортепиано», «Piano Infinity» и «Simple Piano», а также программных сервисов «Synthesia» и «KaraKEYoke» [7, 8]. Основным преимуществом всех перечисленных систем является наличие различных режимов обучения – от простого к сложному. Дифференциация процесса обучения позволяет доступно объяснить один и тот же учебный материал ученикам с различным уровнем подготовки [9]. Это предотвращает накопление пробелов знаний у «слабых» учеников и отсутствие интереса у «сильных». При этом, существующие и разрабатываемые системы дают дальнейшие рекомендации по проблемным темам и оценку уровня знаний по количеству правильных и ошибочных ответов. Однако стоит отметить, что не всегда большое количество неправильных ответов будет свидетельствовать о низком уровне знаний. Подобные результаты можно также наблюдать у человека с усталостью или рассеянностью. Рекомендации и составление графика занятий с учетом психофизиологических особенностей и возможностей обучае-

мого позволят повысить его продуктивность и работоспособность.

Методы организации адаптивного обучения позволяют разработать автоматизированную систему, способную повысить эффективность самообразования при освоении навыков игры на фортепиано.

Целью данной работы стала разработка математической модели автоматизированной системы обучения игре на фортепиано. Математическая модель необходима для наглядного отображения функционирования системы, определения этапов работы системы и методов обработки данных в данной системе.

Для разработки математической модели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Разработать функциональную схему системы.
2. Описать характеристики входных и выходных данных.
3. Разработать математическую модель, определяющую взаимосвязь входных и выходных данных.

## Материалы и методы

Современные подходы к моделированию учебного процесса делятся на 2 большие группы:

- педагогические и дидактические методы моделирования,
- математическое и системное моделирование.

Первые модели определяют педагогические подходы к образовательному процессу. В научных работах рассматри-

вают мотивационно-целевые, содержательно-когнитивные, организационно-деятельностные и результативно-рефлексивные составляющие модели образовательной системы [10, 11].

Вторые модели позволяют рассматривать функциональные закономерности в обучающих системах и уже могут быть положены в основу информационных систем обучения, такие модели отличаются разнообразием используемых математических методов. Так, например, с точки зрения информационных моделей и алгоритмов удобно представлять адаптивное обучение [12]. В работе [13] используются марковские цепи для оценки пользователями обучающего контента, а в работе [14] используется векторная модель обучения. В [15] предлагают кластеризацию учащихся по различным дидактическим группам, а в [16] используют имитационное моделирование. В работе

[17] используют инфологическое моделирование для распределения ролей субъектов системы и потоков данных между ними. В [18] авторы предлагают использовать онтологический подход при разработке базы знаний интеллектуальной системы поддержки обучения, а в работе [19] – схожий тезаурусный подход.

Анализ методов моделирования учебного процесса и подходов к обучению приводит к выводу, что работа автоматизированной системы обучения игре на фортепиано должна основываться на принципах индивидуализации учебного процесса на начальном этапе и регулярной корректировки плана обучения в зависимости от успеваемости обучающегося [20]. Для дальнейшей разработки и реализации данной системы была предложена следующая функциональная схема (рис. 1).

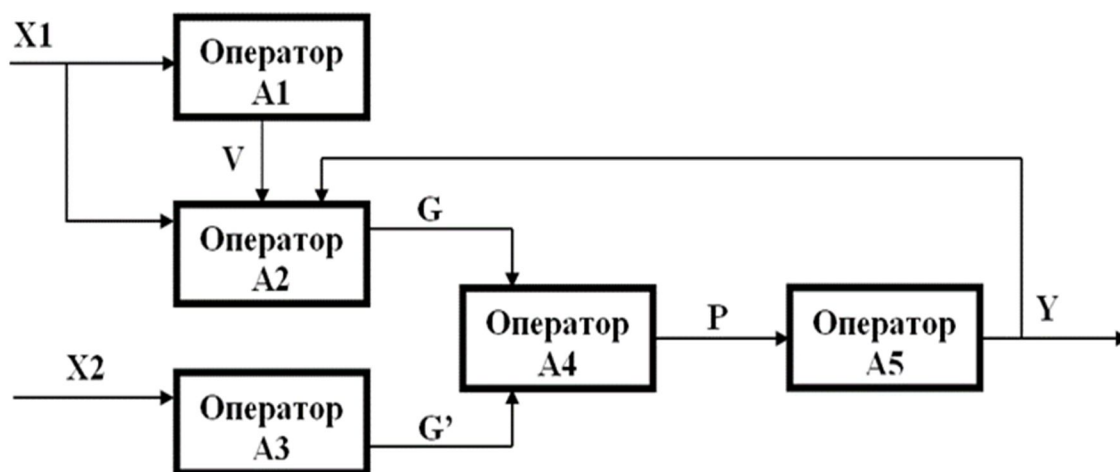


Рис. 1. Функциональная схема

Fig. 1. Functional diagram

За функционал системы отвечают 5 операторов:

1. Оператор  $A1$  – определяет последовательность и необходимое количество вопросов анкетирования, чтобы получить максимум информации за более короткий срок времени. Входные данные – множество  $X1$ ; выходные данные – множество  $V$ .

2. Оператор  $A2$  – исходя из анализа данных анкетирования подбирает наиболее оптимальный начальный план обучения. Входные данные – множества  $X1$  и  $V$ ; выходные данные – множество  $G_i$ .

3. Оператор  $A3$  – представляет собой систему распознавания звука и его дальнейшего преобразования в midi-формат, для получения информации об игре пользователя на фортепиано. Входные данные – множество  $X2$ ; выходные данные – множество  $G_i'$ .

4. Оператор  $A4$  – сравнивает реальное прохождение обучения с требуемым, оценивает прогресс. Входные данные – множества  $G_i$  и  $G_i'$ ; выходные данные – множество  $P$ .

5. Оператор  $A5$  – в зависимости от результатов прохождения обучения определяет коэффициенты корректировки начального плана обучения. Входные данные – множество  $P$ ; выходные данные – множество  $Y$ .

Для полноценной работы разрабатываемая система должна оперировать следующими наборами данных:

1. Множество  $V$  – вопросы анкетирования определенной последователь-

ности, для получения информации о возрасте, наличии и уровне навыка игры, типе темперамента и пожеланиях в обучении пользователя. Множество включает в себя:

$v_1$  – «Укажите Ваш возраст»;

$v_2$  – «Вам нужна теория?»;

$v_3$  – «У Вас есть навык игры?»;

$v_4$  – «У Вас высокий уровень навыка?»;

$v_5$  – «Вы по натуре живой человек?»;

$v_6$  – «Стараетесь ли Вы в трудных ситуациях предпринять что-то еще?»;

$v_7$  – «Любите ли Вы рассказывать истории друзьям?»;

$v_8$  – «Предпочитаете ли Вы работать в одиночестве?»;

$v_9$  – «Часто ли вы чувствуете себя усталым?»;

$v_{10}$  – «Сложно ли Вам сосредоточиться на чем-либо еще?»;

$v_{11}$  – «Часто ли Вы бываете погружены в свои мысли?»;

$v_{12}$  – «Легко ли Вы поддаетесь переменам настроения?».

2. Множество  $X1$  представляет собой ответы пользователя на вопросы анкетирования, включает в себя:

$x_1$  – наличие первоначального навыка;

$x_2$  – уровень навыка;

$x_3$  – необходимость теории;

$x_4$  – возраст;

$x_5$  – тип темперамента, зависит от величин  $x_{tr}$  и  $emo$ , где:

$xtr$  – экстраверсия;

$emo$  – эмоциональная стабильность.

3. Множество  $X2$  – набор звуковых характеристик мелодии, которую исполняет обучающийся.

4. Множество  $G_i$  – основные характеристики выбранного плана обучения, включают в себя пошаговое изучение мелодии и теоретических основ, длительность занятий, требуемые звуковые характеристики нот:

$g1$  – количество отдельно изучаемых отрезков мелодии;

$g2$  – длительность одного занятия;

$g3_i$  – эталонный (правильный) тон звука  $i$ -той ноты;

$g4_i$  – эталонная (правильная) длительность звука  $i$ -той ноты;

$g5_i$  – эталонная (правильная) длительность паузы после  $i$ -той ноты;

$i$  – номер ноты (от первой до последней ноты в отрезке);

$k$  – коэффициент скорости воспроизведения (в зависимости от требуемой скорости воспроизведения мелодии);

$n$  – порядковый номер предлагаемого к изучению отрезка мелодии ( $n_{\max}$  – общее количество отрезков мелодии);

$rov_n$  – планируемое количество повторов  $n$ -го отрезка мелодии.

5. Множество  $G'_i$  – набор характеристик реального исполнения изучаемой мелодии и прохождения занятий, включает в себя:

$g1'$  – получившееся количество отрезков мелодии;

$g2'$  – длительность проведенного занятия;

$g3'$  – исполненный тон звука  $i$ -той ноты;

$g4'$  – исполненная длительность звука  $i$ -той ноты;

$g5'$  – исполненная длительность паузы после  $i$ -той ноты;

$i'$  – номер исполненной ноты;

$k'$  – реальный коэффициент скорости воспроизведения;

$n'$  – порядковый номер изучаемого отрезка мелодии;

$rov'_n$  – выполненное количество повторов  $n$ -го отрезка мелодии;

$m'$  – количество нот в исполненном отрезке.

6. Множество  $P$  – набор сравнительных показателей реального и требуемого прохождения плана обучения, включает в себя количественные и качественные показатели отклонения реального исполнения от требуемого, совершенные ошибки, нехватка или избыток повторения и времени;

$p_1$  – количество неправильных нот;

$\partial_1$  – доля неправильных нот всем фрагменте мелодии;

$p_2$  – суммарная разность (по модулю) исполненной и эталонной длительности нот;

$\partial_2$  – доля отклонения длительности всех нот от эталонной;

$p_3$  – суммарная разность (по модулю) исполненной и эталонной длительности пауз;

$\partial_3$  – доля отклонения длительности пауз от эталонной;

$p_4$  – разность порядковых номеров изучаемого отрезка с планируемым;

$j$  – порядковый номер промежутка в 10 нот;

$V_j$  – количество ошибок в  $j$ -том промежутке;

$conc_j$  – концентрация ошибок в  $j$ -том промежутке;

$N$  – количество промежутков с высокой концентрацией (максимальной и отличающихся от нее на 10%);

$\partial_4$  – среднее арифметическое высоких концентраций ошибок;

$p_5$  – разность планируемого и реального количества повторов  $n$ -го отрезка мелодии;

$\partial_5$  – доля отклонения реального и планируемого количество повторов  $n$ -го отрезка мелодии;

$\partial_6$  – доля отклонения реального и планируемого времени занятия;

$\partial_7$  – доля отклонения реального и планируемого коэффициента скорости воспроизведения.

7. Множество  $Y$  представлено в виде коэффициентов корректировки плана обучения, в частности корректировки длительности занятий, скорости подачи информации, количества повторов и проверки пройденного материала:

$y1$  – коэффициент корректировки количества отрезков мелодии;

$y2$  – коэффициент корректировки длительности одного занятия;

$y3$  – коэффициент корректировки скорости воспроизведения;

$y4_n$  – коэффициент корректировки количества повторов  $n$ -го отрезка.

Рассмотрим, как работают отдельные операторы.

Оператор  $A1$  определяет последовательность и необходимое количество вопросов анкетирования, чтобы получить максимум информации за более короткий срок времени. Входные данные – множество  $X5$ ; выходные данные – множество  $V$ . Работа оператора  $A1$ :

1) при ответе на вопрос  $v_1$

$$x_4 = \begin{cases} 10000, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 2 \leq i \leq 12, i \neq 4\} \\ 01000, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 2 \leq i \leq 12\} \\ 00100, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 2 \leq i \leq 12\} \\ 00010, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 2 \leq i \leq 12\} \\ 00001, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 2 \leq i \leq 4\}; \end{cases}$$

2) при ответе на вопрос  $v_2$

$$x_3 = \begin{cases} 1, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 3 \leq i \leq 12, i \neq 4\} \\ 0, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 3 \leq i \leq 12\}; \end{cases}$$

3) при ответе на вопрос  $v_3$

$$x_1 = \begin{cases} 1, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 4 \leq i \leq 12\} \\ 0, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 5 \leq i \leq 12\}; \end{cases}$$

4) при ответе на вопрос  $v_4$

$$x_2 = \begin{cases} 1, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 5 \leq i \leq 12\} \\ 0, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 5 \leq i \leq 12\}; \end{cases}$$

5) при ответе на вопрос  $v_5$

$$xtr_1 = \begin{cases} 1, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 6 \leq i \leq 12\} \\ 0, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 6 \leq i \leq 12\}; \end{cases}$$

6) при ответе на вопрос  $v_6$

$$xtr_2 = \begin{cases} 0, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 9 \leq i \leq 12\} \\ 1, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 7 \leq i \leq 12\} \\ 2, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 7 \leq i \leq 12\}; \end{cases}$$

7) при ответе на вопрос  $v_7$ 

$$xtr_3 = \begin{cases} 0, \text{ то } V = \{v_i, i \in N, 9 \leq i \leq 12\} \\ 1, \text{ то } V = \{v_i, i \in N, 9 \leq i \leq 12\} \\ 2, \text{ то } V = \{v_i, i \in N, 8 \leq i \leq 12\} \\ 3, \text{ то } V = \emptyset; \end{cases}$$

8) при ответе на вопрос  $v_8$ 

$$xtr_4 = \begin{cases} 2, \text{ то } V = \{v_i, i \in N, 9 \leq i \leq 12\} \\ 3, \text{ то } V = \emptyset; \end{cases}$$

9) при ответе на вопрос  $v_9$ 

$$emo_1 = \begin{cases} 0, \text{ то } V = \{v_i, i \in N, 10 \leq i \leq 12\} \\ 1, \text{ то } V = \{v_i, i \in N, 10 \leq i \leq 12\}; \end{cases}$$

10) при ответе на вопрос  $v_{10}$ 

$$emo_2 = \begin{cases} 0, \text{ то } V = \emptyset \\ 1, \text{ то } V = \{v_i, i \in N, 11 \leq i \leq 12\} \\ 2, \text{ то } V = \{v_i, i \in N, 11 \leq i \leq 12\}; \end{cases}$$

11) при ответе на вопрос  $v_{11}$ 

$$emo_3 = \begin{cases} 1, \text{ то } V = \emptyset \\ 2, \text{ то } V = \{v_i, i \in N, i = 12\} \\ 3, \text{ то } V = \emptyset; \end{cases}$$

12) при ответе на вопрос  $v_{12}$ 

$$emo_4 = \begin{cases} 2, \text{ то } V = \emptyset \\ 3, \text{ то } V = \emptyset. \end{cases}$$

Работа оператора A2:

1) при ответе на вопрос  $v_1$ 

$$x_4 = \begin{cases} 10000, \text{ то } G = \{G_i, i \in N, 3 \leq i \leq 10\} \\ 01000, \text{ то } G = \{G_i, i \in N, 1 \leq i \leq 10\} \\ 00100, \text{ то } G = \{G_i, i \in N, 1 \leq i \leq 10\} \\ 00010, \text{ то } G = \{G_i, i \in N, 1 \leq i \leq 10, \\ i \neq 5, i \neq 7\} \\ 00001, \text{ то } G = \{G_{2i}, i \in N, 1 \leq i \leq 5\}; \end{cases}$$

2) при ответе на вопрос  $v_2$ 

$$x_3 = \begin{cases} 1, \text{ то } G = \{G_i, i \in N, 3 \leq i \leq 10\} \\ 0, \text{ то } G = \{G_i, i \in N, 1 \leq i \leq 10\}; \end{cases}$$

3) при ответе на вопрос  $v_3$ 

$$x_1 = \begin{cases} 1, \text{ то } G = \{G_i, i \in N, 1 \leq i \leq 6\} \\ 0, \text{ то } G = \{G_i, i \in N, 7 \leq i \leq 10\}; \end{cases}$$

4) при ответе на вопрос  $v_4$ 

$$x_2 = \begin{cases} 1, \text{ то } G = \{G_i, i \in N, 1 \leq i \leq 2\} \\ 0, \text{ то } G = \{G_i, i \in N, 3 \leq i \leq 6\}; \end{cases}$$

5) при ответе на вопрос  $v_5$ 

$$xtr_1 = \begin{cases} 1, \text{ то } xtr = 0 \\ 0, \text{ то } xtr = 0; \end{cases}$$

6) при ответе на вопрос  $v_6$ 

$$xtr_2 = \begin{cases} 0, \text{ то } xtr = 0 \\ 1, \text{ то } xtr = 0 \\ 2, \text{ то } xtr = 0; \end{cases}$$

7) при ответе на вопрос  $v_7$ 

$$xtr_3 = \begin{cases} 0, \text{ то } xtr = 0 \\ 1, \text{ то } xtr = 0 \\ 2, \text{ то } xtr = 0 \\ 3, \text{ то } xtr = 1; \end{cases}$$

8) при ответе на вопрос  $v_8$ 

$$xtr_4 = \begin{cases} 2, \text{ то } xtr = 0 \\ 3, \text{ то } xtr = 1; \end{cases}$$

9) при ответе на вопрос  $v_9$ 

$$emo_1 = \begin{cases} 0, \text{ то } emo = 1 \\ 1, \text{ то } emo = 1; \end{cases}$$

10) при ответе на вопрос  $v_{10}$ 

$$emo_2 = \begin{cases} 0, \text{ то } emo = 1 \\ 1, \text{ то } emo = 1 \\ 2, \text{ то } emo = 1; \end{cases}$$

11) при ответе на вопрос  $v_{11}$ 

$$emo_3 = \begin{cases} 0, \text{ то } emo = 1 \\ 1, \text{ то } emo = 1 \\ 2, \text{ то } emo = 1 \\ 3, \text{ то } emo = 0; \end{cases}$$

12) при ответе на вопрос  $v_{12}$

$$emo_4 = \begin{cases} 2, & \text{то } emo = 1 \\ 3, & \text{то } emo = 0; \end{cases}$$

13) при определении параметра  $xtr$

$$xtr = \begin{cases} 0, & \text{то } x_5 = \{xtr; emo\} \\ 1, & \text{то } x_5 = \{1; 1\}; \end{cases}$$

14) при определении параметра  $x_5$

$$x_5 = \begin{cases} \{1; 1\}, & \text{то } G = \{G_i, i \in N, 1 \leq i \leq 10\} \\ \{0; 0\}, & \text{то } G = \{G_i, i \in N, 1 \leq i \leq 10\} \\ \{0; 1\}, & \text{то } G = \{G_{2i}, i \in N, 1 \leq i \leq 5\}; \end{cases}$$

15) определение группы:

$$G = G(x_1) \cap G(x_2) \cap G(x_3) \cap G(x_4) \cap G(x_5);$$

16) корректировка плана:

$$G = \{g1 \cdot y_1; g2 \cdot y_2; g3_i; g4_i; g5_i; i; k \cdot y_3; n; pov_n \cdot y_4\}.$$

Работа оператора  $A3$  осуществляется на основе уже существующего алгоритма, собственная разработка данного оператора не требуется.

Работа оператора  $A4$ :

1) определение количества неправильно сыгранных нот:

$$p_1 = \begin{cases} |g3_i - g3'_i| = 0, & \text{то } p_1 = p_1 \\ |g3_i - g3'_i| \neq 0, & \text{то } p_1 = p_1 + 1; \end{cases}$$

2) определение доли ошибочных нот во всем фрагменте мелодии

$$\partial_1 = \frac{p_1}{i_{\max}};$$

3) определение суммарного отклонения исполненной и эталонной длительности нот:

$$p_2 = \sum |g4_i - g4'_i|;$$

4) определение доли отклонения длительности всех нот фрагмента от эталонной:

$$\partial_2 = \frac{p_2}{\sum g4_i};$$

5) определение суммарного отклонения исполненной и эталонной длительности пауз:

$$p_3 = \sum |g5_i - g5'_i|;$$

6) определение доли отклонения исполненной длительности пауз от эталонной:

$$\partial_3 = \frac{p_3}{\sum g5_i};$$

7) определение последнего порядкового номера промежутка в 10 нот (или меньше) изучаемого фрагмента мелодии:

$$j_{\max} = \left\lceil \frac{m'}{10} \right\rceil + 1;$$

8) определение количества ошибок в  $j$ -том промежутке:

$$V_j = \sum |g3_{i+(j-1) \cdot 10} - g3'_{i+(j-1) \cdot 10}| + \begin{cases} |g4_{i+(j-1) \cdot 10} - g4'_{i+(j-1) \cdot 10}| = 0, & \text{то } V_j = V_j \\ |g4_{i+(j-1) \cdot 10} - g4'_{i+(j-1) \cdot 10}| \neq 0, & \text{то } V_j = V_j + 1 \\ |g5_{i+(j-1) \cdot 10} - g5'_{i+(j-1) \cdot 10}| = 0, & \text{то } V_j = V_j \\ |g5_{i+(j-1) \cdot 10} - g5'_{i+(j-1) \cdot 10}| \neq 0, & \text{то } V_j = V_j + 1; \end{cases}$$

9) определение концентрации ошибок в  $j$ -том промежутке:

$$conc_j = \begin{cases} j < j_{\max}, & \text{то } conc_j = \frac{V_j}{30} \\ j = j_{\max}, & \text{то } conc_j = \frac{V_j}{\left\lceil \frac{m'}{10} \right\rceil \cdot 3}; \end{cases}$$

10) определение количества промежуточных с высокой концентрацией ошибок:

$$N = \begin{cases} \text{konc}_j = \text{konc}_{j_{\max}}, \text{ то } N = 1 \\ \frac{\text{konc}_j}{\text{konc}_{j_{\max}}} \geq 0.9, \text{ то } N = N + 1 \\ \frac{\text{konc}_j}{\text{konc}_{j_{\max}}} < 0.9, \text{ то } N = N; \end{cases}$$

11) определение среднего арифметического высоких концентраций ошибок:

$$\partial_4 = \frac{\sum \text{konc}_j \left| \frac{\text{konc}_j}{\text{konc}_{j_{\max}}} \geq 0.9 \right|}{N};$$

12) определение разности порядковых номеров изучаемого и планируемого отрезков:

$$p_4 = |n' - n|;$$

13) определение разности планируемого и реального количества повторов отрезка мелодии:

$$p_5 = |pov'_n - pov_n|;$$

14) определение доли отклонения реального и планируемого количества повторов изучаемого отрезка мелодии:

$$\partial_5 = \frac{g1'}{g1};$$

15) определение доли отклонения реального и планируемого времени занятий:

$$\partial_6 = \frac{g2'}{g2};$$

16) определение доли отклонения реального и планируемого коэффициента скорости воспроизведения

$$\partial_7 = \frac{k'}{k}.$$

Работа оператора A5:

1) определение коэффициента корректировки количества отрезков мелодии:

$$y1 = \begin{cases} 1 \\ \partial_1 \geq 0.85, \text{ то } y1 = 1.5 \\ \partial_2 \geq 0.85, \text{ то } y1 = 1.5 \\ \partial_3 \geq 0.9, \text{ то } y1 = 1.5 \\ \partial_4 \geq 0.75, \text{ то } y1 = 2 \\ 0.35 \leq \partial_4 < 0.75, \text{ то } y1 = 1.5 \\ \partial_5 > 1, \text{ то } y1 = 1.5 \\ \partial_5 < 1, \text{ то } y1 = 0.75; \end{cases}$$

2) определение коэффициента корректировки длительности одного занятия:

$$y2 = \begin{cases} 1 \\ \partial_4 \geq 0.9, \text{ то } y2 = 0.67 \\ \partial_5 \geq 6, \text{ то } y2 = 0 \\ 3 \leq \partial_5 \leq 5, \text{ то } y2 = 0.67 \\ \partial_6 \leq 0.7, \text{ то } y2 = 0.67 \\ \partial_6 \geq 1.25, \text{ то } y2 = 1.5 \\ p_5 \geq 10, \text{ то } y2 = 1.5 \\ \partial_2 \geq 1, \text{ то } y2 = 0 \\ \partial_3 \geq 1, \text{ то } y2 = 0; \end{cases}$$

3) определение коэффициента корректировки скорости воспроизведения:

$$y3 = \begin{cases} 1 \\ p_2 = 0, \text{ то } y3 = 2 \\ p_3 = 0, \text{ то } y3 = 2 \\ \partial_3 \leq 0.9, \text{ то } y3 = 0.5 \\ 0.3 \leq \partial_3 < 0.9, \text{ то } y3 = 0.67 \\ \partial_7 \geq 1, \text{ то } y3 = 1.5 \\ \partial_7 < 0.5, \text{ то } y3 = 0.67; \end{cases}$$

4) коэффициент корректировки количества повторов  $n$ -го отрезка:

$$y4_n = \begin{cases} 1 \\ \partial_1 \geq 0.5, \text{ то } y4_n = 2 \\ \partial_2 \leq 0.2, \text{ то } y4_n = 0.67 \\ \partial_3 \leq 0.2, \text{ то } y4_n = 0.67 \\ 0.25 \leq \partial_4 \leq 0.5, \text{ то } y4_n = 1.5 \\ p_1 = 0, \text{ то } y4_n = 0.5. \end{cases}$$

## Результаты и их обсуждение

На основании разработанной модели могут быть предложены следующие алгоритмы работы адаптивной системы обучения:

- алгоритм построения начальной точки обучающей траектории,
- алгоритм корректировки плана обучения.

Алгоритм построения начального плана обучения разрабатывается таким образом, чтобы определить наиболее подходящую группу учеников с одинаковыми предпочтениями, наличием и уровнем навыка, по возрастным и психологическим признакам. Принцип работы алгоритма построения начальной точки обучающей траектории заключается в следующем:

1) предполагаем изначально, что пользователю подходит любая из всех учебных групп;

2) по мере получения необходимой информации о пользователе отсеиваем те группы, которые ему однозначно не подходят.

Алгоритм корректировки начального плана обучения отвечает за выявление психофизиологических особенностей отдельного обучающегося и адаптацией под них плана обучения. Принцип работы алгоритма корректировки индивидуального плана обучения заключается в изменении параметров плана обучения в зависимости от результатов прохождения учебного плана.

Тестирование модели проводилось для группы пользователей. Для примера рассмотрим троих пользователей:

– пользователь 1 – возраст составляет 21 год; желает изучить мелодию, не вникая в теоретическую базу; никогда ранее не учился играть, по результатам теста на экстраверсию был определен как экстраверт. Результат анкетирования определил его в 7 учебную группу. План обучения этой группы включает в себя разбивку мелодии на 20 отрезков, количество повторений для каждого – 5 раз, воспроизведение мелодии замедлено в 3 раза, длительность одного занятия составляет 30 минут;

– пользователь 2 – возраст 27 лет; хочет подтянуть навык чтения по нотам и закрепить на практике; ранее занимался на фортепиано. Система анкетирования определила его в группу 6. План обучения этой группы включает в себя разбивку мелодии на 15 отрезков, количество повторений для каждого – 8 раз, воспроизведение мелодии замедлено в 4 раза, длительность одного занятия составляет 45 минут;

– пользователь 3 – возраст 15 лет, нужно изучить мелодию, недавно окончил музыкальную школу и считает свой навык достаточно высоким; тип темперамента – флегматик. Тест определил группу 2. План обучения этой группы включает в себя разбивку мелодии на 45 отрезков, количество повторений для каждого – 5 раз, воспроизведение мелодии замедлено в 2 раза, длительность одного занятия составляет 45 минут.

Данные о начальных планах обучения пользователей сведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Характеристика начального плана обучения**Table 1.** Characteristics of the initial training plan

| Пользователи /<br>Users | Группа<br>/ Group | Количество<br>отрезков /<br>Number of<br>segments | Количество<br>повторений /<br>Number of<br>repetitions | Коэффициент замедления / Deceleration factor | Длительность<br>занятия, мин /<br>Duration of the<br>lesson, min |
|-------------------------|-------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Пользователь 1          | 7                 | 20                                                | 5                                                      | 3                                            | 30                                                               |
| Пользователь 2          | 6                 | 15                                                | 8                                                      | 4                                            | 45                                                               |
| Пользователь 3          | 2                 | 45                                                | 5                                                      | 2                                            | 45                                                               |

Корректировка начального плана обучения выполняется после каждого повторения изучаемого отрезка мелодии. Для более наглядного сравнения результатов в данной работе будем рассматривать корректировку после 1, 3 и 5 проигрыша изучаемого отрезка.

Анализ данных о прохождении учебного плана пользователем 1 показал, что длительность одного занятия в 30 ми-

нут необходимо сократить до 20 минут, так как после этого времени была выявлена высокая концентрация ошибок в одних и тех же местах. Такая корректировка позволила на четвертом повторении отрезка мелодии ускорить темп воспроизведения до оригинала, без отрицательных последствий для обучаемости пользователя. Данные корректировок приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Корректировка плана обучения для первого пользователя**Table 2.** Adjustment of the training plan for the first user

| № корректировки /<br>Adjustment No. | Количество<br>отрезков /<br>Number of<br>segments | Количество<br>повторений<br>/ Number of<br>repetitions | Коэффициент<br>замедления /<br>Deceleration<br>factor | Длительность<br>занятия, мин /<br>Duration of the<br>lesson, min |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Начало                              | 20                                                | 5                                                      | 3                                                     | 30                                                               |
| Корректировка 1                     | 20                                                | 5                                                      | 3                                                     | 30                                                               |
| Корректировка 3                     | 20                                                | 5                                                      | 2                                                     | 20                                                               |
| Корректировка 5                     | 20                                                | 5                                                      | 1                                                     | 20                                                               |

Из-за большого процента ошибочно исполненных нот для пользователя 2 было решено увеличить количество отрезков мелодии, за счет уменьшения их длительности. При такой корректировке

значительно уменьшилась доля ошибок, и доля отклонения длительности нот и пауз. Это позволило сократить количество повторений отрезка до 5 раз. Данные корректировок приведены в табл. 3.

**Таблица 3.** Корректировка плана обучения для второго пользователя**Table 3.** Adjustment of the training plan for the second user

| № корректировки /<br>Adjustment No. | Количество<br>отрезков /<br>Number of<br>segments | Количество<br>повторений<br>/ Number of<br>repetitions | Коэффициент<br>замедления /<br>Deceleration fac-<br>tor | Длительность<br>занятия, мин /<br>Duration of the<br>lesson, min |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Начало                              | 15                                                | 8                                                      | 4                                                       | 45                                                               |
| Корректировка 1                     | 25                                                | 8                                                      | 4                                                       | 45                                                               |
| Корректировка 3                     | 25                                                | 5                                                      | 2                                                       | 45                                                               |
| Корректировка 5                     | 25                                                | 5                                                      | 1                                                       | 45                                                               |

Пользователь 3 при прохождении обучения показал отклонение реальной скорости воспроизведения от требуемой: играл медленнее, из-за чего был высокий процент отклонения длительности пауз. Это стало основанием для

замедления скорости воспроизведения тем самым выравнивали ритм, и уже к 5 повтору отрезка получилось приблизить значение скорости к оригиналу. Данные корректировок приведены в табл. 4.

**Таблица 4.** Корректировка плана обучения для третьего пользователя**Table 4.** Adjustment of the training plan for the third user

| № корректировки /<br>Adjustment No. | Количество<br>отрезков /<br>Number of<br>segments | Количество<br>повторений<br>/ Number of<br>repetitions | Коэффициент<br>замедления /<br>Deceleration fac-<br>tor | Длительность<br>занятия, мин /<br>Duration of the<br>lesson, min |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Начало                              | 45                                                | 5                                                      | 2                                                       | 45                                                               |
| Корректировка 1                     | 45                                                | 5                                                      | 3                                                       | 45                                                               |
| Корректировка 3                     | 45                                                | 5                                                      | 2                                                       | 45                                                               |
| Корректировка 5                     | 45                                                | 5                                                      | 1,3                                                     | 45                                                               |

## Выводы

Функциональная схема автоматизированной системы обучения игре на фортепиано наглядно демонстрирует последовательность выполняемых действий, а также поток различных множеств входных и выходных данных.

Описание данных показывает, какой информацией должна оперировать система для ее корректной и эффективной работы.

В ходе математического моделирования системы были определены взаимосвязи входных и выходных данных для каждой функции системы.

Таким образом была разработана математическая модель автоматизированной системы обучения игре на фортепиано для ее дальнейшей программной реализации.

Математическую модель можно положить в основу реальной автоматизированной системы обучения игре на фортепиано.

### Список литературы

1. Зайдуллина С.Г., Сафронов А.М. Роль современных систем адаптивного обучения в образовании // Преподавание информационных технологий в Российской Федерации. 2018; 227-228.
2. Дьячков Д.Б., Дьячкова Е.В. Обзор и анализ технологий для адаптивного обучения // E-Scio. 2022; №12 (75). URL: <http://e-scio.ru/wp-content/uploads/2022/12/Дьячков-Д.-Б.-Дьячкова-Е.-В.-Голубничий-А.-А.pdf>.
3. Андрадэ А.И., Насуро Е.В. Средство музыкальной транскрипции при помощи методов машинного обучения // BIG DATA and Advanced Analytics. 2019; №5: 386-390.
4. Корухова Ю.С., Мытрова М.В. Поиск нот в электронных библиотеках по фрагменту мелодии // Биомашсистемы. 2018; №3: 101-108.
5. Связова Е.Р. Проблема автоматической музыкальной транскрипции // Молодежный вестник уфимского государственного авиационного технического университета. 2019; №1: 159-162.
6. Recurrent Neural Network for MIDI Music Emotion Classification / W. Zhao, Y. Zhou, Y. Tie, Y. Zhao // 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Chongqing, China. 2018. 2596-2600. doi: 10.1109/IAEAC.2018.8577272.
7. Остренко А.А., Рыжкова М.Н. Обзор и анализ технологий построения компьютерных систем обучения игре на фортепиано // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. 2020; №1: 21-32.
8. Остренко А.А., Рыжкова М.Н. Обзор и анализ автоматизированных систем обучения игре на фортепиано // Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России. XII Всероссийские научные Зворыкинские чтения. Муром, 2020: 388.
9. Зверева Н.А. Разноуровневое и дифференцированное обучение как фактор повышения эффективности образовательного процесса в СПО // Молодой ученый. VIII Международная научная конференция «Педагогическое мастерство». Казань, 2016; 35-37.
10. Муранова Н.П. Моделирование физико-математической подготовки старшеклассников к обучению в техническом университете как дидактической системы // Известия ВГПУ. 2015; №1 (96): 56-63.

11. Ванягина М.Р. Комплексная модель системы иноязычного обучения в высшей военной школе // Вестник ТГУ. 2023; №1: 122-133.
12. Кунцевич О.Ю. Моделирование процесса обучения в контексте адаптивных образовательных технологий (на примере дисциплины «Базы данных») // ДМ. 2022; №55: 76-80.
13. Гончаров Д.И., Геращенко Т.М. Алгоритм построения рекомендаций в электронных образовательных средах на основе стохастических моделей Маркова // Современные технологии управления. 2022; №1 (97). URL: <https://sovman.ru/article/9713/>
14. Августова Ю.В. Векторная модель практико-ориентированного обучения в подготовке будущих юристов в системе СПО // Общество: социология, психология, педагогика. 2022; №12 (104): 342-348.
15. Домужнева К.Е. Моделирование подходов к обучению информатике студентов системы среднего профессионального образования путем их кластеризации на дидактические группы // Вестник КГПУ им. В.П. Астафьева. 2022; №2 (60): 190-199.
16. Надеждин Е. Н., Федотенко И. Л., Смирнова Е. Е. Методология имитационного моделирования педагогических систем // Чебышевский сборник. 2022; №5 (86): 291-304.
17. Шапорева А.В., Кухаренко Е.В., Григоренко О.В. Применение инфологического моделирования при разработке автоматизированной системы оценки качества обеспечения и организации учебного процесса при дистанционной технологии обучения // Евразийский Союз Ученых. 2019; №3-3 (60): 63-68.
18. Курзаева Л.В., Чусавитина Г.Н., Мусийчук М.В. Разработка базы знаний интеллектуальной системы поддержки обучения ИТ-специалистов с использованием онтологического моделирования // Мир науки. Педагогика и психология. 2017; №6. URL: <https://mir-nauki.com/PDF/99PDMN617.pdf>.
19. Тулохонова И.С. Моделирование системы обучения на основе тезаурусного подхода // Вестник евразийской науки. 2017; №4 (41). URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/86TVN417.pdf>.
20. Остренко А.А., Рыжкова М.Н. Алгоритм построения индивидуальной траектории обучения // Научный потенциал молодежи – будущее России. XII Всероссийские научные Зворыкинские чтения. Муром, 2020.

## References

1. Zaidullina S.G., Safronov A.M. Rol' sovremennykh sistem adaptivnogo obuche-niya v obrazovanii [The role of modern systems of adaptive learning in education]. Prepodavanie informatsionnykh tekhnologii v Rossiiskoi Federatsii [*Teaching information technologies in the Russian Federation*] 2018; 227-228.

2. D'yachkov D.B., D'yachkova E.V. Obzor i analiz tekhnologii dlya adaptivnogo obucheniya [Overview and analysis of technologies for adaptive learning]. *E-Scio*. 2022; no.12 (75). Available at: <http://e-scio.ru/wp-content/uploads/2022/12/D'yachkov-D.-B.-D'yachkova-E.-V.-Golubnichii-A.-A.pdf>.
3. Andrade A.I., Nasuro E.V. Sredstvo muzykal'noi transkriptsii pri pomoshchi metodov mashinnogo obucheniya [Means of musical transcription by means of machine training methods]. *BIG DATA and Advanced Analytics*. 2019; №5: 386-390.
4. Korukhova Yu.S., Mytrova M.V. Poisk not v elektronnykh bibliotekakh po fragmentu melodii [Search for notes in electronic libraries by melody fragment]. *Biomashsistemy = Biomachsistems*. 2018; no.3: 101-108.
5. Sviyazova E.R. Problema avtomaticheskoi muzykal'noi transkriptsii [Musical transcription using neural network technology]. *Molodezhnyi vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Molodezhny Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University)*. 2019; no.1: 159-162.
6. Zhao W., Zhou Y., Tie Y. and Zhao Y. Recurrent Neural Network for MIDI Music Emotion Classification, 2018 *IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, Chongqing, China, 2018; 2596-2600. doi: 10.1109/IAEAC.2018.8577272.
7. Ostrenko A.A., Ryzhkova M.N. Obzor i analiz tekhnologii postroeniya komp'yuternykh sistem obucheniya igre na fortepiano. [Review and analysis of technologies for building computer systems for teaching piano playing]. *Algoritmy, metody i sistemy obrabotki dannykh = Algorithms, Methods and Data Processing Systems*. 2020; no.1: 21-32.
8. Ostrenko A.A., Ryzhkova M.N. [Review and analysis of automated systems for learning to play the piano]. *Nauka i obrazovanie v razvitii promyshlennoi, sotsial'noi i ekonomicheskoi sfer regionov Rossii. XII Vserossiiskie nauchnye Zvorykinskie chteniya*. [Science and education in the development of industrial, social and economic spheres of Russian regions. XII All-Russian Scientific Zworykin Readings]. Murom, 2020: 388 (In Russ.).
9. Zvereva N.A. [Multi-level and differentiated learning as a factor in improving the efficiency of the educational process in secondary vocational education]. *Molodoi uchenyi. VIII Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «Pedagogicheskoe masterstvo»*. [Young scientist. VIII International Scientific Conference "Pedagogical Excellence"]. Kazan', 2016; 35-37 (In Russ.).
10. Muranova N.P. Modelirovanie fiziko-matematicheskoi podgotovki starsheklassnikov k obucheniyu v tekhnicheskome universitete kak didakticheskoi sistemy [Modeling of physical and mathematical training of senior school pupils for studying at a technical higher school as a didactic system]. *Izvestiya VGPU = Izvestia of the Volgograd State Pedagogical University*. 2015; no.1 (96): 56-63.

11. Vanyagina M.R. Kompleksnaya model' sistemy inoyazychnogo obucheniya v vysshei voennoi shkole. [Comprehensive model of foreign-language teaching system in higher military school]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Gumanitarnye nauki = Tambov University Review. Series: Humanities*. 2023; no.1: 122-133 (In Russ.).
12. Kuntsevich O.Yu. Modelirovanie protsessa obucheniya v kontekste adaptivnykh obrazovatel'nykh tekhnologii (na primere distsipliny «Bazy dannykh») [Modeling the learning process of adaptive educational technologies (on the example for discipline «Databases»)]. *DM = Didactics of mathematics: Problems and Investigations*. 2022; no.55: 76-80.
13. Goncharov D.I., Gerashchenkova T.M. Modelirovanie protsessa obucheniya v kontekste adaptivnykh obrazovatel'nykh tekhnologii (na primere distsipliny «Bazy dannykh») [Algorithm for making recommendations in electronic educational environments based on stochastic Markov models]. *Sovremennye tekhnologii upravleniya = Modern Management Technology*. 2022; no.1 (97). Available at: <https://sovman.ru/article/9713/> (In Russ.).
14. Avgustova Yu.V. Vektornaya model' praktiko-orientirovannogo obucheniya v podgotovke budushchikh yuristov v sisteme SPO [Vector Model of Practice-Oriented Learning in the Training of Future Lawyers in the System of Secondary Vocational Education]. *Obshchestvo: sotsiologiya, psikhologiya, pedagogika = Society: Sociology, Psychology, Pedagogics*. 2022; no.12 (104): 342-348 (In Russ.).
15. Domuzhneva K.E. Modelirovanie podkhodov k obucheniyu informatike studentov sistemy srednego professional'nogo obrazovaniya putem ikh klasterizatsii na didakticheskie gruppy [Modeling of approaches to teaching computer science for vocational students by clustering them into didactic groups]. *Vestnik KGPU im. V.P. Astafyeva = Bulletin of the KSPU named after V.P. Astafyev*. 2022; no.2 (60): 190-199.
16. Nadezhdin E. N., Fedotenko I. L., Smirnova E. E. Metodologiya imitatsionnogo modelirovaniya pedagogicheskikh sistem [Methodology of simulation modeling of pedagogical systems]. *Chebyshevskii sbornik*. 2022; №5 (86): 291-304.
17. Shaporeva A.V., Kukhareno E.V., Grigorenko O.V. Primenenie infologicheskogo modelirovaniya pri razrabotke avtomatizirovannoi sistemy otsenki kachestva obespecheniya i organizatsii uchebnogo protsessa pri distantsionnoi tekhnologii obucheniya [Application of infological modeling in the development of the automated system of assessment of the quality of security and organization of the educational process in distance technology of training]. *Evraziiskii Soyuz Uchenykh = Eurasian Union of Scientists*. 2019; no.3-3 (60): 63-68.
18. Kurzaeva L.V., Chusavitina G.N., Musiichuk M.V. Razrabotka bazy znaniy intellektual'noi sistemy podderzhki obucheniya IT-spetsialistov s ispol'zovaniem ontologicheskogo modelirovaniya [The development of a knowledge base of intellectual system of support of training of it-specialists with the use of ontological modeling]. *Mir nauki. Pedagogika i psikhologiya = World of Science. Pedagogy and Psychology*. 2017; no.6. Available at: <https://mir-nauki.com/PDF/99PDMN617.pdf>.

19. Tulokhonova I.S. Modelirovanie sistemy obucheniya na osnove tezaurusnogo podkhoda [Simulation learning system on the basis of thesaurus approach]. *Vestnik evraziiskoi nauki = The Eurasian Scientific Journal*. 2017; no.4 (41). Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/86TVN417.pdf>. (In Russ.)

20. Ostrenko A.A., Ryzhkova M.N. [Algorithm for constructing an individual learning path]. *Nauchnyi potentsial molodezhi – budushchee Rossii. XII Vserossiiskie nauchnye Zvorykinskie chteniya*. [Scientific potential of youth - the future of Russia. XII All-Russian Scientific Zworykin Readings]. Murom, 2020 (In Russ.).

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Остренко Анна Александровна**, магистрант кафедры физики и прикладной математики, Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Муром, Российская Федерация, e-mail: [masmash@mail.ru](mailto:masmash@mail.ru)

**Anna A. Ostrenko**, Master Student, Murom Institute (branch) of Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nickolay Grigoryevich Stoletovs, Murom, Russian Federation, e-mail: [masmash@mail.ru](mailto:masmash@mail.ru)

**Рыжкова Мария Николаевна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры физики и прикладной математики, Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Муром, Российская Федерация, e-mail: [masmash@mail.ru](mailto:masmash@mail.ru)

**Mariya N. Ryzhkova**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Physics and Applied Mathematics Department, Murom Institute (branch) of Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nickolay Grigoryevich Stoletovs, Murom, Russian Federation, e-mail: [masmash@mail.ru](mailto:masmash@mail.ru)

## Повышение ресурсной эффективности распределенных архитектур систем обработки данных на основе априорных данных о поздних сроках завершения работ

А. Б. Клименко <sup>1</sup> ✉

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

✉ e-mail: [anna\\_klimenko@mail.ru](mailto:anna_klimenko@mail.ru)

### Резюме

**Цель исследования.** Целью данного исследования является разработка метода повышения эффективности распределенных архитектур систем обработки данных, функционирующих в «туманном» и «краевом» слоях сети. В условиях высокой динамики как сетевой инфраструктуры, так и нагрузки, задача формирования архитектуры систем обработки данных решается регулярно (миграция виртуальных машин, горизонтальное масштабирование). При этом практически не рассматривается вопрос расхода вычислительного ресурса вычислительных узлов, в то время как зачастую используемые устройства обладают сравнительно небольшими мощностями, а высокая их загруженность ведет к сокращению срока эксплуатации. Поэтому создание методов формирования эффективной в аспекте сохранения вычислительного ресурса архитектуры системы вычислительных устройств является актуальной задачей.

**Методы.** Основными научными методами, применяемыми в рамках данного исследования, являются анализ предметной области, методы исследования операций, методы оптимизации и компьютерное моделирование, подтверждающие целесообразность основных аспектов разрабатываемого метода. Для реализации повышения эффективности размещения вычислительных задач на узлах фрагмента сети в данной работе сформулирована многокритериальная задача оптимизации, где каждому элементу векторной целевой функции соответствует индивидуальное значение вероятности безотказной работы вычислительного устройства. Для получения оценочных значений стоимостной функции используются априорные оценки поздних сроков завершения решения вычислительных задач узлами, поскольку выделяемый для решения ресурс зависит от выделенного времени, а время решения задачи, соответственно, от выделяемого вычислительного ресурса. Значение стоимостной функции вычисляется на основании приближенных априорных оценок, что приводит к позитивному эффекту по части расхода вычислительных ресурсов устройств.

**Результаты.** Результатом исследования является разработанный метод повышения эффективности распределенных архитектур систем обработки данных, функционирующих в «туманном» и «краевом» слоях сети.

**Заключение.** Предложенный в данной работе метод позволяет выбрать такое размещение нагрузки, чтобы уменьшить загруженность устройств и таким образом снизить расход вычислительного ресурса.

---

**Ключевые слова:** туманные вычисления; распределенные системы; архитектура; обработка данных.

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

**Для цитирования:** Клименко А. Б. Повышение ресурсной эффективности распределенных архитектур систем обработки данных на основе априорных данных о поздних сроках завершения работ // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(2): 124-139. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-124-139>.

Поступила в редакцию 12.05.2023'

Подписана в печать 04.07.2023

Опубликована 02.08.2023

## Distributed Data Proceeding Systems Architectures Resource Efficiency Improvement on the Basis of Apriory Data about the Jobs Late Completion Times

Anna B. Klimenko <sup>1</sup> ✉

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

✉ e-mail: [anna\\_klimenko@mail.ru](mailto:anna_klimenko@mail.ru)

### Abstract

**Purpose of research.** The purpose of this study is to develop a method for improving the efficiency of distributed architectures of data processing systems operating in the fog and edge layers of the network. In conditions of high dynamics of both the network infrastructure and the load, the task of forming the architecture of data processing systems is solved regularly (migration of virtual machines, horizontal scaling etc.) At the same time, the issue of the consumption of the residual resource of computing nodes is practically not considered, while the often used devices have relatively low capacity, and their high workload leads to a reduction in the service life. Therefore, the creation of methods for forming an architecture of a computing device system that is effective in terms of saving a computing resource is an urgent task.

**Methods.** The main scientific methods used in this study are domain analysis, operations research methods, optimization methods and computer modeling, confirming the feasibility of the main aspects of the developed method.

To improve the efficiency of placing computational tasks on the nodes of a network fragment, this paper formulated a multicriteria optimization problem, where each element of the vector objective function corresponds to an individual value of the probability of failure-free operation of a computing device. To obtain estimated values of the cost function, a priori estimates of the late completion of the solution of computational problems by nodes are used, since the resource allocated for solving depends on the allocated time, and the time for solving the problem, respectively, on the allocated computing resource. The value of the cost function is calculated on the basis of approximate a priori estimates, which leads to a positive effect in terms of the consumption of computing resources of devices.

**Results.** The result of the study is a developed method for improving the efficiency of distributed architectures of data processing systems operating in the fog and edge layers of the network.

**Conclusion.** The method proposed in this work allows to choose such a load distribution in order to reduce the workload of devices and thus reduce the consumption of computing resources of the devices.

**Keywords:** fog computing; distributed systems; architecture; data processing.

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

**For citation:** Klimenko A. B. Distributed Data Proceeding Systems Architectures Resource Efficiency Improvement on the Basis of Apriory Data about the Jobs Late Completion Times. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(2): 124-139 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-124-139>.

Received 12.05.2023

Accepted 04.07.2023

Published 02.08.2023

## Введение

В настоящее время развитие сетевых и информационных технологий привело к ситуации, когда архитектуры систем обработки данных могут иметь вариативный, изменяющийся во времени характер как за счет динамики внешних слоев сети (туманного и краевого), так и за счет необходимости реконфигурации, которая, в свою очередь, возникает по причине необходимости обеспечения QoS в условиях изменяющейся нагрузки и может быть реализована за счет горизонтального масштабирования. Периодическая необходимость реконфигурации таких систем актуализирует такие вопросы, как:

- выбор и разработка методов реконфигурации с акцентом на минимизацию времени проведения процедуры, что связано с необходимостью обработки данных в реальном времени [1,2];

- выбор и разработку методов формирования сообществ вычислительных устройств с оптимизацией по выбранной целевой функции [3-5].

Выбор целевой функции, одной или нескольких, определяет качественные и количественные характеристики устройств, которые будут участвовать в обработке данных. В этой области существует достаточно широкий круг работ, где оптимизация осуществляется в рамках следующих критериев:

- время выполнения комплекса задач [6-8];

- равномерное распределение нагрузки [9,10];

- энергозатраты при выполнении комплекса задач [11-13];

- объемы пересылаемых по сети данных [14-16].

Однако практически не уделено внимание вопросу сохранения вычислительного ресурса устройств, в то время как их работа в условиях повышенной нагрузки приводит к сокращению срока службы и, следовательно, к повышению эксплуатационных издержек.

Целью данного исследования является разработка метода повышения эффективности архитектуры системы обработки данных в «туманном» или «краевом» слое по критерию ресурсосбережения устройств, участвующих в вычислениях и передаче данных.

Проблема формирования архитектуры системы обработки данных в контексте данного исследования отличается от классической задачи составления расписания работ для множества вычислительных устройств и скорее близка к проблеме, описанной и решенной в [17] с тем отличием, что в [17] множество вычислительных устройств объединено полносвязной коммуникационной средой без транзитных участков, тогда как такая модель коммуникационной среды не отражает особенностей распределенных вычислений в туманных и краевых средах. Кроме того, отличие составляет отсутствие явных ограничений на ресурсы, которые вычис-

лительный узел может выделить для решения той или иной вычислительной задачи: здесь ресурс является также варьируемым параметром, значение которого определяет качество формируемой архитектуры.

Появление транзитных узлов в структуре коммуникационной среды привносит необходимость рассмотрения новых аспектов задачи, таких, как – время передачи данных транзитным узлом и, собственно, дополнительной нагрузки на узел, которая при этом возникает.

Поэтому формирование архитектуры системы обработки данных в туманном или краевом слое сети некорректно рассматривать без учета нагрузки на транзитные узлы и без определения подмножеств устройств-участников вычислительного процесса.

## Материалы и методы

Ценностная функция эффективности ресурсосберегающей архитектуры системы обработки данных

Формирование архитектуры системы обработки данных актуализирует вопрос о том, какая архитектура будет считаться предпочтительной. Например, возможен вариант такого размещения вычислительных задач, когда будет задействовано большое количество узлов (по задаче на узел) с необходимостью задействования узлов для передачи данных между вычислительными задачами. Тогда ожидается, что такой способ распределения нагрузки приведет к

меньшей нагрузке на каждый вычислительный узел и, следовательно, такую архитектуру можно считать предпочтительной. Другой вариант размещения – использование меньшего количества вычислительных узлов с возрастанием нагрузки на каждый из них, но с уменьшением их количества, задействованного в вычислениях и передаче данных. Здесь имеет место ситуация, когда некоторые узлы могут быть загружены в большей степени, но при этом некоторые вообще не будут принимать участия в вычислениях и/или передаче данных и, соответственно, решение комплекса задач не окажет влияния на модельные значения остаточного вычислительного ресурса и вероятности безотказной работы.

Помимо этого, необходимо ответить на вопрос, что при формировании архитектуры системы обработки данных будет являться целевой функцией. Возможными вариантами могли бы быть выражения для оценивания ВБР устройств при последовательном и параллельном соединении (см. (1) и (2))

$$P_0(\tau) = 1 - \prod (1 - P_j(\tau)), P_j(\tau) = e^{-\lambda_j t^{\frac{kD_j}{10}}}. \quad (1)$$

$$P_0(\tau) = \prod (P_j(\tau)), P_j(\tau) = e^{-\lambda_j t^{\frac{kD_j}{10}}}. \quad (2)$$

Однако учитывая временный характер объединения вычислительных узлов в систему обработки данных, вполне очевидно, что граф сети будет произвольным, и разбить его на параллельно-последовательные участки однозначно вряд ли удастся.

Поэтому предлагается следующее:

1. Пусть каждый узел, участвующий в вычислениях или передаче данных, стремится к минимизации индивидуальной нагрузки.

2. Будем полагать, что каждый узел-участник важен, и ухудшение ситуации на одном узле не может быть возмещено улучшением ситуации на другом узле.

3. Также будем полагать, что могут быть выделены приоритетные узлы, которые по желанию владельца должны сохранять как можно больший средний остаточный ресурс в процессе вычислений.

Таким образом, ЦФ функция для формирования эффективной архитектуры будет векторной, т.е. многокритериальной.

Приведем формальную постановку задачи.

Пусть имеется граф фрагмента сети  $G = \langle V, U \rangle$ , где  $V$  – множество вычислительных узлов,  $U$  – множество ребер, определяющих каналы связи.  $V = \{v_j\} = \{\langle j, p_j \rangle\}$ , где  $j$  – идентификатор узла;  $p_j$  – производительность узла.

Комплекс задач, предназначенных для решения, описывается направленным ациклическим графом  $G' = \langle T, C \rangle$ , вершины которого  $T$  ассоциированы с задачами, а ребра  $C$  – с информационными связями между задачами.  $T = \{t_i\} = \{\langle i, w_i, d_i \rangle\}$ , где  $i$  – идентификатор задачи;

$w_i$  – вычислительная сложность подзадачи (в командах);

$d_i$  – объем данных, который должен быть передан другой задаче.

Решением задачи формирования архитектуры системы обработки данных будет сформированная матрица назначения задач на вычислительные узлы:

$$A = \begin{vmatrix} 1 & & \dots \\ & \dots & \\ \dots & & 1 \end{vmatrix} \quad (3)$$

Учитывая индивидуальную заинтересованность каждого узла в снижении нагрузки, получим ряд ЦФ, соответствующих выбранному множеству узлов.

$$\begin{aligned} P_1(\tau) &= e^{-\lambda_0 \tau \cdot 2^{kD_1/10}}; \\ P_2(\tau) &= e^{-\lambda_0 \tau \cdot 2^{kD_2/10}}; \\ &\dots \\ P_m(\tau) &= e^{-\lambda_0 \tau \cdot 2^{kD_m/10}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $m$  – число узлов, принимающих участие в обработке или передаче данных;

$\tau$  – момент времени, для которого рассчитываются (4).

Соответственно, тогда решения будут представлены фронтом Парето, состоящим из множества матриц (3).

Сформированная таким образом задача многокритериальной оптимизации, в соответствии с утверждением о том, что ситуация компенсации ухудшения на одном узле улучшением на другом нецелесообразна, сводится к однокритериальной задаче путем мультипликативной свертки (5), что также целесообразно, учитывая значения множителей.

$$P_0(\tau) = \prod_{i=1}^m (P_i(\tau))^{\xi_i}, \quad (5)$$

где  $\xi_i$  – коэффициент, выражающий предпочтения пользователя по ряду вычислительных узлов.

Отметим, что сведение к однокритериальной задаче посредством мультипликативной свертки отражает принятое утверждение о том, что каждый узел заботится об индивидуальной загруженности, и не рассматривается ситуация, когда ухудшение показателя одного узла может быть компенсировано улучшением показателей других.

Метод формирования ресурсосберегающей архитектуры на основе априорных оценок поздних сроков завершения задач

Из постановки задачи и сформированной ЦФ видно, что количество множителей (индивидуальных ЦФ) зависит от сформированной системы вычислительных узлов, а значение индивидуальной ЦФ зависит от загруженности узлов. Такая постановка отличает сформированную задачу от аналогичных, сводящихся к перебору возможных распределений задач по заранее заданному множеству вычислительных устройств. Управляемыми параметрами здесь являются:

- множество выбранных для распределения нагрузки узлов;
- матрица прикрепления задач к узлам (может быть распределено более одной задачи на узел);
- и, наконец, множество узлов, участвующих в вычислениях и передаче данных, которое добавляется в результате формирования маршрутов передачи данных между задачами.

Стоит отметить, что введение транзитных узлов в качестве варьируемого параметра приводит к тому, что, имея ограничение на время выполнения комплекса задач, время, доступное для решения задач узлами также будет варьироваться в зависимости от количества транзитных узлов и, следовательно, будет варьироваться загруженность устройств.

Таким образом, сформированная задача относится к задачам структурно-параметрической оптимизации и может быть решена разбиением на ряд подзадач, а именно:

- формирования сетевой инфраструктуры;
- размещения задач по узлам;
- формирования маршрутов передачи данных;
- оцениванием сформированной архитектуры посредством стоимостной функции (5).

Следует отметить, что стоимостная функция имеет в качестве базового компонента загруженность устройства, а загруженность, в свою очередь, зависит как от трудоемкости выполняемых задач, так и от времени, за которое эти задачи выполняются. Время выполнения каждой индивидуальной задачи не определено: задача может быть выполнена за время, равное позднему сроку решения задачи, либо быстрее. Однако сокращение времени решения задачи приводит к экспоненциальному росту интенсивности отказов и, следовательно, значительно ухудшает значения ВБР. Поэтому будем считать, что с точ-

ки зрения индивидуальных ЦФ более выгодно растянуть решение задачи на время, определяемое поздним сроком завершения задачи, однако это не всегда возможно в силу наличия транзитных узлов на передачу данных между задачами.

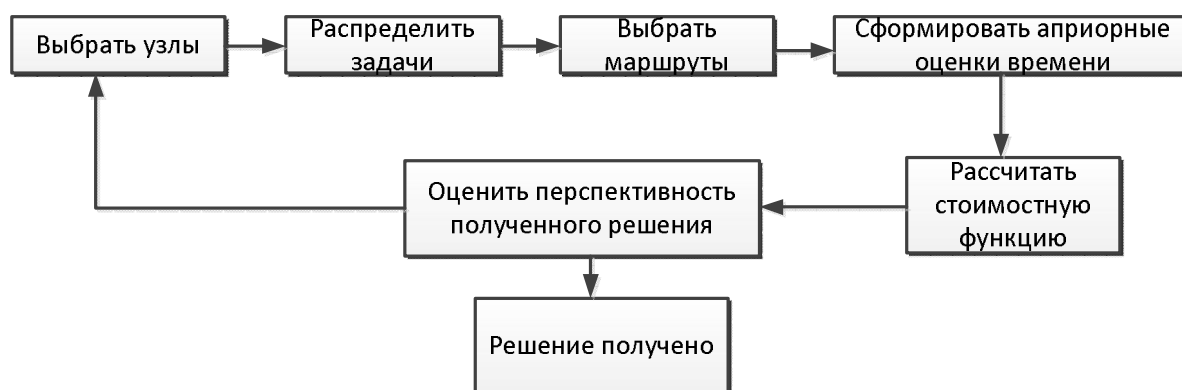
Единственным известным поздним сроком завершения решения задачи является ограничение на время выполнения комплекса задач, следовательно, для прочих задач поздние сроки должны быть каким-то образом вычислены из имеющихся исходных данных. При этом могут быть неизвестны характеристики в момент времени, когда формируется архитектура каналов связи и их состояние, в то время как именно характеристики каналов передачи данных будут определять время, необходимое для передачи данных транзитными узлами и, соответственно, время, отводимое для решения задач обработки данных.

Поэтому целесообразность размещения двух задач с информационным

обменом на узлах будем определять количеством транзитных узлов, допуская при этом доступность канала передачи данных, а для определения времени, необходимого при расчете загруженности узлов, будем пользоваться априорными оценками на базе предположения, что на каждую задачу в графе задач, учитываемая задачи передачи данных, отводятся равные доли времени, исходя из расположения задачи на графе задач.

Сформированная задача относится к классу  $np$  (являясь структурно-параметрической), поэтому получение решения целесообразно производить при помощи одного из известных метаэвристик – имитации отжига, генетических алгоритмов и др. В данной работе был использован алгоритм имитации отжига [18-20].

Таким образом, укрупненная схема метода формирования архитектуры системы обработки данных будет иметь вид, как представлено на рис. 1.

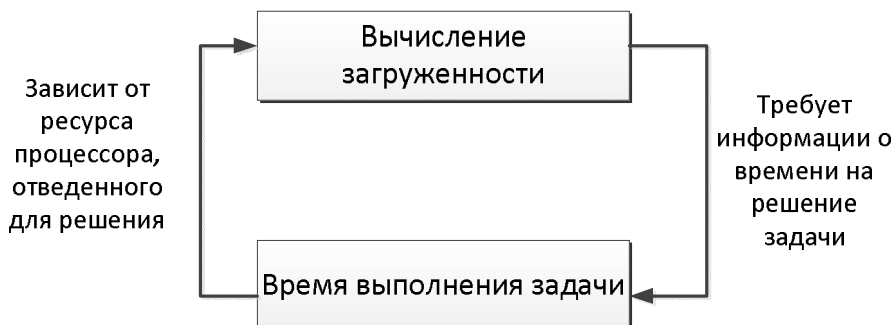


**Рис. 1.** Метод повышения эффективности распределенной архитектуры системы обработки данных

**Fig.1.** Data processing system distributed architecture efficiency improvement method

Формирование априорных оценок времени решения задач на основе данных о графе задач и сетевом графе

Оценочные значения времени, за которое должны быть решены вычислительные задачи, могут быть получены на основе анализа графов комплекса задач и графа сети, но при условии закрепления задач за узлами. При этом, как уже было сказано ранее, для вычисления ЦФ требуется информация о времени, отводимом для решения задачи



**Рис. 2.** Взаимная зависимость параметров времени решения задач и загрузки узлов вычислительных узлов

**Fig. 2.** The mutual dependency of task processing time and node workload parameters

Проведем оценивание времени решения задач следующим образом.

1. Рассмотрим граф комплекса задач, выделяя критический путь. Каждую задачу на критическом пути взвесим значением  $T/N$ , где  $T$  – ограничение на время выполнения комплекса задач,  $N$  – количество задач на критическом пути.

2. Составляем все возможные маршруты, которые начинаются и(или) заканчиваются на критическом пути. Для невзвешенных вершин производим разметку следующим образом:

$$T_i = (T - \sum T_c) / K, \quad (6)$$

на узле, в то время как время решения задачи узлом зависит от загруженности, т.е. от доли вычислительного ресурса, отводимого для решения этой задачи (рис.2). Поэтому использование априорных оценок, являясь довольно грубым приближением, позволяет по крайней мере оценить перспективность получаемых решений относительно эффективности архитектуры системы обработки данных.

где  $T_c$  – значения временных оценок для вершин на критическом пути;  $K$  – количество вершин в маршруте кроме взвешенных.

Таким образом, получены приближенные оценки времени, за которые должны быть решены вычислительные задачи.

Рассмотрим граф сети на произвольной итерации формирования архитектуры, т.е. когда задачи закреплены за узлами.

1. Случайным образом формируем маршруты передачи данных между двумя информационно связанными задачами.

2. Если вершины графа сети, на которых закреплены инцидентные вершины графа зада, также инцидентны, то модификации временных оценок не производится.

3. В противном случае:

- формируется задача передачи данных, трудоемкость которой рассчитывается исходя из трудоемкости приема и отправки данных между задачами  $i$  и  $i+1$ ;

- задача передачи данных закрепляется за узлами на маршруте между теми узлами, за которыми закреплены задачи, инцидентные на графе задач;

- для маршрута на графе сети за вычетом одной из конечных вершин оценочное время модифицируется следующим образом:

$$T_j = \frac{T_i + T_{i+1}}{n - 1}, \quad (7)$$

где  $T_i$  – оценка времени на решение  $i$ -й задачи;  $T_{i+1}$  – оценка времени на решение инцидентной ей задачи на графе задач;  $n$  – количество узлов на графе сети в маршруте от вершины, за которой закреплена  $i$ -я задача, до вершины, за которой закреплена  $i+1$  задача.

Таким образом, получаем априорные оценки времени на решение комплекса задач при условии закрепления за вычислительными узлами задач на одной из итераций формирования архитектуры. Эти временные оценки используются при расчете загруженности вычислительных узлов и, следовательно, для вычисления стоимостной функции.

Очевидно, что такие оценки имеют весьма приближенный характер, одна-

ко, в общем, они отражают тенденцию сокращения времени, отпущенного для решения вычислительных задач, при появлении маршрутов транзита данных. И, помимо этого, априорные оценки отражают тенденцию сокращения допустимого времени на передачу данных, при наличии ограничений на время выполнения комплекса задач.

## Результаты и их обсуждение

В качестве примеров рассмотрим следующие структуры графов комплексов задач.

Для графа А структура фрагмента сети показана на рис. 5, для графа В – на рис. 6, соответственно.

Применяя последовательно шаги, представленные на схеме рис. 1, были получены следующие результаты (1000 итерация алгоритма имитации отжига).

На графиках рис. 8,10 видно, что применение мультипликативной стоимостной функции и использование априорных временных оценок приводят к значительному улучшению показателя загруженности как параметра индивидуальных ЦФ и, следовательно, к улучшению индивидуальных значений критериев эффективности архитектуры системы обработки данных.

Загруженность сетевой инфраструктуры также сокращается за счет размещения информационно связанных задач на одном вычислительном узле, что исключает передачу в сеть сравнительно большой доли данных.

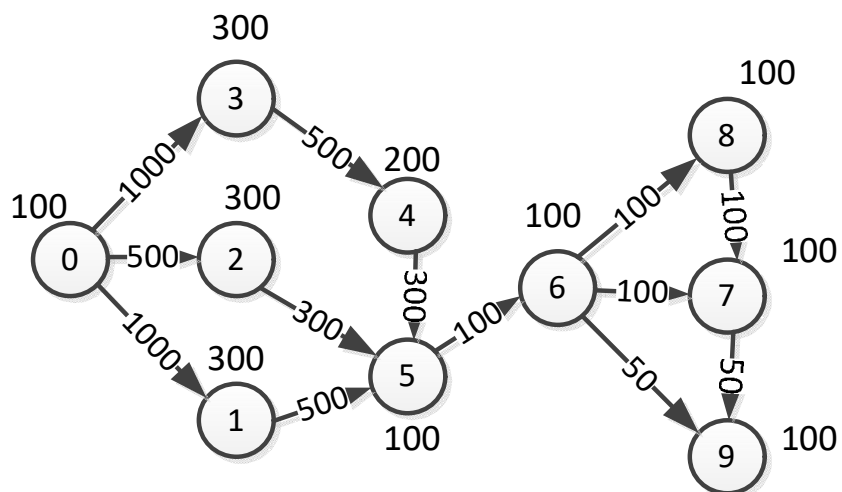


Рис. 3. Граф комплекса задач А

Fig. 3. Task complex A graph

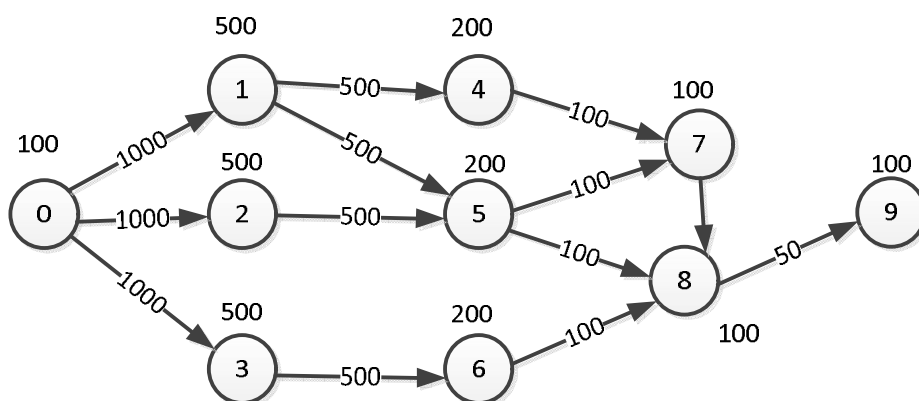


Рис. 4. Граф комплекса задач В

Fig. 4. Task complex B graph

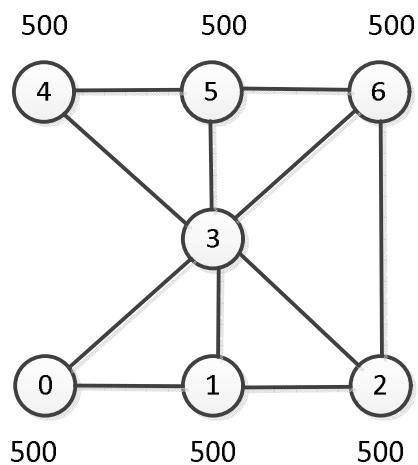


Рис. 5. Граф сети А

Fig. 5. Network A graph

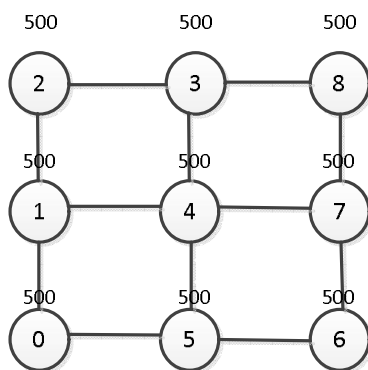


Рис. 6. Граф сети В

Fig. 6. Network B graph

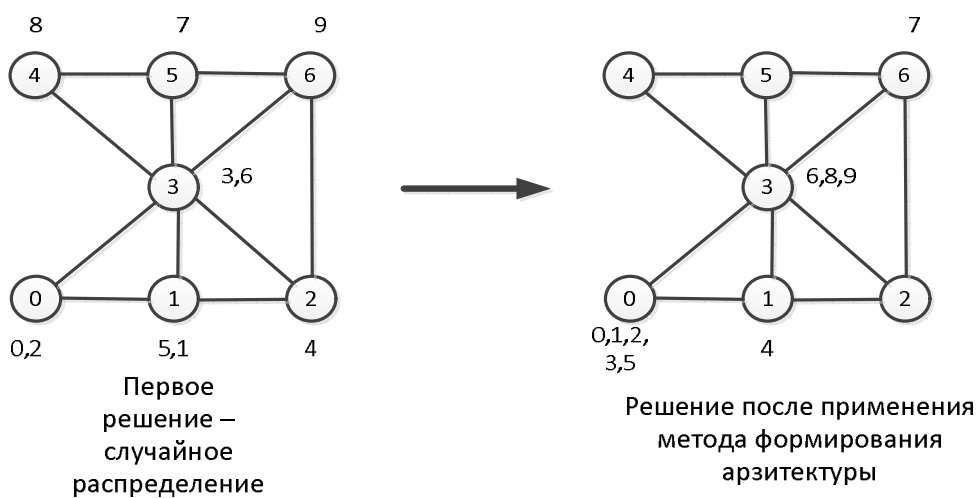


Рис. 7. Формирование эффективной архитектуры для графов А

Fig. 7. The efficient architecture forming for A graphs

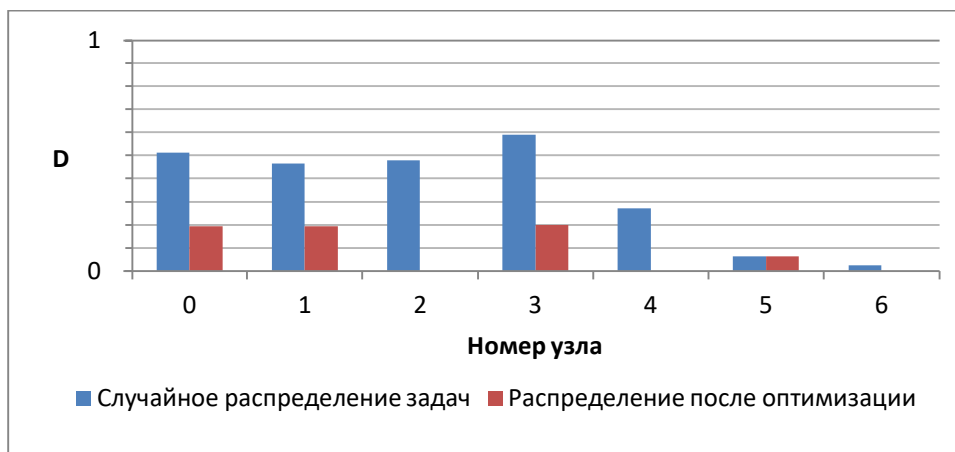
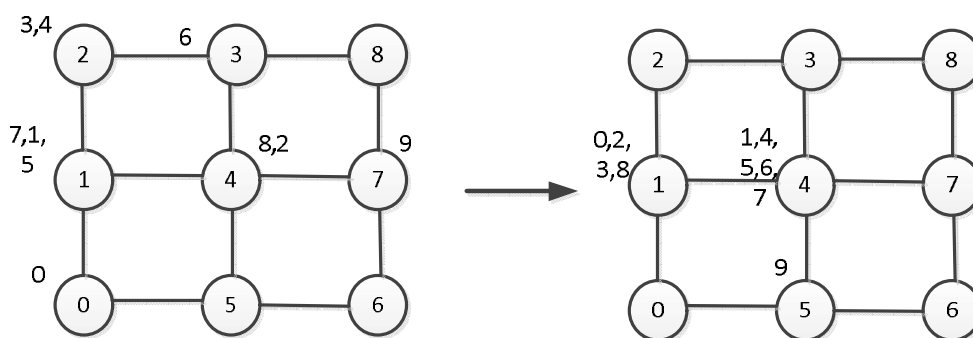


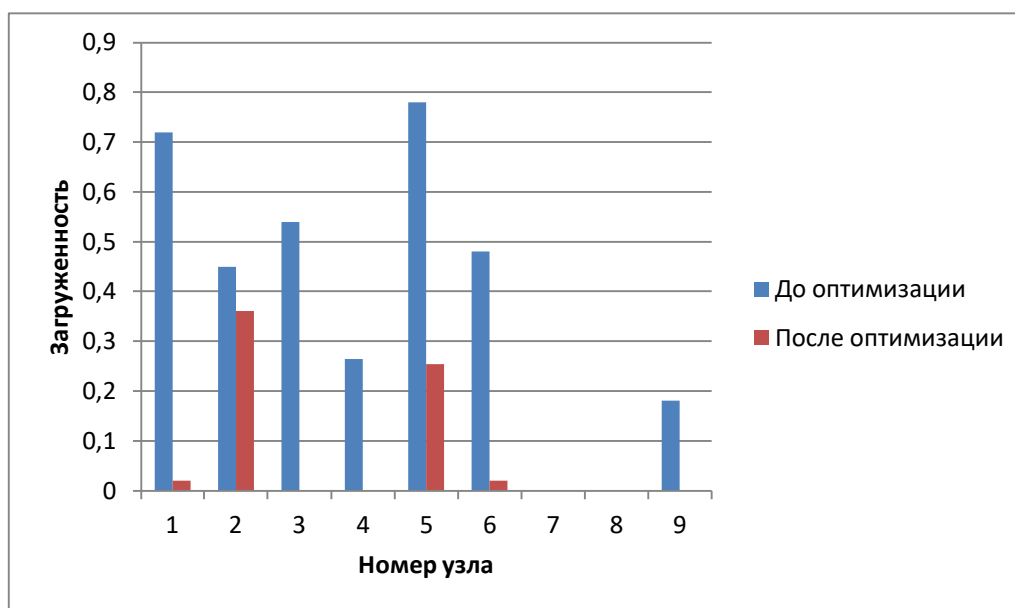
Рис. 8. Сравнение индивидуальной загрузки узлов при случайном распределении задач и после оптимизации по мультипликативной стоимостной функции и априорным оценкам времени решения задач для графов А

Fig. 8. The comparison of the individual nodes workload with the random tasks distribution and after the optimization by means of multiplicative convergence and the apriory tasks processing times for A graphs



**Рис. 9.** Формирование эффективной архитектуры для графов В

**Fig. 9.** The efficient architecture forming for B graphs



**Рис. 10.** Сравнение индивидуальной загрузки узлов при случайном распределении задач и после оптимизации по мультипликативной стоимостной функции и априорным оценкам времени решения задач для графов А

**Fig.10.** The comparison of the individual nodes workload with the random tasks distribution and after the optimization by means of multiplicative convergence and the apriory tasks processing times for A graphs

Например, для графа комплекса задач В вполне очевидно, что размещение задач 0 и 1 на соседних узлах приводит к необходимости передавать данные в сеть, в то время как размещение этих задач на одном узле, наоборот, предполагает отсутствие использования, что в свою очередь устраняет необходимость выделения дополнительного времени на передачу данных через сеть и приводит

к возможности распределить вычислительную нагрузку во времени.

## Выводы

Учитывая возрастающую интенсивность использования туманных и краевых слоев сети для обработки больших данных, а также динамичность – как нагрузочную, так и инфраструктурную, формирование архитектур систем обра-

ботки данных становится актуальной технической проблемой.

Предложенная в данной статье формальная постановка задачи формирования ресурсно-эффективной архитектуры системы обработки данных отличается от предлагаемых ранее учетом влияния передачи данных по транзитным участкам сети, а также возможностью выделения узлов с необходимостью снижения нагрузки за счет использования весовых коэффициентов мультипликативной свертки.

Для решения поставленной структурно-параметрической задачи используются априорные оценки времени завершения работ, рассчитываемые на основе графов задач и графа рассматриваемого фрагмента сети. Проведение экс-

периментальных исследований показало, что даже использование таких неуточненных оценок, реализующих весьма грубые оценки, в отсутствие информации о выделенном ресурсе и времени решения задач узлами, приводит к существенному повышению эффективности в аспекте ресурсопотребления системы вычислительных узлов, формируемой для решения вычислительных задач обработки данных (до 50% снижения индивидуальной вычислительной нагрузки).

Следовательно, предложенный метод эффективен, а дальнейшее его исследование и уточнение с точки зрения получения более точных временных оценок выполнения задач узлами целесообразно.

### Список литературы

1. Safronenkova I., Melnik Y. (2022). An Estimation of the Workload Relocation Techniques Application in Distributed CAD Systems Area. 10.1007/978-3-030-87178-9\_56.
2. Hinkelmann Heiko, Zipf P., Glesner Manfred. (2009). A scalable reconfiguration mechanism for fast dynamic reconfiguration. 145 - 152. 10.1109/FPT.2008.4762377.
3. Huang Yong, Sun Silang, Chu Jing,. (2023). Energy- and time-optimal reconfiguration of spacecraft clusters with collision avoidance // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. 10.1177/09544100231179829.
4. Шевченко С. В. Оптимизация распределенных вычислений в системах параллельной обработки данных // ИТНОУ: информационные технологии в науке, образовании и управлении. 2018. №3 (7). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-raspredelennyh-vychisleniy-v-sistemah-parallelnoy-obrabotki-dannyh>.
5. Ворожцов А. С., Тутова Н. В., Тутов А. В. Оптимизация размещения облачных серверов в центрах обработки данных // T-Comm. 2015. №6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-razmescheniya-oblachnyh-serverov-v-tsentrakh-obrabotki-dannyh>.
6. Jiang Junqiang, Cai Hailin, Xie Lunxin, Sun Zhifang, Pan Li, Yang Zhihe, Lu Ruiqi. (). A Time and Reliability Optimization Algorithm for Workflow Scheduling in Heterogeneous Distributed Computing System // Journal of Circuits, Systems and Computers. 2022. 31. 10.1142/S0218126622502528.

7. Kang Hongyue, Chang Xiaolin, Mišić Jelena, Misic Vojislav, Junchao Fan, Liu Yating. Cooperative UAV Resource Allocation and Task Offloading in Hierarchical Aerial Computing Systems: A MAPPO Based Approach // IEEE Internet of Things Journal. 2023. PP. 1-1. 10.1109/JIOT.2023.3240173.
8. Kang Hongyue, Chang Xiaolin, Mišić Jelena, Misic Vojislav, Junchao Fan, Liu Yating. Cooperative UAV Resource Allocation and Task Offloading in Hierarchical Aerial Computing Systems: A MAPPO Based Approach // IEEE Internet of Things Journal. 2023. PP. 1-1. 10.1109/JIOT.2023.3240173.
9. Geetmala Mrs, Badal Dr, Mishra Dr. A Clustered Approach for Load Balancing in Distributed Systems // Journal of University of Shanghai for Science and Technology. 2021. 23. 448-463. 10.51201/JUSST/21/05241.
10. Kumar Ravi, Rajagopalan S., Joseph P. Light Weight Native Edge Load Balancers for Edge Load Balancing // Green Intelligent Systems and Applications. 2023. 3. 48-55. 10.53623/gisa.v3i1.256.
11. Zhang Xiaohui, Nazari Hamed. An Efficient Resource Management Mechanism Based on Developed Political Optimizer in Fog Computing // Cybernetics and Systems. 2022. 1-15. 10.1080/01969722.2022.2145648.
12. Mahmoudi Zahra, Darbanian Elham, Nickray Mohsen. OPTIMAL ENERGY CONSUMPTION AND COST PERFORMANCE SOLUTION WITH DELAY CONSTRAINTS ON FOG COMPUTING // Jordanian Journal of Computers and Information Technology. 2023. 9. 1. 10.5455/jjcit.71-1667637331.
13. Duolikun Dilawaer, Nakamura Shigenari, Enokido Tomoya, Takizawa Makoto. (2022). Energy-Consumption Evaluation of the Tree-Based Fog Computing (TBFC) Model. 10.1007/978-3-031-20029-8\_7.
14. Morkevicius Nerijus & Liutkevicius Agnius & Venčkauskas Algimantas. Multi-Objective Path Optimization in Fog Architectures Using the Particle Swarm Optimization Approach // Sensors. 2023. 23. 3110. 10.3390/s23063110.
15. The Network Load Balancer in Decentralized Systems // Advances in Cyber-Physical Systems. 2023. 8. 25-34. 10.23939/acps2023.01.025.
16. Xia Bin, Kong Fanyu, Zhou Jun, Tang Xiaosong, Gong Hong. A Delay-Tolerant Data Transmission Scheme for Internet of Vehicles Based on Software Defined Cloud-Fog Networks // IEEE Access. 2020. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2020.2983440.
17. Барский А.Б. Параллельные информационные технологии. М.: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007.
18. Савин А. Н., Тимофеева Н. Е. Применение алгоритма оптимизации методом имитации отжига на системах параллельных и распределённых вычислений // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2012. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-algoritma-optimizatsii-metodom-imitatsii-otzhiga-na-sistemah-parallelnyh-i-raspredelennyh-vychisleniy>.

19. Ingber A, Ingber Lester (2002). Simulated annealing: Practice versus theory.
20. Kirkpatrick S., Gelatt Jr. C. D., and Vecchi M. P. Optimization by Simulated Annealing // *Science*. 220. 1983. P. 671-680.

### References

1. Safronenkova, I. & Melnik, Y.. (2022). An Estimation of the Workload Relocation Techniques Application in Distributed CAD Systems Area. 10.1007/978-3-030-87178-9\_56.
2. Hinkelmann, Heiko & Zipf, P. & Glesner, Manfred. (2009). A scalable reconfiguration mechanism for fast dynamic reconfiguration. 145 - 152. 10.1109/FPT.2008.4762377.
3. Huang, Yong & Sun, Silang & Chu, Jing. Energy- and time-optimal reconfiguration of spacecraft clusters with collision avoidance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. 2023. 10.1177/09544100231179829.
4. Shevchenko Sergej Vasil'evich Optimizatsiya raspredelennykh vychislenii v sistemakh parallel'noi obrabotki dannykh [Optimization of distributed computing in parallel data processing systems]. *ITNOU: informacionnye tehnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii = ITNOU: Information Technologies in Science, Education and Management*, 2018, no.3 (7). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-raspredelennykh-vychisleniy-v-sistemakh-parallel'noi-obrabotki-dannykh>.
5. Vorozhtsov A. S., Tutova N. V., Tutov A. V. Optimizatsiya razmeshcheniya oblachnykh serverov v tsentrakh obrabotki dannykh [Optimization of cloud server placement in data centers]. *T-Comm*. 2015, no. 6. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-razmeshcheniya-oblachnykh-serverov-v-tsentrakh-obrabotki-dannykh>.
6. Jiang, Junqiang & Cai, Hailin & Xie, Lunxin & Sun, Zhifang & Pan, Li & Yang, Zhihe & Lu, Ruiqi. A Time and Reliability Optimization Algorithm for Workflow Scheduling in Heterogeneous Distributed Computing System. *Journal of Circuits, Systems and Computers*. 2022. 31. 10.1142/S0218126622502528.
7. Kang, Hongyue & Chang, Xiaolin & Mišić, Jelena & Misic, Vojislav & Junchao, Fan & Liu, Yating. Cooperative UAV Resource Allocation and Task Offloading in Hierarchical Aerial Computing Systems: A MAPPO Based Approach. *IEEE Internet of Things Journal*. 2023. PP. 1-1. 10.1109/JIOT.2023.3240173.
8. Kang, Hongyue & Chang, Xiaolin & Mišić, Jelena & Misic, Vojislav & Junchao, Fan & Liu, Yating. Cooperative UAV Resource Allocation and Task Offloading in Hierarchical Aerial Computing Systems: A MAPPO Based Approach. *IEEE Internet of Things Journal*. 2023. PP. 1-1. 10.1109/JIOT.2023.3240173.
9. Geetmala, Mrs & Badal, Dr & Mishra, Dr. A Clustered Approach for Load Balancing in Distributed Systems. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*. 2021. 23. 448-463. 10.51201/JUSST/21/05241.
10. Kumar, Ravi & Rajagopalan, S. & P., Joseph. Light Weight Native Edge Load Balancers for Edge Load Balancing. *Green Intelligent Systems and Applications*. 2023. 3. 48-55. 10.53623/gisa.v3i1.256.

11. Zhang, Xiaohui & Nazari, Hamed. An Efficient Resource Management Mechanism Based on Developed Political Optimizer in Fog Computing. *Cybernetics and Systems*. 2022. 1-15. 10.1080/01969722.2022.2145648.
12. Mahmoudi, Zahra & Darbanian, Elham & Nickray, Mohsen. Optimal energy consumption and cost performance solution with delay constraints on fog computing. *Jordanian Journal of Computers and Information Technology*. 2023. 9. 1. 10.5455/jjcit.71-1667637331.
13. Duolikun, Dilawaer & Nakamura, Shigenari & Enokido, Tomoya & Takizawa, Makoto. (2022). Energy-Consumption Evaluation of the Tree-Based Fog Computing (TBFC) Model. 10.1007/978-3-031-20029-8\_7.
14. Morkevicius, Nerijus & Liutkevicius, Agnius & Venčkauskas, Algimantas. Multi-Objective Path Optimization in Fog Architectures Using the Particle Swarm Optimization Approach. *Sensors*. 2023. 23. 3110. 10.3390/s23063110.
15. The Network Load Balancer in Decentralized Systems. *Advances in Cyber-Physical Systems*. 2023. 8. 25-34. 10.23939/acps2023.01.025.
16. Xia, Bin & Kong, Fanyu & Zhou, Jun & Tang, Xiaosong & Gong, Hong. A Delay-Tolerant Data Transmission Scheme for Internet of Vehicles Based on Software Defined Cloud-Fog Networks. *IEEE Access*. 2020. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2020.2983440.
17. Barskij A.B. *Parallel'nye informacionnye tehnologii* [Parallel information technologies]. Moscow, 2007.
18. Savin A. N., Timofeeva N. E. Primenenie algoritma optimizacii metodom imitacii otzhiga na sistemah parallel'nyh i raspredel'nyh vychislenij [Application of the optimization algorithm by simulated annealing on systems of parallel and distributed computing]. *Izv. Sarat. un-ta. Nov. ser. Ser. Matematika. Mehanika. Informatika = Izv. Sarat. un-ta. Nov. ser. Ser. Mathematics. Mechanics. Computer Science*. 2012. №1. Available at: [https:// cyberleninka.ru/article/n/primenenie-algoritma-optimizatsii-metodom-imitatsii-otzhiga-na-sistemah-parallelnyh-i-raspredel'nyh-vychisleniy](https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-algoritma-optimizatsii-metodom-imitatsii-otzhiga-na-sistemah-parallelnyh-i-raspredel'nyh-vychisleniy).
19. Ingber, A & Ingber, Lester. (2002). Simulated annealing: Practice versus theory.
20. Kirkpatrick S., Gelatt Jr. C. D., and Vecchi M. P. Optimization by Simulated Annealing. *Science*. 1983. 220. P. 671-680.

---

### Информация об авторе / Information about the Author

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

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

## Фильтрация сложных сигналов на основе двухуровневой нечетко-логической модели

А. Е. Архипов <sup>1</sup> ✉

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

✉ e-mail: alex.76\_09@mail.ru

### Резюме

**Цель исследования.** Разработка метода фильтрации и бинаризации сложных аналоговых радиосигналов, таких как сигнал автоматического зависимого наблюдения-вещания (АЗН-В), позволяющих повысить чувствительность приемника сигнала АЗН-В и увеличить количество корректно декодированных принятых сообщений.

**Методы.** Для решения поставленной задачи в работе были применены основы теории фильтрации сигналов и теории нечетких множеств. Предложенный метод основан на совмещении фильтрации сигнала с помощью известных фильтров и двухуровневой нечеткой модели. Первый и второй уровень нечеткой модели содержат три операции: автоматического формирования функций принадлежности, композиционного вывода и дефаззификации. Входные переменные обоих уровней задаются трапецевидными функциями принадлежности. На первом уровне они формируются автоматически в зависимости от характеристик сложного сигнала. Функция вывода на первом уровне задается одноэлементной функцией, а дефаззификация выполняется с использованием упрощенной модели центра тяжести.

**Результаты.** Предложенный метод был реализован в разработанном устройстве на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). Кроме фильтрации, разработанное устройство реализует все функции обработки сигнала, такие как: прием входных данных, декодирование, проверка корректности декодированных данных, хранение и передача сообщений АЗН-В для дальнейшей обработки. Отличительной особенностью устройства являются малые габариты и небольшое энергопотребление, что позволяет использовать его в малых космических аппаратах (МКА) и беспилотных летательных аппаратах.

**Заключение.** Рассмотрен метод фильтрации сложных сигналов на основе нечетко-логической модели, который может применяться для фильтрации сложных сигналов, таких, как сообщения АЗН-В в модулях МКА. Предложенная реализация метода фильтрации позволяет повысить чувствительность приемника сигнала АЗН-В примерно на 20% и правильно декодировать принятый сигнал. Метод был реализован устройством на базе ПЛИС, что позволило уменьшить габариты и энергопотребление по сравнению с аналогами.

**Ключевые слова:** АЗН-В; нечеткая логика; фильтрация сложных сигналов; нечеткий фильтр.

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

**Финансирование:** Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания (проект № 0851-2020-0032).

**Для цитирования:** Архипов А. Е. Фильтрация сложных сигналов на основе двухуровневой нечетко-логической модели // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(2): 140-154. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-140-154>.

Поступила в редакцию 02.07.2023

Подписана в печать 29.07.2023

Опубликована 02.08.2023

## Filtering of Complex Signals Based on a Two-Level Fuzzy-Logic Model

Alexander E. Arkhipov <sup>1</sup> ✉

<sup>1</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: tanygin@yandex.com

### Abstract

**Purpose of research.** Development of a method and algorithm of complex analog radio signals filtering and binarization, such as the signal of Automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B), which allows to increase the sensitivity of the receiver of the AZN-B signal and increase the number of correctly detected received messages.

**Methods.** To solve this problem, the basics of the theory of signal filtering and the theory of fuzzy sets were applied in the work. The proposed method is based on combining signal filtering by known filters and a two-level fuzzy model. The first and second levels of the fuzzy model contain three operations: automatic formation of membership functions, compositional output and defuzzification. Input variables of both levels are given by trapezoidal membership functions. At the first level, they are formed automatically depending on the characteristics of the complex signal. The output function at the first level is given by a singleton function, and defuzzification is carried out using a simplified center of gravity model.

**Results.** The proposed algorithm was implemented in the developed device based on a programmable logic integrated circuit (FPGA). In addition to filtering, the developed device implements all signal processing functions, such as: receiving input data, decoding, checking the correctness of decoded data, storing them, transmitting ADS-B messages for further processing. A distinctive feature of the device is its small size and low power consumption, which allows use it in small spacecraft and unmanned aerial vehicles.

**Conclusion.** A method of filtering complex signals based on a fuzzy logic model is considered, which can be used to filter complex signals, such as ADS-B messages in small spacecraft modules. The proposed implementation of the filtering method makes it possible to increase the sensitivity of the AZN-B signal receiver by 20% and correctly decode the received signal. The method was implemented by an FPGA-based device, which made it possible to reduce the size and power consumption compared to analogues.

**Keywords.** ADS-B; fuzzy logic; filtering complex signals; fuzzy filter.

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

**Funding:** The work was carried out with the financial support of the State assignment (project No. 0851-2020-0032).

**For citation:** 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>.

Received 02.07.2023

Accepted 29.07.2023

Published 02.08.2023

## Введение

В настоящее время нечеткая логика используется для решения задач распознавания данных [1, 2], управления станков с ЧПУ [3], фильтрации сигналов [4]. Использование нечеткой логики в системах приема, фильтрации и детектирования сложных сигналов позволяет не только повысить их чувствительность, но и исправлять некоторые ошибки. Даже при обработке сигнала, где отношение сигнал/шум приближается к единице, используя нечеткую логику, удастся правильно детектировать сообщения [5, 6]. К таким сигналам относится сигнал системы автоматического зависящего наблюдения-вещания (АЗН-В). Поиск публикаций на сайте <https://www.sciencedirect.com> показал, что нечеткая логика практически не используется в этой системе. Следует заметить, что с помощью него передается большое количество нужной информации, такой как идентификатор, местопо-

ложение, курс, скорость и высота воздушных судов, погодные условия и текстовые полётные рекомендации. Сигнал АЗН-В в режиме Mode-S передается на частоте 1090 МГц и подвергается сильному зашумлению, особенно, если приемник находится от воздушного судна на значительном удалении. Приемники сообщений АЗН-В применяют различные аналоговые и цифровые фильтры для обработки принятого сигнала. Сигнал представляет собой частотно-импульсную модуляцию в манчестерском коде длиной 120 бит и длится 120 мкс, при этом передается 112 бит полезной информации, включая проверочные биты. Пример сигнала АЗН-В в режиме Mode-S показан на рис. 1. На рис. 2 показана его структура, включающая преамбулу и блок данных.

Принятый приемником сигнал сильно искажен, пример такого сигнала показан на рис. 3.

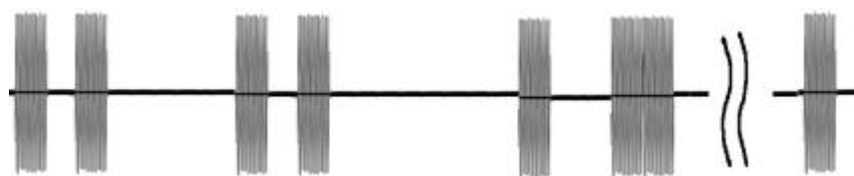


Рис. 1. Сигнал АЗН-В (1090 МГц) в режиме Mode-S

Fig. 1. ADS-B signal (1090 MHz) in Mode-S mode

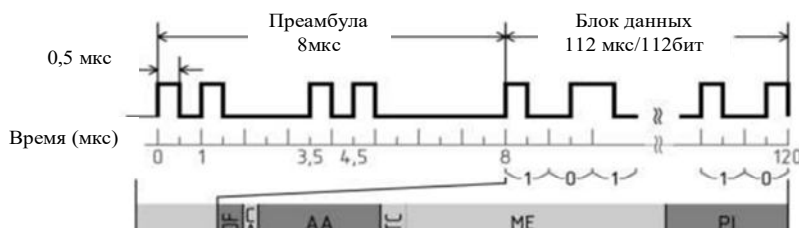


Рис. 2. Структура сигнала АЗН-В

Fig. 2. Structure of the ADS-B signal

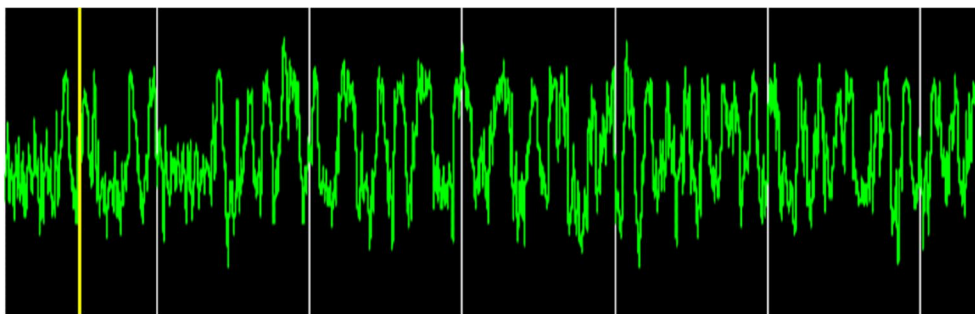


Рис. 3. Реальный принятый сигнал АЗН-В

Fig. 3. Real received ADS-B signal

В статье рассматривается подход, использующий нечеткую логику, позволяющий отфильтровать шумы, детектировать сигнал и исправить ошибки, возникшие при бинаризации.

## Материалы и методы

### Фильтрация сигналов

Для фильтрации сигналов, таких как сигнал АЗН-В, применяют различные аналоговые и цифровые фильтры [7,8]. К цифровым фильтрам относятся усредняющий [9], медианный [10], Калмана [11], КИХ [12-14], БИХ [15], нечеткий [4,16] и др. У каждого фильтра есть свои достоинства и недостатки.

### Усредняющий фильтр

Усредняющий фильтр выполняет усреднение нескольких отсчетов сигнала и задается формулой

$$y_i = \frac{\sum_{k=i-\frac{n}{2}+1}^{i+\frac{n}{2}} x_k}{n}, \quad (1)$$

где  $x_k$  – входной сигнал;  $n$  – количество отсчетов для усреднения;  $i$  – номер текущего отсчета;  $y_i$  – значение усредненного сигнала. Усредняющий фильтр

уменьшает шум и повышает отношение сигнал/шум. При выполнении фильтрации дважды отношение сигнал/шум увеличится больше, в сравнении с однократной фильтрацией. На рис. 4 показан входной сигнал, отфильтрованный по 4 отсчетам сигнала ( $n=4$ ) и сигнал, отфильтрованный повторно.

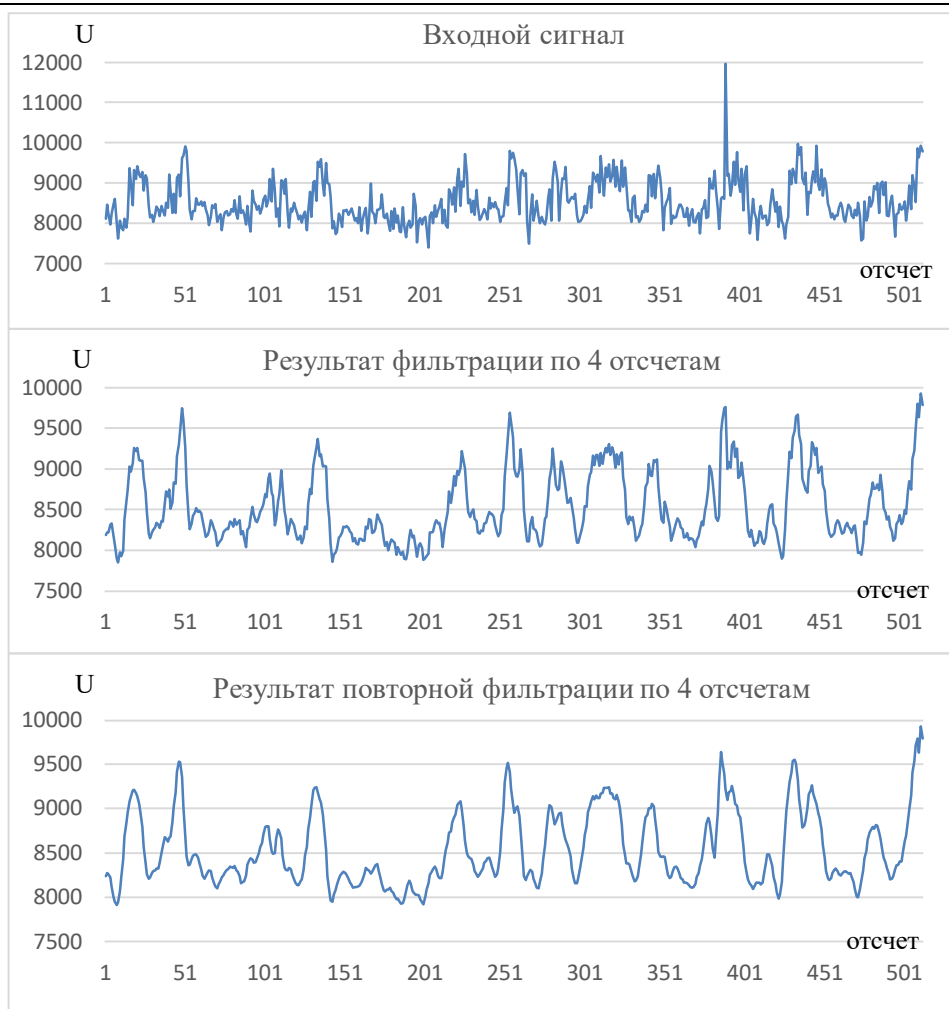
К недостаткам фильтра относится сглаживание фронтов сигнала, что приводит к изменению длительности импульсов при бинаризации.

### Медианный фильтр

Медианный фильтр выбирает центральное значение из группы отсчетов, отсортированных по возрастанию. Рассчитывается по формуле

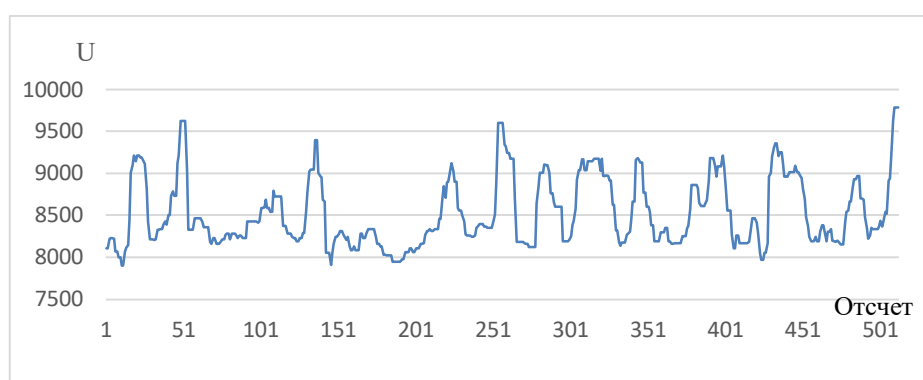
$$y_i = \text{midpoz}(\text{sort}(x_{i-\frac{n}{2}+1}, \dots, x_{i+\frac{n}{2}})), \quad (2)$$

где  $x_i$  – входной сигнал;  $n$  – количество отсчетов в группе;  $i$  – номер текущего отсчета;  $\text{sort}()$  – функция сортировки;  $\text{midpoz}()$  – функция нахождения среднего элемента;  $y_i$  – значение усредненного сигнала. На рис. 5 представлен сигнал, отфильтрованный по 7 отсчетам.



**Рис. 4.** Результат обработки сигнала АЗН-В усредняющим фильтром

**Fig. 4.** The result of ADS-B signal processing by the averaging filter



**Рис. 5.** Результат обработки сигнала АЗН-В медианным фильтром

**Fig. 5.** The result of ADS-B signal processing by the median filter

К недостаткам фильтра относится увеличение вычислительной сложности за счет добавления сортировки на каж-

дый отсчет фильтра, которая зависит от количества сортируемых элементов.

### Фильтр Калмана

Фильтр Калмана является рекурсивным фильтром, который на каждом шаге оценивает состояние системы, при этом базируется на текущем измерении и на предыдущем состоянии системы. Выходное значение фильтра вычисляется по формуле

$$y_i = \alpha * (x_i + K(x_i - x_{i-n})) + (1 - \alpha)y_{i-1}, \quad (3)$$

где  $x_i$ ,  $x_{i-n}$  – входной сигнал в текущей позиции  $i$  и в позиции  $i-n$ ;  $\alpha$ ,  $K$  – коэффициенты фильтра;  $y_i$ ,  $y_{i-1}$  – значение отфильтрованного сигнала в текущей и предыдущей позициях.

К недостаткам фильтра относится трудоемкость при подборе коэффициентов.

### КИХ фильтр

Фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ фильтр) – не-

курсивный линейный цифровой фильтр. Для вычисления результата находится сумма нескольких отсчетов, каждый из которых умножается на свой коэффициент:

$$y_i = \sum_{k=0}^{k=n-1} x_{i-k} * s_k, \quad (4)$$

где  $x_{i-k}$  – входной сигнал в позиции  $i-k$ ;  $s_k$  – коэффициент фильтра для  $k$ -го элемента;  $y_i$  – значение отфильтрованного сигнала.

На рис. 6 показаны слабо- и сильнозашумленные сигналы, а также результаты их обработки КИХ фильтром.

К недостаткам КИХ фильтра относится трудоемкость при подборе коэффициентов. Результатом фильтрации ранее описанных фильтров является не бинарная функция.

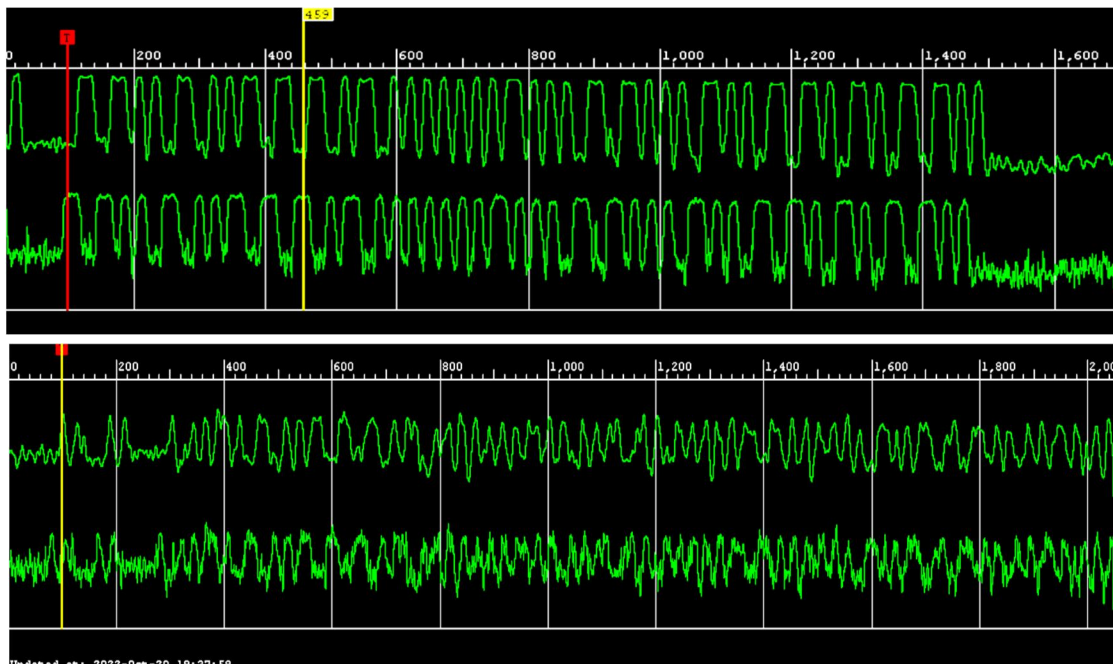


Рис. 6. Результат обработки слабо- и сильнозашумленного сигнала КИХ фильтром

Fig. 6. The result of processing the signal of a weakly and strongly noisy signals

### Нечеткий фильтр

С помощью нечеткого фильтра не только получается необходимая бинарная функция, но и производится коррекция ошибок бинаризации. В общем виде нечеткий фильтр вычисляется по формуле:

$$y_i = F(x_{i-n}, \dots, x_i), \quad (5)$$

где  $x_{i-n}$ ,  $x_i$  – входной сигнал в позиции  $i-n$  и  $i$ ;  $F()$  – нечеткая функция;  $y_i$  – значение отфильтрованного сигнала.

К недостаткам фильтра относится отсутствие стандартной настройки коэффициентов нечеткой модели.

### Фильтрация сложных сигналов на основе нечетко-логической модели

Для фильтрации сложных сигналов предлагается двухуровневая модель, ос-

нованная на нечеткой логике, показанная на рис. 7. Сначала фильтрация сигнала осуществляется одним из фильтров: усредняющим, медианным, КИХ. Для фильтрации сигнала АЗН-В выбран КИХ фильтр, вносящий в сигнал наименьшие искажения и обладающий простой реализацией. Затем сигнал фильтруется нечетким фильтром на основе двухуровневой нечетко-логической модели. Входной сигнал поступает на КИХ фильтр с АЦП разрядностью 14 бит с частотой 25 МГц и является целочисленным. Выходной сигнал КИХ фильтра также является целочисленным числом с разрядностью 14. На выходе нечеткого фильтра сигнал является бинарным.

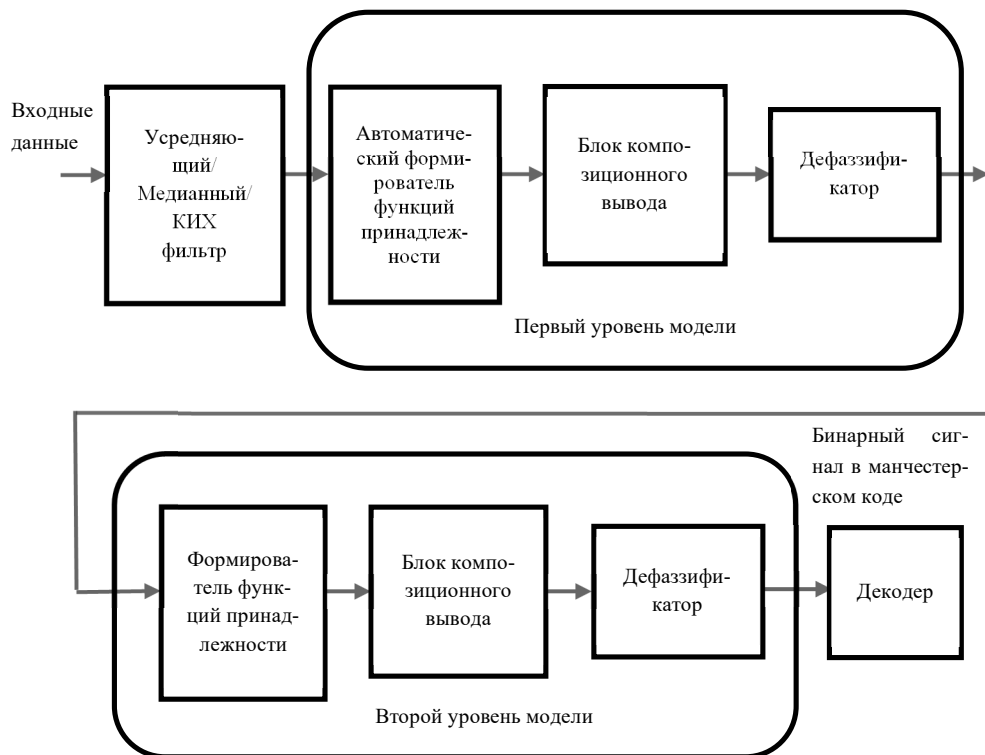


Рис. 7. Фильтрации сложных сигналов на основе нечетко-логической модели

Fig. 7. Filtering complex signals based on the two-level fuzzy model

Первый уровень нечеткой модели состоит из трех блоков: автоматического формирователя функций принадлежности, блока композиционного вывода и дефаззификатора. Второй уровень модели также состоит из трех блоков: формирователя функций принадлежности, блока композиционного вывода и дефаззификатора. Выходные бинарные данные поступают на Декодер, который декодирует входной бинарный сигнал в сообщение АЗН-В.

#### Первый уровень нечеткой модели

На первом уровне нечеткой модели сначала формируется входная функция принадлежности, которая является тра-

пецевидной и включает две входные переменные  $DX_1$  и  $DX_2$ :

$$DX_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } x \in [0; P_0], \\ \frac{P_1 - x}{P_1 - P_0}, & \text{если } x \in [P_0; P_1], \\ 0, & \text{если } x \in [P_1; 5000]. \end{cases}$$

$$DX_2 = \begin{cases} 0, & \text{если } x \in [0; P_0], \\ \frac{x - P_0}{P_1 - P_0}, & \text{если } x \in [P_0; P_1], \\ 1, & \text{если } x \in [P_1; 5000]. \end{cases} \quad (6)$$

где  $P_0 = \min(x) + \alpha_{\min}(\max(x) - \min(x))$

$P_1 = \min(x) + \alpha_{\max}(\max(x) - \min(x))$

где  $x$  – входная переменная;  $\alpha_{\max}$  и  $\alpha_{\min}$  – коэффициенты, задающие уровень чувствительности.

Графически входная функция принадлежности представлена на рис. 8.

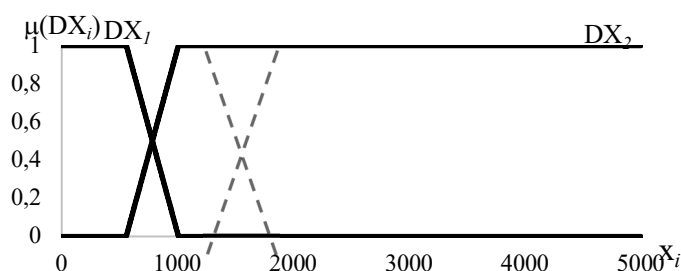


Рис. 8. Входная функция принадлежности первого уровня нечеткой модели

Fig. 8. Input membership function of the first level of the fuzzy model

Входная функция принадлежности формируется автоматически и зависит от минимального и максимального уровня входного сигнала за выбранный промежуток времени.

Выходная функция принадлежности является одноэлементной функцией и определяется по формуле (7), представлена на рис. 9.

$$F_1(x) = \min(DX_1, DX_2, \text{Edge}), \quad (7)$$

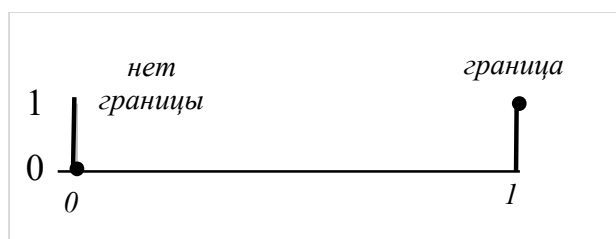


Рис. 9. Выходная функция принадлежности первого уровня нечеткой модели

Fig. 9. Output membership function of the first level of the fuzzy model

Выходные значения, полученные на первом уровне нечеткой модели, являются входными для второго уровня.

#### Второй уровень нечеткой модели

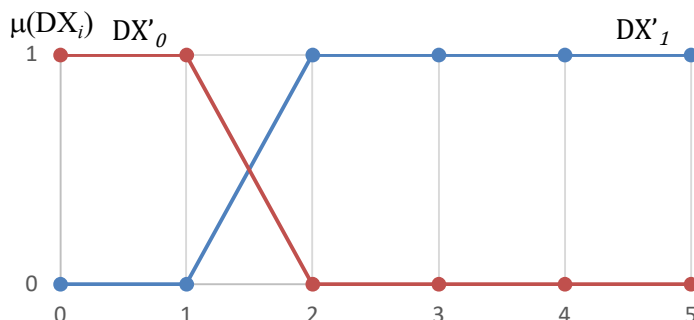
Цель второго уровня нечеткой модели – скорректировать результат первого уровня – при отношении сигнал/шум, близком к 1, возможно большее число ложных срабатываний. Для этого учитывается несколько значений, полученных на первом уровне, в позиции до текущего отсчета и столько же после (выбрано 3 отсчета, для других сигналов можно выбрать 4 или 5 отсчетов). На втором уровне нечеткой модели входная функция принадлежности также задается трапецевидной функ-

цией и включает две входные переменные  $DX'_0$  и  $DX'_1$ :

$$\begin{aligned} DX'_0 &= \begin{cases} 1, & \text{если } x \in [0;1], \\ 2-x, & \text{если } x \in [1;2], \\ 0, & \text{если } x \in [2;5]. \end{cases} \\ DX'_1 &= \begin{cases} 0, & \text{если } x \in [0;1], \\ x-1, & \text{если } x \in [1;2], \\ 1, & \text{если } x \in [2;5]. \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

Значение переменной  $DX'_1$  равно 1, если количество отсчетов, равное единице, в выбранном диапазоне больше одного (для других сигналов может быть больше двух или трех). Наоборот, значение переменной  $DX'_0$  равно 1, если количество отсчетов, равное единице, в выбранном диапазоне меньше двух

На рис. 10 представлена функция принадлежности для сигнала АЗН-В.



**Рис. 10.** Входная функция принадлежности второго уровня нечеткой модели

**Fig. 10.** Input membership function of the second level of the fuzzy model

На рис. 11 показан пример анализа текущего отсчета, предыдущих трех, последующих трех и трех отсчетов с центральным текущим пикселом. В анализе участвуют четыре переменные. Переменная  $a$  принимает значение равное единице, если количество единиц в предыдущих трех отсчетах более одного. Переменная  $b$  равна единице, если

текущий отсчет равен единице. Переменная  $c$  принимает значение равное единице, если количество единиц в последующих трех отсчетах более одного. Переменная  $d$  принимает значение равное единице если три отсчета с центральным текущим равны единице. На рис. 11 показаны области вычисления для перечисленных переменных.

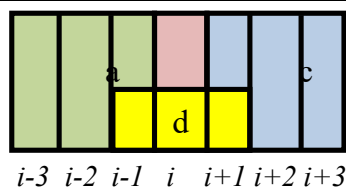


Рис. 11. Логический вывод

Fig. 11. Logic inference

Выходная функция принадлежности  $F_2(x)$  вычисляется по формуле (9). Она принимает значение равное единице в четырех случаях:

- когда переменные  $a$  и  $b$  равны единице, т.е. когда текущий отсчет равен единице  $i$ , хотя бы два из трех предыдущих равны единице;
- когда переменные  $b$  и  $c$  равны единице, т.е. когда текущий отсчет равен единице  $i$ , хотя бы два из трех последующих равны единице;
- когда переменные  $a$  и  $c$  равны единице, т.е. когда хотя бы два из трех предыдущих равны единице  $i$ , хотя бы два из трех последующих равны единице;
- когда переменная  $d$  равна единице, т.е. когда все три отсчета с центральным текущим равны единице.

$$F_2(x) = \max(\min(a, b), \min(b, c), \min(a, c), d),$$

$$\text{где } a = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{k=i-3}^{k=i-1} DX'_{1k} \geq 2, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad b = DX'_{1i},$$

$$c = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{k=i+1}^{k=i+3} DX'_{1k} \geq 2, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

$$d = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{k=i-1}^{k=i+1} DX'_{1k} = 3, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (9)$$

$$a = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{k=i-3}^{k=i-1} DX'_{1k} \geq 2, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad b = DX'_{1i},$$

Предложенная функция позволяет точно определять начало и конец импульса и удалять ложные срабатывания.

### Результаты и их обсуждение

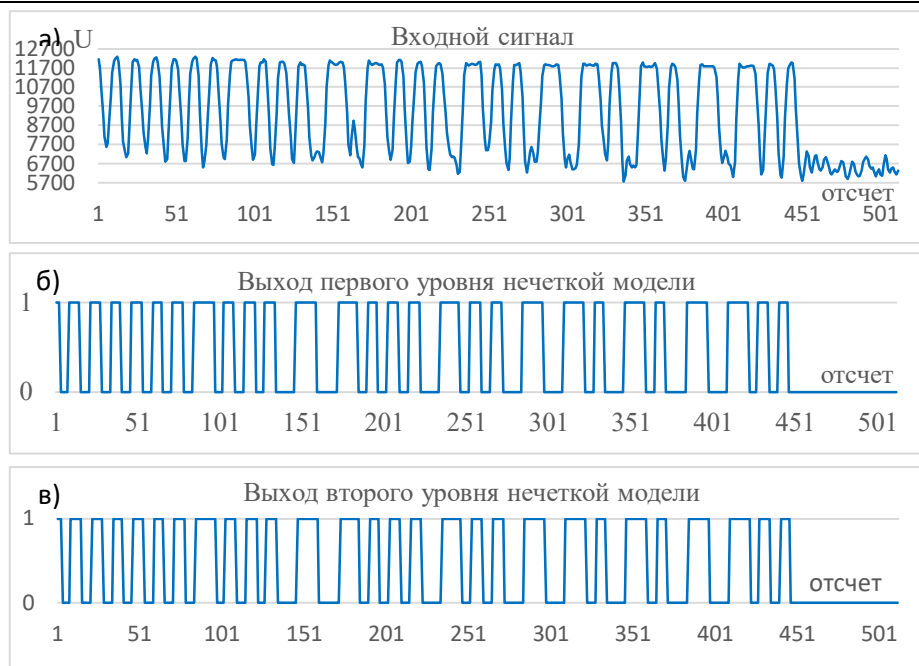
Предложенная нечетко-логическая модель была реализована на базе ПЛИС Xilinx XC7A35T. Результаты обработки сигнала с хорошим показателем отношения сигнал/шум представлены на рис. 12. На рис. 12.а показан входной (полученных с выхода КИХ фильтра) сигнал. На рис. 12.б – бинаризованный сигнал на выходе первого уровня. На рис. 12.в – исправленный сигнал на выходе второго уровня.

Результаты обработки сигнала с плохим показателем отношения сигнал/шум представлены на рис. 13. На рис. 13.а показан входной (полученных с выхода КИХ фильтра) сигнал. На рис. 13.б – бинаризованный сигнал на выходе первого уровня. На рис. 13.в – исправленный сигнал на выходе второго уровня.

В качестве оценки предложенной двухуровневой нечеткой модели использован показатель FPR (частота ложноположительных результатов) [20]. FPR определяется следующим образом:

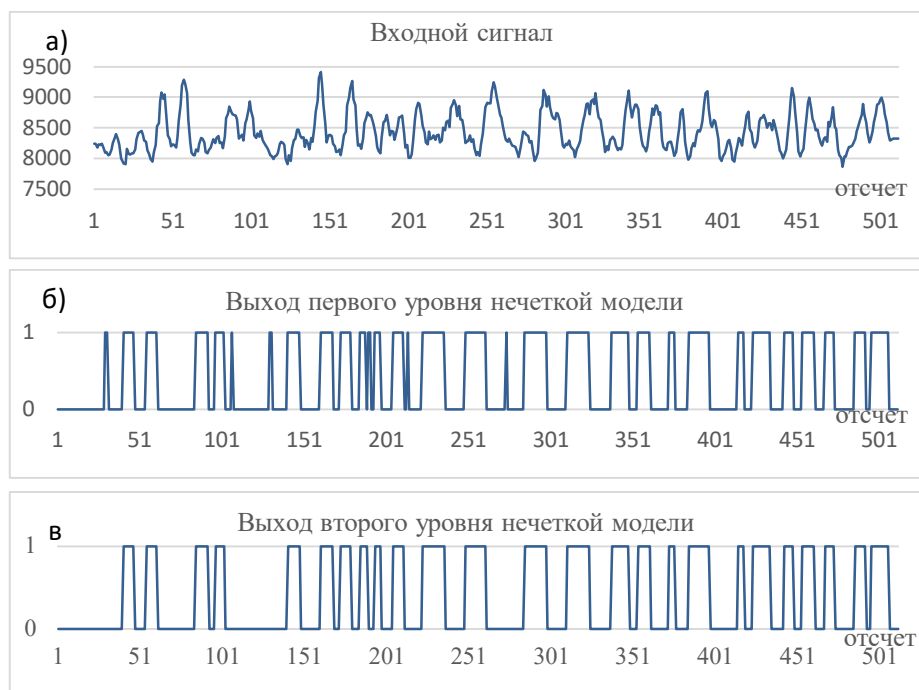
$$FPR = FN / (TP + FN), \quad (10)$$

где TP (True Positive) – относится к количеству сообщений ADS-B, которые действительно верны и правильно декодированы; FN - (False Negative) относится к количеству сообщений ADS-B, которые на самом деле являются правильными, но неправильно декодированы.



**Рис. 12.** Результат обработки сигнала слабозашумленного сигнала двухуровневым нечетким фильтром

**Fig. 12.** The result of processing a low-noise signal by a two-level fuzzy filter

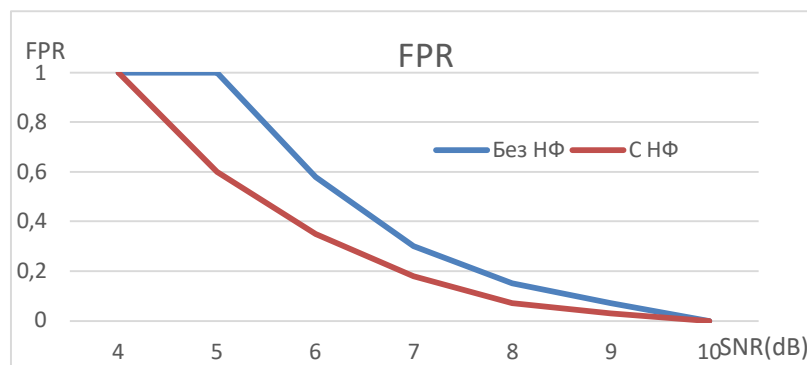


**Рис. 13.** Результат обработки сигнала сильнозашумленного сигнала двухуровневым нечетким фильтром

**Fig. 13.** The result of processing a high-noise signal by a two-level fuzzy filter

На рис. 14 показано сравнение показателя FPR при декодировании сообщений ADS-B с использованием пред-

ложенной двухуровневой нечеткой модели и без нее, для входного сигнала с различным коэффициентом SNR.



**Рис. 14.** Результат сравнительного анализа декодирования сообщений АЗН-В с помощью двухуровневой нечеткой модели и без нее

**Fig. 14.** The result of a comparative analysis of the AZN-B messages decoding using a two-level fuzzy model and without it

Количество правильно распознанных сообщений АЗН-В больше при использовании двухуровневой нечеткой модели, чем без ее использования (см. рис. 14). Этот вывод сделан на основе расчета коэффициента FPR. Из графика видно, что, используя двухуровневую модель, можно правильно декодировать сообщения АЗН-В при снижении отношения сигнал/шум с 5 дБ до 4 дБ, что соответствует увеличению чувствительности примерно на 20%.

### Выводы

В статье рассмотрена двухуровневая нечеткая модель, позволяющая преобразовывать слабо и сильно зашумленные сигналы в двоичный код. Предложенная модель может применяться для фильтрации сложных сигналов, таких, как сообщения АЗН-В в модулях МКА, позволяет повысить чувствительность приемника сигнала АЗН-В и правильно детектировать принятый сигнал.

### Список литературы

1. Ghosh S.K., Ghosh A., Bhattacharyya S. Recognition of cancer mediating biomarkers using rough approximations enabled intuitionistic fuzzy soft sets based similarity measure // *Applied Soft Computing*, 2022. Vol. 124. P. 109052. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109052>.
2. Piegat A. *Fuzzy Modelling and Control*. Physica-Verlag. Heidelberg. 2001, 728 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1824-6>.
3. Bobyr M., Yakushev A., Dorodnykh A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA // *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 2020. Vol. 152. P. 107378. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107378>.
4. Bobyr M., Milostnaya N., Bulatnikov V. The fuzzy filter based on the method of areas' ratio // *Applied Soft Computing*. 2022. Vol. 117. Pp. 108449. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108449>.

5. Ganjeh-Alamdari M., Alikhani R., Perfilieva I. Fuzzy logic approach in salt and pepper noise // *Computers and Electrical Engineering*. 2022. Vol. 102. P. 108264. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.108264>.
6. Rizaner A., Ulusoy A. H., Amca H. Adaptive fuzzy assisted detector under impulsive noise for DVB-T systems // *Optik*. 2016. Vol.127(13). Pp. 5196–5199. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.02.079>.
7. Engelberg S. Digital signal processing. Springer London. 2008. 212 P. <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-119-0>.
8. Deerga Rao K., Swamy M.N.S. Digital signal processing. Springer Singapore. 2018. 789 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-8081-4>.
9. Lin Y. D., Tan Y. K., Tian B. A novel approach for decomposition of biomedical signals in different applications based on data-adaptive Gaussian average filtering // *Biomedical Signal Processing and Control*. 2022. Vol. 71(A). P. 103104. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2021.103104>.
10. Tay D. Sensor network data denoising via recursive graph median filters // *Signal Processing*. 2021. Vol. 189. P. 108302. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2021.108302>.
11. Sharma S., Kulkarni R., Ajithaprasad S., Gannavarpu R. Fringe pattern normalization algorithm using Kalman filter // *Results in Optics*. 2021. Vol. 5. P. 100152. <https://doi.org/10.1016/j.rio.2021.100152>.
12. Patali P., Kassim S. High throughput and energy efficient linear phase FIR filter architectures // *Microprocessors and Microsystems*. 2021. Vol. 87. P. 104367. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2021.104367>.
13. Sun J., Wang Y., Shen Y., Lu S. Multisegment optimization design of variable fractional delay FIR filters // *Digital Signal Processing*. 2021. Vol. 112. P. 103005. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2021.103005>.
14. Paquelet S., Vincent S. On the symmetry of FIR filter with linear phase // *Digital Signal Processing*. 2018. Vol. 81. P. 57-60. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2018.07.011>.
15. Design of a nearly linear-phase IIR filter and JPEG compression ECG signal in real-time system / N. Bui, T. Nguyen, S. Park, J. Choi, T. Vo, Y. Kang, J. Oh // *Biomedical Signal Processing and Control*, 2021. Vol. 67. P. 102431. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2021.102431>.
16. Бобырь М.В., Архипов А.Е., Якушев А.С. Распознавание оттенка цветовой метки на основе нечёткой кластеризации // *Информатика и автоматизация*. 2021. Т. 20. № 2. С. 407-434. <https://doi.org/10.15622/ia.2021.20.2.6>.
17. Bobyr M., Kulabukhov S., Milostnaya N. Fuzzy control system of robot angular attitude // In. 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2016. Pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7910970>.

18. Bobyr M., Titov V., Belyaev A. Fuzzy System of Distribution of Braking Forces on the Engines of a Mobile Robot // In MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 79. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167901052>.

19. Бобырь М.В., Кулабухов С.А. Моделирование процесса управления температурным режимом в зоне резания на основе нечеткой логики // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. №3. С. 76–82.

20. Performance metrics in machine learning. URL: <https://www.javatpoint.com/performance-metrics-in-machine-learning>.

### References

1. Ghosh S.K., Ghosh A., Bhattacharyya S. Recognition of cancer mediating biomarkers using rough approximations enabled intuitionistic fuzzy soft sets based similarity measure. *Applied Soft Computing*, 2022, vol. 124, p. 109052. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109052>.

2. Piegat A. Fuzzy Modelling and Control. Physica-Verlag, Heidelberg, 2001, 728 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1824-6>.

3. Bobyr M., Yakushev A., Dorodnykh A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 2020, vol. 152, p. 107378. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107378>.

4. Bobyr M., Milostnaya N., Bulatnikov V. The fuzzy filter based on the method of areas' ratio. *Applied Soft Computing*, 2022, vol. 117, pp. 108449. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108449>.

5. Ganjeh-Alamdari M., Alikhani R., Perfilieva I. Fuzzy logic approach in salt and pepper noise. *Computers and Electrical Engineering*, 2022, vol. 102, p. 108264. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.108264>.

6. Rizaner A., Ulusoy A. H., Amca H. Adaptive fuzzy assisted detector under impulsive noise for DVB-T systems. *Optik*, 2016, vol.127(13), pp. 5196–5199. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.02.079>.

7. Engelberg S. Digital signal processing. Springer London. 2008. 212 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-119-0>.

8. Deerga Rao K., Swamy M.N.S. Digital signal processing. Springer Singapore. 2018. 789 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-8081-4>.

9. Lin Y. D., Tan Y. K., Tian B. A novel approach for decomposition of biomedical signals in different applications based on data-adaptive Gaussian average filtering. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2022, vol. 71(A), p. 103104. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2021.103104>.

10. Tay D. Sensor network data denoising via recursive graph median filters. *Signal Processing*, 2021, vol. 189. p. 108302. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2021.108302>.

11. Sharma S., Kulkarni R., Ajithaprasad S., Gannavarpu R. Fringe pattern normalization algorithm using Kalman filter. *Results in Optics*, 2021, vol. 5, p. 100152. <https://doi.org/10.1016/j.rio.2021.100152>.

12. Patali P., Kassim S. High throughput and energy efficient linear phase FIR filter architectures. *Microprocessors and Microsystems*, 2021, vol. 87. p. 104367. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2021.104367>.
13. Sun J., Wang Y., Shen Y., Lu S. Multisegment optimization design of variable fractional delay FIR filters. *Digital Signal Processing*, 2021, vol. 112, p. 103005. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2021.103005>.
14. Paquelet S., Vincent S. On the symmetry of FIR filter with linear phase. *Digital Signal Processing*, 2018, vol. 81, p. 57-60. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2018.07.011>.
15. Bui N., Nguyen T., Park S., Choi J., Vo T., Kang Y., Oh J. Design of a nearly linear-phase IIR filter and JPEG compression ECG signal in real-time system. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2021, vol. 67. p. 102431. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2021.102431>.
16. Bobyr M., Arkhipov A., Yakushev A. Raspoznavanie ottenka tsvetovoy metki na osnove nechetkoy klasterizatsii. [Shade recognition of the color label based on the fuzzy clustering]. *Informatica i avtomatizatsiya=Informatics and Automation*, 2021, vol. 20, no. 2, pp. 407-434. <https://doi.org/10.15622/ia.2021.20.2.6>.
17. Bobyr M., Kulabukhov S., Milostnaya N. Fuzzy control system of robot angular attitude. In. *2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2016, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7910970>.
18. Bobyr M., Titov V., Belyaev A. Fuzzy System of Distribution of Braking Forces on the Engines of a Mobile Robot. In *MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 79. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167901052>.
19. Bobyr M., Kulabukhov S. Modelirovanie protsessa upravleniya temperaturnym rezhimom v zone rezaniya na osnove nechetkoi logiki [Simulation of control of temperature mode in cutting area on the basis of fuzzy logic]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin = Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2017, vol. 46, pp. 288-295. <https://doi.org/10.3103/S1052618817030049>.
20. Performance metrics in machine learning. Available at: <https://www.javatpoint.com/performance-metrics-in-machine-learning>.

---

### Информация об авторе / Information about the Author

**Архипов Александр Евгеньевич**, кандидат технических наук, Юго-Западный государственный университет  
г. Курск, Российская Федерация,  
e-mail: alex.76\_09@mail.ru

**Alexander E. Arkhipov**, Cand. of Sci. (Engineering), Southwest State University, Kursk, Russian Federation,  
e-mail: alex.76\_09@mail.ru

## Цифровая регистрирующая вычислительная система с функцией записи измерительной информации на карту памяти формата SDHC

А. И. Мартышкин <sup>1</sup> ✉, Е. А. Данилов <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Пензенский государственный технологический университет  
проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, г. Пенза 440039, Российская Федерация

✉ e-mail: mai@penzgtu.ru

### Резюме

**Цель исследования.** Основная идея статьи заключается в разработке цифрового устройства, созданного на отечественных комплектующих и предназначенного для регистрации измерительной информации с функцией записи на карту памяти и передачи ее на персональный компьютер при помощи USB-интерфейса. В статье также рассматриваются задачи, которые необходимо решить.

**Методы.** Проанализировав возможные альтернативные варианты разработки регистрирующей вычислительной системы, авторы предлагают вариант реализации ее на микроконтроллере, в программном обеспечении которого необходимо предусмотреть следующие функции: реализация информационно обмена по интерфейсу RS-485; реализация обмена по интерфейсу USB 2.0 для передачи накопленной регистрируемой информации на компьютер; реализация записи, чтения и стирания регистрируемой информации на flash-накопителе; реализация счетчика собственного времени с бесперебойной работой при пропадании питающего напряжения.

**Результаты.** В данной статье разработано цифровое устройство, предназначенное для цифровой регистрации с функцией записи измерительной информации на карту памяти формата SDHC. Работа устройства состоит в обеспечении регистрации информации с сохранением ее в виде файлов на карту памяти формата SDHC. Доступ к регистрируемой информации производится с компьютера через интерфейс USB 2.0 в режиме запоминающего устройства посредством программного драйвера, реализованного в микроконтроллере 1986BE92T компании Миландр. Инициализация устройства осуществляется с помощью компьютера, через драйвер реализующий аппаратный мост USB-UART по стандарту USB 2.0.

**Заключение.** Полученные результаты удовлетворяют поставленным цели и задачам. Разработано текстовое описание встроенного программного обеспечения микроконтроллера на языке Си. Кроме того, в статье разработано прикладное программное обеспечение, предназначенное для получения результатов измерения и отправки команд управления на микроконтроллер. Областью применения предлагаемого устройства являются специализированные вычислительные системы, предназначенные для цифровой регистрации информации.

**Ключевые слова:** аппаратный мост USB-UART; измерительная информация; карта памяти; микроконтроллер; персональный компьютер; формат SDHC; цифровое устройство.

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

**Для цитирования:** Мартышкин А. И., Данилов Е. А. Цифровая регистрирующая вычислительная система с функцией записи измерительной информации на карту памяти формата SDHC // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(2): 155-170. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-155-170>.

Поступила в редакцию 02.06.2023

Подписана в печать 29.06.2023

Опубликована 02.08.2023

## Digital Recording Computer System with the Function of Recording Measurement Data to SDHC Memory Card

Alexey I. Martyshkin <sup>1</sup> ✉, Evgeniy A. Danilov <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Penza State Technological University,

1a/11 Baydukova Passage / Gagarina str., Penza 440039, Russian Federation

✉ e-mail: [mai@penzgtu.ru](mailto:mai@penzgtu.ru)

### Abstract

**Purpose of research.** The main idea of the article is to develop a digital device created on domestic components and designed to record measurement information with the function of recording on a memory card and transferring it to a personal computer using a USB-interface. The article also considers the tasks to be solved.

**Methods.** Having analyzed possible alternative variants of development of the registering computer system, the authors offer a variant of its realization on the microcontroller, in the software of which it is necessary to provide the following functions: realization of information exchange via RS-485 interface; realization of exchange via USB 2.0 interface for transfer of the accumulated registered information to the computer; realization of recording, reading and erasing of the registered information on the flash-drive; realization of the counter of its own time with uninterrupted work at the time of the registration of the information on the microcontroller.

**Results.** This paper develops a digital device designed for digital registration with the function of recording measurement information on an SDHC memory card. The operation of the device consists in providing registration of information with saving it in the form of files on a memory card of SDHC format. Access to the registered information is made from a computer via USB 2.0 interface in the memory device mode by means of a software driver realized in the microcontroller 1986BE92T of the Milandr company. Initialization of the device is carried out with the help of a computer, through the driver implementing hardware bridge USB-UART on the standard USB 2.0.

**Conclusion.** The obtained results satisfy the set goal and objectives. A textual description of the microcontroller firmware in C language is developed. In addition, the paper develops application software designed to obtain measurement results and send control commands to the microcontroller. The field of application of the proposed device is specialized computing systems designed for digital recording of information.

**Keywords:** USB-UART hardware bridge; measurement information; memory card; microcontroller; personal computer; SDHC format; digital device.

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

**For citation:** Martyshkin A. I., Danilov E. A. Digital Recording Computer System with the Function of Recording Measurement Data to SDHC Memory Card. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(2): 155-170 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-155-170>.

Received 20.06.2023

Accepted 29.06.2023

Published 02.08.2023

## Введение

На сегодняшний день в области проектирования и создания микросхем, предназначенных для интеллектуальных датчиков, можно выделить следующие тенденции:

1. Развитие и широкомасштабное производство специализированных микросхем, в которых непосредственно интегрированы чувствительные элементы.

2. Создание и изготовление небольших партий микросхем для специализированных интеллектуальных сенсорных систем.

Для оптимизации времени разработки интеллектуальных датчиков физических величин широко используются универсальные микросхемы с встроенными реконфигурируемыми цифровыми арифметическими устройствами для обработки сигналов от различных типов датчиков. Эта концепция заключается в создании микроконтроллеров, спроектированных с учетом обработки сигналов от разнообразных физических датчиков [1-3].

Целью настоящей статьи является разработка цифрового устройства, созданного на отечественных комплектующих и предназначенного для регистрации измерительной информации с функцией записи на карту памяти и передачи ее на персональный компьютер при помощи USB-интерфейса

Задачей настоящей статьи является разработка устройства, предназначен-

ного для цифровой регистрации информации с последующей ее записью на носитель. Работа устройства должна состоять в обеспечении регистрации информации, поступающей по каналу RS-485, с сохранением регистрируемой информации в виде файлов на карту памяти формата SDHC. Доступ к регистрируемой информации производится с персонального компьютера через интерфейс USB 2.0 в режиме запоминающего устройства посредством программного драйвера, реализованного в микроконтроллере отечественного производства 1986BE92T компании Миландр. Инициализация устройства осуществляется с помощью персонального компьютера, через драйвер, реализующий аппаратный мост USB-UART по стандарту USB 2.0.

Регистратор должен выполнять следующие функции:

- 1) реализация протокола работы с картой памяти SDHC;
- 2) реализация драйвера файловой системы FAT32;
- 3) реализация записи регистрируемой информации в .csv файлы;
- 4) реализация драйвера USB и класса Mass Storage Device;
- 5) реализация протокола информационно логического обмена по интерфейсу RS-485.

Разработать описание встроенного программного обеспечения микроконтроллера на языке Си.

## Материалы и методы

Разработка программного обеспечения для ПЭВМ осуществляется на различных языках программирования, в том числе и на языке C++, основы программирования на котором приведены в [4], представляющем собой полноценный самоучитель по языку программирования C++. Шаг за шагом автор рассказывает обо всех основных аспектах этого языка. Книга также охватывает важные темы, такие как обработка исключений, шаблоны, пространства имен и многопоточное программирование. Программное обеспечение удобно разрабатывать в среде Qt, основы программирования в которой описаны в [5], предназначенной как для новичков, так и для профессионалов, желающих узнать что-то новое. Автор демонстрирует читателю нетипичные паттерны и приемы создания уникальных приложений. Затрагивается тема создания приложений для платформ Windows, Mac OS X, Linux, Android и iOS, основанная на применении библиотеки Qt версии 5.10 и выше. Для программирования микроконтроллера 1986BE92T отлично подойдет [6]. Язык C является фундаментом всех языков программирования, при помощи которого создаются идеальные эффективные приложения. Автор приложил усилия, направленные на исследование аспектов, оставшихся вне внимания в других источниках. Он анализирует инструменты, которые можно использовать, а также обсуждает библиотеки, предназначенные для эффек-

тивной работы с операциями, связанными списками и анализом XML-структур. Книга ориентирована на программистов, которые умеют работать на любом языке программирования, и знают базу языка Си. Определенно, для программирования микроконтроллера 1986BE92 [7] подойдет [8], где освещены фундаментальные аспекты программирования на языке Си для отечественных 32-разрядных микроконтроллеров из семейства 1986BE9x компании Миландр [9].

Далее рассмотрим возможные варианты реализации устройства. Под регистратором понимают электронное устройство, способное осуществлять периодичную опросность данных с длительным временем накопления и цифровым интерфейсным выходом для связи с персональным компьютером. В настоящее время в России функционирует набор стандартов, предоставляющих формализованные описания алгоритмов для выделения сигналов из массивов цифровых данных и статистической их обработки. Эти стандарты также устанавливают требования к точности измерений. Примеры разработки измерительных систем, которые полностью соответствуют указанным требованиям, демонстрируют, что такие продукты обычно обладают высокой стоимостью и ограниченной доступностью для широкой аудитории потребителей.

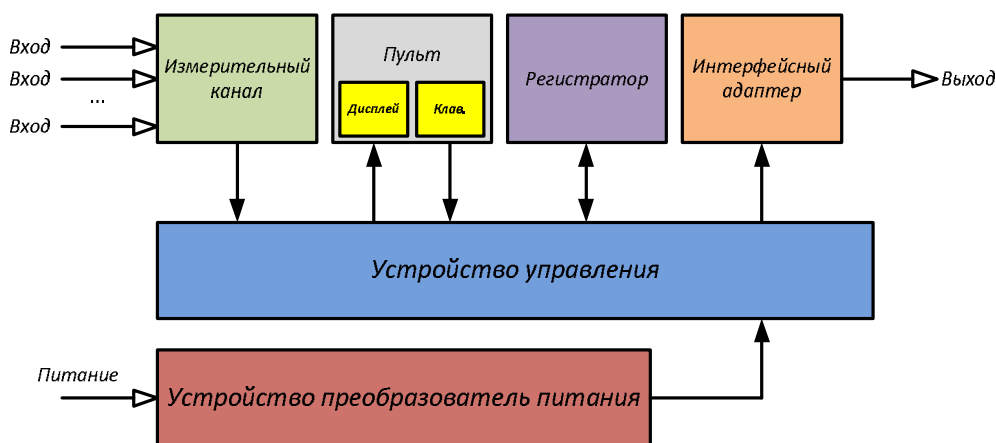
На рис. 1 приводится модель системы для регистрации измерений, в которой используется деятельность экспертов-аудиторов, проводящих энергетиче-

ческие и электротехнические аудиты на предприятиях разного профиля. Условия таких аудитов обычно довольно строгие, и продолжительность их выполнения может быть значительной при большом числе контролируемых объектов. Применение современных дорогостоящих систем измерений часто оказывается избыточным, в некоторых случаях – недостаточно эффективным и затратным, и также может иметь ограни-

чения, такие как ограниченный диапазон рабочих температур. В ходе исследования принято решение упростить как структурную схему (рис. 1), так и процесс ее воплощения в синтезируемом устройстве.

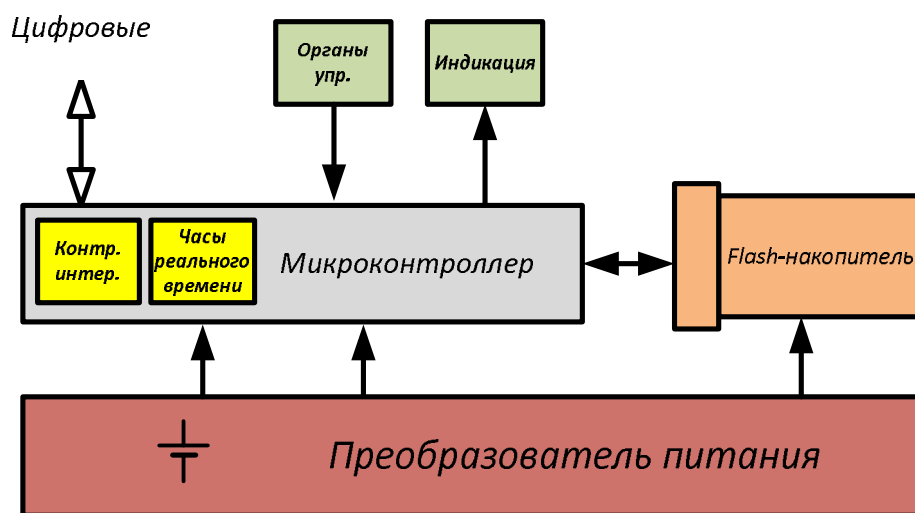
Структурная схема разрабатываемого регистратора показана на рис. 2.

Сравнение реализации современных цифровых систем регистрации с предлагаемым решением представлено в табл. 1.



**Рис. 1.** Обобщенная структурная схема современных цифровых систем регистрации

**Fig. 1.** Generalized structural scheme of modern digital recording systems



**Рис. 2.** Структурная схема разрабатываемого регистратора

**Fig. 2.** Structural diagram of the designed recorder

**Таблица 1.** Сравнение аналогов и предлагаемого решения**Table 1.** Comparison of analogs and the proposed solution

| Составляющая часть /<br>The component part | Обобщенная структура<br>современных цифровых<br>регистраторов / The general-<br>ized structure of modern<br>digital registrars | Структура разрабатываемо-<br>го регистратора / The struc-<br>ture of the registrar being de-<br>veloped                                                        |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Устройство преобразо-<br>вания питания     | Есть. Подается внешнее питание, затем необходимые значения питающих напряжений и токов поступают на устройство управления      | Есть. Подается внешнее питание, затем необходимые значения питающих напряжений и токов поступают на все составные части системы                                |
| Устройство управления                      | Есть. Основное устройство системы, осуществляющее контроль и управление всеми составными частями системы                       | Не выделено в отдельный блок. Реализовано с помощью микроконтроллера                                                                                           |
| Измерительный канал                        | Есть. Поступают входные данные, которые необходимо измерить                                                                    | Не выделен в отдельный блок. Реализован с помощью микроконтроллера                                                                                             |
| Пульт (дисплей + клавиатура)               | Есть.                                                                                                                          | Нет. Убран ввиду необходимости длительной автономной регистрации данных без прямого взаимодействия с пользователем. Присутствуют отдельные светодиоды и кнопки |
| Регистратор                                | Есть. Фиксируются необходимые данные измерений                                                                                 | Не выделен в отдельный блок. Реализован с помощью микроконтроллера                                                                                             |
| Интерфейсный адаптер                       | Есть. Служит для сопряжения с интерфейсами для сопряжения с устройствами, с которых необходимо анализировать информацию        | Не выделен в отдельный блок. Реализован с помощью микроконтроллера. Сохраняется основной алгоритм извлечения измерительных данных из цифровых значений         |

Основное преимущество разрабатываемого регистратора заключается в его относительной доступности, большая часть компонентов представлены отечественными производителями. Обработка данных на компьютере предоставляет возможность снизить требования к микроконтроллеру регистратора, когда задача сводится к постоянному опросу измеряемой информации и передаче полученных кодов в память [11]. Такой метод регистрации, требующий минимальной обработки, называется «бездумным». Однако для этого понадобятся большие объемы памяти и значительное время на обработку данных уже на компьютере. Этот режим регистрации называется непрерывным. Для экономии энергии батарей и продления сеансов регистрации, регистратор может обрабатывать данные в заранее запрограммированные моменты времени. Регистрация в таком случае осуществляется либо равномерно, либо выборочно по времени. Этот способ регистрации называется зондовым. Известен еще один метод регистрации, позволяющий «экономить» память флэш-накопителя, но требующий большого энергопотребления – сторожевой метод, когда микроконтроллер постоянно опрашивает данные, анализирует результаты преобразований и регистрирует лишь те значения, которые отклоняются от нормы. Важно отметить, что энергопотребление от источника питания может быть оптимизировано при использовании эффективного алгоритма обнаружения аномалий,

который не требует высокой тактовой частоты микроконтроллера.

Микроконтроллеры очень широко применяются в системах измерений [12-14]. Это микропроцессорные устройства сигнализации, включая контроллер мнемонита; микропроцессорные устройства измерения электрических величин, в том числе, счетчики электрической энергии; микроконтроллеры, диагностирующие состояния электрооборудования: электрических машин и аппаратов, высоковольтных вводов, устройств определения места повреждения линии; устройства противоаварийной автоматики и т.п. Среди современных 32-разрядных микроконтроллеров с ядром ARM Cortex-M3 выбор сделан в пользу модели 1986BE92 компании Миландр, которая занимает одну из лидирующих позиций на отечественном рынке. Для решаемой задачи особенно значимыми характеристиками микроконтроллера 1986BE92 являются наличие встроенного USB-контроллера и объем оперативной памяти в размере 32 Кбайт, а также объем программной памяти, равный 128 Кбайт.

В соответствии с целью и задачами исследования в ПО микроконтроллера необходимо реализовать следующие функции:

- 1) реализация информационного обмена по интерфейсу RS-485 [15-17];
- 2) реализация обмена по интерфейсу USB [18-19] для передачи накопленной регистрируемой информации на компьютер;

3) реализация записи, чтения и стирания регистрируемой информации на flash-накопителе;

4) реализация счетчика собственного времени с бесперебойной работой при пропадании питающего напряжения.

### Результаты и их обсуждение

На начальном этапе синтеза функциональной схемы необходимо выбрать наиболее оптимальную ее структуру. Предлагаемая схема представлена на рис. 3.

В состав функциональной схемы входят:

- приемопередатчик RS-485 K5559ИН28У компании Миландр;

- 32-битный микроконтроллер K1986BE92QI компании Миландр;

- Flash-накопитель 32 Гбайт совместимый с форматом microSDHC;

- кварцевый резонатор 8 МГц;

- кварцевый резонатор часовой частоты 32,768 кГц.

Микроконтроллер, являющийся составной частью регистратора, содержит управляющую микропрограмму, предназначенную для управления регистратором, а также для связи с компьютером вышестоящего уровня с целью передачи результатов измерения и получения команд управления.

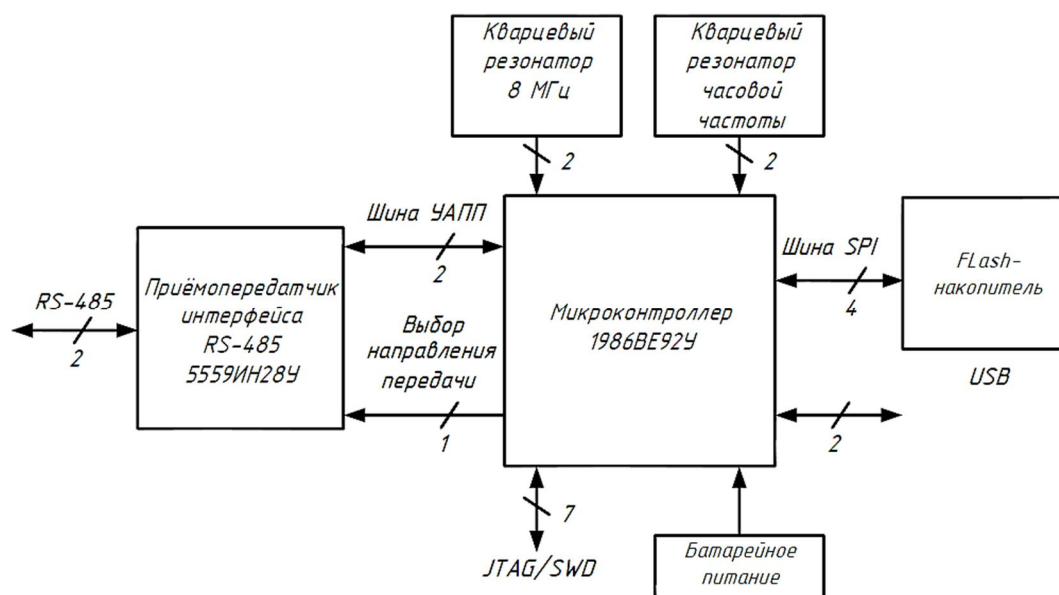


Рис. 3. Функциональная схема разрабатываемого устройства

Fig. 3. Functional diagram of the developed device

Модуль под управлением микропрограммного обеспечения (МПО) должен выполнять следующие функции: реализация протокола информационно-логического обмена по интерфейсу RS-485; реализация обмена по интерфейсу USB 2.0 в режиме MSD и CDC; реали-

зация счетчика собственного времени с бесперебойным питанием; реализация обмена с flash-накопителем по интерфейсу SPI для осуществления записи, чтения и стирания информации на flash-накопителе с объемом до 32 Гбайт. В качестве микроконтроллера, исполня-

ющего МПО, выбран K1986BE92QI, т.к. он имеет встроенный контроллер интерфейса USB с максимальной скоростью передачи информации 12 Мбит/с, что является достаточным для обеспечения доступа к большим объемам данных без предъявления требований к скорости. Взаимодействие с flash-накопителем по интерфейсу SPI для осуществления записи, чтения, стирания информации на flash-накопителе осуществляется через встроенный в 1986BE92U модуль порта синхронной последовательной связи (SSP). Максимальная скорость передачи информации по синхронному последовательному интерфейсу у микроконтроллера K1986BE92QI достигает 25 Мбит/с. Для реализации протокола связи на физическом уровне выбрана микросхема приемопередатчика K5559ИН28У, преимущество которой заключается в полном соответствии стандарту EIA/TIA-485, высокой скорости передачи данных и удобным диапазоном питающего напряжения от 3,0 до 5,5 В. Микроконтроллер 1986BE92U предоставляет возможность организации механизма учета времени внутри кристалла, даже в случае отключения основного источника питания. Блок батарейного домена предназначен для обеспечения функций реального времени и сохранения определенного набора пользовательских данных при выключении основного источника энергии.

Основой устройства является микроконтроллер, входными данными которого являются управляющие команды

согласно протоколу информационно-логического взаимодействия, поступающие по интерфейсу RS-485 (приемный канал UART2, 115200 Бод); управляющие команды, поступающие по интерфейсу USB 2.0. Выходными данными микроконтроллера являются ответные сообщения согласно протоколу информационно-логического взаимодействия, передаваемые по интерфейсу RS-485 (приемный канала UART2, 115200 Бод); ответные сообщения, поступающие по интерфейсу USB 2.0. Механизм отсчета времени в кристалле должен обеспечивать счет времени со стабильностью не хуже  $1 \times 10^{-3}$  с. При снижении основного питающего напряжения в блоке происходит автоматическое переключение питания на батарейное питание.

Для загрузки программы во флэш-память микроконтроллера и для ее последующей отладки требуется использование специализированного программатора-отладчика, в роли которого выступает MT-Link отечественной компании MT-SYSTEM, представленный аналогом известной модели программатора J-Link компании IAR-Systems. MT-Link подключается к компьютеру через USB-кабель и использует интерфейсы для внутрисхемной отладки SWD или JTAG.

В качестве устройства для хранения регистрируемых данных используется SD Memory Card – стандарт карт памяти, разработанный SD Association (SDA) для применения в портативных устройствах. Формат SDHC является эволюцией стандарта SD, наследуя большинство его осо-

бенностей. Максимальный объем памяти карт SDHC увеличен до 32 ГБ. В большинстве случаев для организации хранения данных на них используется файловая система FAT32. Специально для использования в DV-рекордерах, мобильных телефонах и аналогичных устройствах разработаны промышленные карты Transcend microSDHC Class 10, оснащенные фирменными чипами MLC NAND Flash для обеспечения надежности и долговечности.

Далее приведем протокол информационно-логического взаимодействия, описывающий обмен информацией между регистратором и сопрягаемым датчиком измерения физических величин. Подробнее распишем процесс взаимодействия регистратора с датчиком:

1. Обмен осуществляется по интерфейсу RS-485 средствами УАПП.

2. Скорость обмена данными – 115200 Бод; режим работы: – 8 бит данных, без контрольного бита, один стоповый бит.

3. Обмен выполняется сообщениями, упакованными в ASCII-кадры.

4. Структура передаваемых в сообщении данных зависит от кода сообщения.

5. Сообщение, передаваемое от регистратора, содержит адрес датчика, код команды, и данные, которые могут отсутствовать, в ответ датчик посылает сообщение, содержащее код ответного сообщения и данные.

6. Датчик принимает от накопителя кадр и выполняет проверку: формата кадра, его длины, кодировки, контроль-

ной суммы. В случае удачной проверки выделяется сообщение и передается на обработку. При физической ошибке (искажен формат кадра, кодировка или ошибка контрольной суммы) сообщение не выделяется и не передается на обработку. При логической ошибке (кадр принят без искажений, но команда не может быть выполнена), датчик посылает ответное сообщение «Статус выполнения команды».

7. В случае приема датчиком корректного сообщения с командой после отработки команды датчик посылает ответное сообщение.

8. В случае, если ответное сообщение от датчика не содержит данных, а только статус принятия команды на выполнение то отсылается ответное сообщение «Статус выполнения команды» с кодом «Команда принята на выполнение».

9. При получении датчиком команды в момент выполнения предыдущей команды датчик выдает ответное слово с кодом «Датчик занят обработкой команды». В таком случае регистратор должен повторить сообщение позже, когда датчик освободится, выполнение команды датчиком при этом игнорируется.

10. Для проверки связи с датчиком применяется команда «Прочитать версию ПО».

11. Работа регистратора с датчиком должна начинаться с чтения идентификаторов командой «Прочитать идентификатор». Отсутствие полученного идентификатора считается ошибкой. Если идентификатор датчика опознан, то следую-

щей командой должна идти команда «Инициализировать датчик».

12. Для получения измерительных данных от датчика, регистратору необходимо отправить команду «Запуск/останов процесса преобразования» и считать с периодичностью измерительные данные командой «Прочитать измерительные данные».

13. В случае, если необходимо инициализировать датчик и в случае, если датчик находится в процессе преобразования, регистратору необходимо остановить процесс, отправив команду «Запуск/останов процесса преобразования» затем инициализировать датчик в соответствии с п 11 и запустить процесс преобразования в соответствии с п. 12.

Теперь кратко опишем процесс взаимодействия с разработанным прикладным программным обеспечением (ППО), предназначенным для получения результатов измерения и отправки команд управления на микроконтроллер. ППО разработано на основе фреймворка Qt – кроссплатформенного инструментария для создания ППО на языке программирования C++. Данная версия программы разработана на Qt версии 5.12, имеющей возможность работать со встроенной библиотекой ModbusRTU [20], с помощью которой обеспечена работа по протоколу передачи информации между ПЭВМ и микроконтроллером. Программа работает на компьютере под управлением ОС Windows 7 и

выше. Для установки ППО нужно скопировать содержимое с ППО на компьютер в выбранную директорию, после чего следует запустить исполняемый файл GraphReg.exe. При старте ППО откроется главное окно, приведенное на рис. 4 и состоящее из следующих частей: всплывающего меню, расположенного в левом верхнем углу главного окна программы; поля соединения, расположенного под всплывающим меню; поля настройки команд, расположенного под полем соединения в левой части программы; поля отображения данных, расположенного под полем соединения в правой части программы; поля операций, расположенного в нижней части программы под полями настройки команд и отображения данных.

Всплывающее меню состоит из двух элементов «Устройство» и «Настройка». При нажатии на кнопку всплывающего меню «Устройство», отобразятся следующие пункты: «Подключение», при нажатии на которую произойдет попытка соединения с сервером по выбранным в поле соединения типом соединения, портом и адресом сервера; «Разъединение», при нажатии на которую происходит разъединение с текущим соединением (при старте данная кнопка недоступна); «Выход», при нажатии на которую происходит выход из программы.

Пример работы программы приведен на рис. 5.

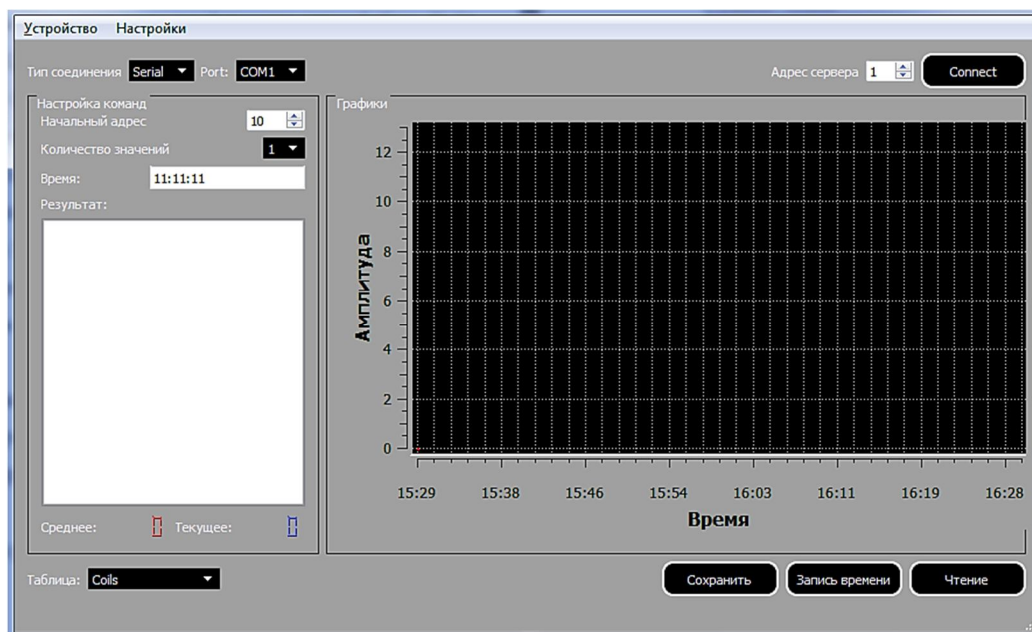


Рис. 4. Главное окно программы

Fig. 4. Main window of the program

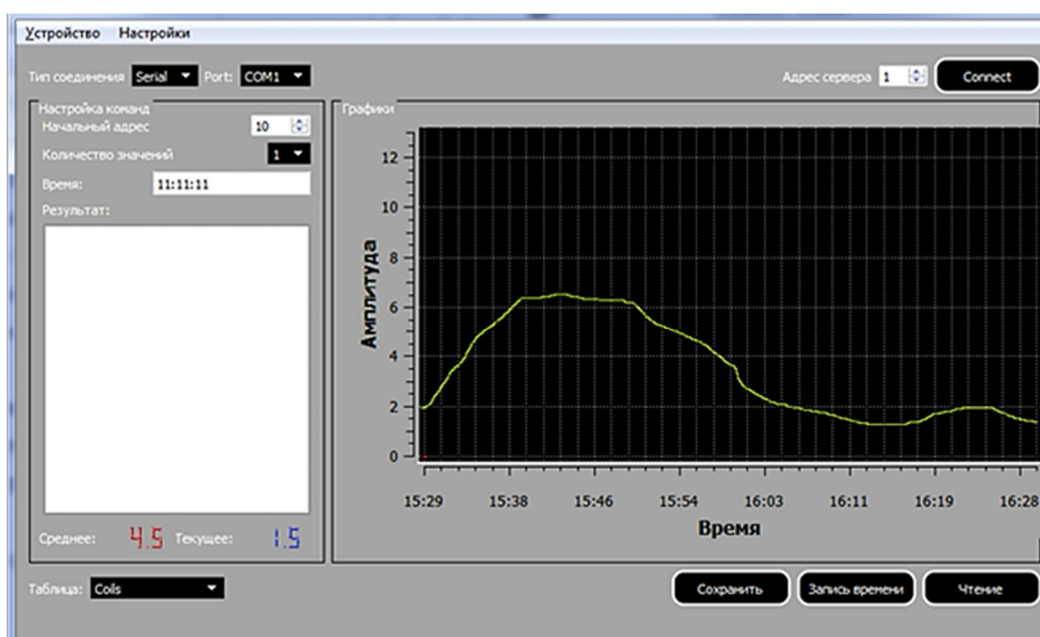


Рис. 5. Пример работы программы

Fig. 5. Example of program work

## Выводы

В данной статье нами предложен вариант реализации цифрового устройства, предназначенного для цифровой регистрации с функцией записи измерительной информации на карту памяти

формата SDHC. Работа устройства состоит в обеспечении регистрации информации, поступающей по каналу RS-485, с сохранением регистрируемой информации в виде файлов на карту памяти формата SDHC.

Доступ к регистрируемой информации производится с персонального компьютера через интерфейс USB 2.0 в режиме запоминающего устройства посредством программного драйвера, реализованного в микроконтроллере отечественного производства 1986BE92Т компании Миландр. Инициализация устройства осуществляется с помощью персонального компьютера, через драйвер

реализующий аппаратный мост USB-UART по стандарту USB 2.0. Разработано текстовое описание встроенного программного обеспечения микроконтроллера на языке Си.

Областью применения устройства являются специализированные вычислительные системы, предназначенные для цифровой регистрации поступающей информации.

### Список литературы

1. Модельно-ориентированное проектирование при разработке встраиваемого программного обеспечения блоков управления в автомобильной промышленности / Е.И. Торопов, А.С. Вашурин, А.В. Тумасов, А.Д. Яржемский // Известия МГТУ МАМИ. 2019. № 3 (41). С. 80-85.
2. Mathematical model of reliability of information processing computer appliances for real-time control systems / A.V. Aab, P.V. Galushin, A.V. Popova, V.A. Terskov // Siberian Journal of Science and Technology. 2020. Vol. 21. № 3. Pp. 296-302.
3. Panarin O., Zacharov I. Monitoring mobile information processing systems // Russian Digital Libraries Journal. 2020. Vol. 23. № 4. Pp. 835-847.
4. Шилдт Герберт. С++: полное руководство: классическое издание: [пер. с англ.]. М.: Диалектика; СПб.: Диалектика, 2020. 796 с.
5. Саммерфилд Марк. Qt. Профессиональное программирование: разработка кроссплатформенных приложений на С++ / пер. с англ. А. Слинкина. СПб., М.: Символ-Плюс, 2018. 560 с.
6. Клеменс Бен. Язык С в XXI веке/ пер. с англ. А. А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2015. 376 с.
7. Лукьянчиков А.В., Нестеренко А.И. Кроссплатформенное программирование доверенных микроконтроллеров 1986BE92 // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2022. № 5. С. 87.
8. Благодаров А.В., Владимиров Л.Л. Программирование микроконтроллеров на основе отечественных микросхем семейства 1986BE9х разработки и производства компании Миландр. М.: Миландр, 2016. 242 с.
9. Васильев А. Е. Встраиваемые системы автоматики и вычислительной техники. Микроконтроллеры. М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 590 с.
10. Мотало Р.В., Брагин А.Н. Импортозамещение на рынке электронных компонентов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 1. С. 27-29.

11. Васенев А.А., Сорокин С.А. Организация внешнего файлового обмена для портативного электронного устройства на базе микроконтроллера // Промышленные АСУ и контроллеры. 2022. № 4. С. 19-26.
12. Кочетков В.В., Зобнин Б.Б. Проблемы и перспективы использования микроконтроллеров в АСУ ТП // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2019. № 11. С. 81-85.
13. Осолинский А.Р., Кочан О.В. Стенд исследования методических погрешностей системы измерения среднего энергопотребления микроконтроллеров // Вестник Брестского государственного технического университета. Физика, математика, информатика. 2015. № 5 (95). С. 6-10.
14. Железняк О.А. Применение микроконтроллеров для измерения параметров системы электроснабжения воздушных судов // Гагаринские чтения-2017: тезисы докладов. М., 2017. С. 942-943.
15. Новая микросхема приемопередатчика для интерфейса RS-485 компании АО "ТКК Миландр" / Д. Колесников, Е. Сухотерин, В. Богданов, Ю. Павлюк, А. Тучин // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2021. № 4 (205). С. 80-87.
16. Тягульская Л.А., Дубинин И.А. Организация двусторонней связи с микроконтроллерами по интерфейсу RS-485 // International Scientific Review. 2016. № 1 (11). С. 34-36.
17. Щербаков А.А. Рекомендации по выбору схемы соединений для сетей на основе RS-485 // Научно-Исследовательский Центр "Science Discovery". 2022. № 11. С. 573-576.
18. Лих В. USB-накопители информации корпоративного и промышленного класса // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2022. № 3 (214). С. 110-113.
19. Субботин Н.Ю., Селиванов К.В. Анализ перспектив применения интерфейса USB // Технологии инженерных и информационных систем. 2021. № 4. С. 60-69.
20. Demchenko V.V., Obukhov P.S., Ivliev E.A. Development of a software and hardware solution for monitoring and control of the greenhouse microclimate by RS-485 bus with MODBUS RTU interface // European Journal of Natural History. 2021. № 6. pp. 66-69.

## References

1. Toropov E.I., Vashurin A.S., Tumasov A.V., Yarzhemskiy A.D. Model'no-orientirovannoe proektirovanie pri razrabotke vstraivaemogo programmno obespecheniya blokov upravleniya v avtomobil'noi promyshlennosti [Model-oriented design in the development of embedded software for control units in the automotive industry]. *Izvestiya MSTU MAMI*. 2019, no. 3 (41), pp. 80-85.
2. Aab A.V., Galushin P.V., Popova A.V., Terskov V.A. Mathematical model of reliability of information processing computer appliances for real-time control systems. *Siberian Journal of Science and Technology*, 2020, vol. 21, no. 3, pp. 296-302.

3. Panarin O., Zacharov I. Monitoring mobile information processing systems. *Russian Digital Libraries Journal*, 2020, vol. 23. no. 4, pp. 835-847.
4. Schildt Herbert. *S++: polnoe rukovodstvo* [C++: complete guide]. Moscow; St. Petersburg, Dialectics Publ., 2020. 796 p.
5. Summerfield Mark. Qt. *Professional'noe programmirovaniye: razrabotka krossplatformennykh prilozhenii na S++*. [Professional programming: development of cross-platform applications in C++]. St. Petersburg; Moscow: Symbol-Plus; 2018. 560 p.
6. Clemens Ben. *Yazyk S v XXI veke* [Language C in the XXI century]. Moscow, DMK Press Publ., 2015. 376 p.
7. Lukyanchikov A.V., Nesterenko A.I. Krossplatformennoe programmirovaniye doverennykh mikrokontrollerov 1986VE92 [Cross-platform programming of trusted microcontrollers 1986BE92]. *Sovremennye problemy radioelektroniki i telekommunikatsii = Modern Problems of Radio Electronics and Telecommunications*, 2022, no. 5, p. 87.
8. Blagodarov A.V., Vladimirov L.L. *Programmirovaniye mikrokontrollerov na osnove otechestvennykh mikroskhem semeistva 1986VE9x razrabotki i proizvodstva kompanii Milandr* [Programming of microcontrollers based on domestic microchips of 1986BE9x family developed and produced by Milandr]. Moscow, Milandr Publ., 2016. 242 p.
9. Vasiliev A. E. *Vstraivaemye sistemy avtomatiki i vychislitel'noi tekhniki. Mikrokontrollery* [Embedded systems of automatics and computer engineering. Microcontrollers]. Moscow, Goryachaya Liniya-Telecom Publ., 2018, 590 p.
10. Motalo R.V., Bragin A.N. Importozameshchenie na rynke elektronnykh komponentov [Import substitution in the market of electronic components]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*, 2023, no. 1, pp. 27-29.
11. Vasenev A.A. Sorokin S.A. Organizatsiya vneshnego failovogo obmena dlya portativnogo elektronnoyego ustroystva na baze mikrokontrollera [Organization of the external file exchange for the portable electronic device based on the microcontroller]. *Promyshlennyye ASU i kontrollery = Industrial ACS and Controllers*, 2022, no. 4, pp. 19-26.
12. Kochetkov V.V. Zobnin B.B. Problemy i perspektivy ispol'zovaniya mikrokontrollerov v ASU TP [Problems and perspectives of microcontrollers use in ACS]. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences*. 2019, no. 11, pp. 81-85.
13. Osolinsky A.R., Kochan O.V. Stend issledovaniya metodicheskikh pogreshnostei sistemy izmereniya srednego energopotrebleniya mikrokontrollerov [Research bench of the methodical errors of the system for measuring the average power consumption of the microcontrollers]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Fizika, matematika, informatika = Vestnik of Brest State Technical University. Physics, Mathematics, Informatics*, 2015, no. 5 (95), pp. 6-10.

14. Zheleznyak O.A. [Application of microcontrollers for measuring parameters of aircraft power supply system]. *Gagarinskie chteniya 2017. Tezisy dokladov* [Gagarin readings 2017. Theses of reports]. Moscow, 2017, pp. 942-943 (In Russ.).
15. Kolesnikov D., Sukhoterlin E., Bogdanov V., Pavlyuk Y., Tuchin A.. Novaya mikro-skhem priemopredatchika dlya interfeisa RS-485 kompanii AO "PKK Milandr" [New transceiver chip for RS-485 interface of the company "PKK Milandr"]. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes = JSC. Electronics: Science, Technology, Business*, 2021, no. 4 (205), pp. 80-87.
16. Tyagulskaya L.A., Dubinin I.A. Organizatsiya dvustoronnei svyazi s mikro-kontrollerami po interfeisu RS-485 [Organization of two-way communication with micro-controllers via RS-485 interface]. *International Scientific Review*, 2016, no. 1 (11), pp. 34-36.
17. Scherbakov A.A. Rekomendatsii po vyboru skhemy soedinenii dlya setei na osnove RS-485 [Recommendations on the connection scheme selection for the RS-485-based networks]. *Nauchno-Issledovatel'skii Tsentr "Science Discovery" = Scientific Research Center "Science Discovery"*, 2022, no. 11, pp. 573-576.
18. Lih V. USB-nakopiteli informatsii korporativnogo i industrial'nogo klassa [USB information storage devices of corporate and industrial class]. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*, 2022, no. 3 (214), pp. 110-113.
19. Subbotin N.Yu., Selivanov K.V. Analiz perspektiv primeneniya interfeisa USB [Analysis of the USB interface application perspectives]. *Tekhnologii inzhenernykh i informatsionnykh sistem = Engineering and Information Systems Technologies*, 2021, no. 4, pp. 60-69.
20. Demchenko V.V., Obukhov P.S., Ivliev E.A. Development of a software and hardware solution for monitoring and control of the greenhouse microclimate by RS-485 bus with MODBUS RTU interface. *European Journal of Natural History*, 2021, no. 6, pp. 66-69.

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Мартышкин Алексей Иванович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Программирование», Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: mai@penzgtu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3358-4394>)

**Alexey I. Martyshkin**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of Software Department, Penza State Technological University, Penza, Russian Federation, e-mail: mai@penzgtu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3358-4394>)

**Данилов Евгений Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Программирование», Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: danilov@penzgtu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4114-7036>

**Evgeniy A. Danilov**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of Software Department, Penza State Technological University, Penza, Russian Federation, e-mail: danilov@penzgtu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4114-7036>

## 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 ( $\Omega$ ,  $\eta$ ,  $\beta$ ,  $\mu$ ,  $\omega$ ,  $\nu$  и др.) в формулах должны быть набраны прямым шрифтом. Обозначения тригонометрических функций ( $\sin$ ,  $\cos$ ,  $\tg$  и т.д.) – прямым шрифтом. Латинские буквы – прямым шрифтом.

Статья должна содержать лишь самые необходимые формулы, от промежуточных выкладок желательно отказаться.

10. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

11. Рисунки и таблицы располагаются по тексту. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Иллюстрации, встраиваемые в текст, должны быть выполнены в одном из стандартных форматов (TIFF, JPEG, PNG) с разрешением не ниже 300 dpi и публикуются в черно-белом (градации серого) варианте. Качество рисунков должно обеспечивать возможность их полиграфического воспроизведения без дополнительной обработки. **Рисунки, выполненные в MS Word, недопустимы.**

Рисунки встраиваются в текст через опцию «Вставка-Рисунок-Из файла» с обтеканием «В тексте» с выравниванием по центру страницы без абзацного отступа. Иные технологии вставки и обтекания **не допускаются.**

12. **Список литературы к статье обязателен** и должен содержать все цитируемые и упоминаемые в тексте работы (не менее 10). Пристатейные библиографические списки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». Ссылки на работы, находящиеся в печати, не допускаются. При ссылке на литературный источник в тексте приводится порядковый номер работы в квадратных скобках.

13. В материале для публикации следует использовать только общепринятые сокращения.

Все материалы направлять по адресу: 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>.