

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

# **Известия**

**Юго-Западного  
государственного  
университета**

**Научный журнал**

Том 25 № 1 / 2021

---

# **Proceedings**

**of the Southwest  
State University**

**Scientific Journal**

Vol. 25 № 1 / 2021



**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: 05.02.05; 05.02.07; 05.02.10.

Строительство: 05.23.01; 05.23.03; 05.23.17.

Информатика, вычислительная техника и управление: 05.13.01; 05.13.05; 05.13.06; 05.13.10; 05.13.18; 05.13.19.

**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:**

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

**ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:**

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

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

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

**Алексеев Юрий Владимирович**, д-р архитектуры, профессор; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (г. Москва, Россия);

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

**Бок Томас**, д-р техн. наук, профессор, Мюнхенский технический университет (г.Мюнхен, Германия);

**Бьянко Лино**, д-р философии (PhD), профессор международной академии архитектуры, профессор Университета архитектуры, строительства и геодезии (г. София, Болгария), старший преподаватель Университета Мальты (Мальта);

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

**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);

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

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

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

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

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

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

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

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

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

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

**Зотов Игорь Валерьевич**, д-р техн. наук, профессор,  
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);

**Шах Райнер**, д-р техн. наук, профессор, Дрезденский  
технический университет (г.Дрезден, Германия).

### 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).

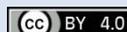
ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

Префикс DOI:10.21869

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

© Юго-Западный государственный университет, 2021



Материалы журнала доступны  
под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

### Типография:

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

### Подписка и распространение:

журнал распространяется  
по подписке.

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

**Периодичность:** четыре выпуска в год

### Свободная цена

Оригинал-макет подготовлен Е.В. Мельник

Подписано в печать 31.03.2021.

Дата выхода в свет 28.04.2021. Формат 60x84/8.

Бумага офсетная. Усл.печ.л. 20,9.

Тираж 1000 экз. Заказ 9.

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: 05.02.05; 05.02.07; 05.02.10.

Construction: 05.23.01; 05.23.03; 05.23.17.

Computer science, computer engineering and control: 05.13.01; 05.13.05; 05.13.06; 05.13.10; 05.13.18; 05.13.19.

## EDITOR-IN-CHIEF

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

## DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

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

## EDITORIAL BOARD

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

**Yurii V. Alekseev**, Dr. of Sci. (Architecture), Professor, Moscow State National Research University of Civil Engineering (Moscow, Russia);

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

**Thomas Bock**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Technical University of Munich (Munich, Germany);

**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);

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Igor V. Zotov**, 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);

**Shah R.**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor,  
Technical University of Dresden (Dresden, Germany)

**Founder and Publisher:**  
"Southwest State University"

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

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

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

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

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

**The Journal is officially registered by:**

The Federal Supervising Authority in the Field of Communication,  
Information Technology and Mass media  
(ПИ №ФС77-42691 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, 2021



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

Singed to print 31.03.2021.  
Release date 28.04.2021. Format 60x84/8.  
Offset paper. Printer's sheets 20,9.  
Circulation 1000 copies. Order 9.

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<b>Экспериментальные исследования физико-механических характеристик мелиоративных трубопроводов из композитных материалов .....</b>	<b>8</b>
<i>Новиков С.Г., Малыхин В.В., Будылина М.Д.</i>	
<b>Модель изнашивания трущихся шероховатых поверхностей.....</b>	<b>25</b>
<i>Горленко А.О., Агеев Е.В.</i>	

### СТРОИТЕЛЬСТВО

<b>Математическая модель для автоматизированного управления тепловыми потоками энергоэффективной системы вентиляции .....</b>	<b>38</b>
<i>Ежов В. С., Семичева Н. Е., Тютюнов Д. Н., Бурцев А. П., Перепелица Н. С., Бурцев А. П.</i>	
<b>Исследование степени интенсификации коэффициента массообмена теплоносителя в вихревом теплообменном аппарате системы отопления газорегуляторного пункта.....</b>	<b>53</b>
<i>Григорова Н.П., Монастырев П.В., Пахомова Е.Г., Семичева Н.Е.</i>	

### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<b>Использование спектральных ландшафтных индексов для детектирования препятствий в задачах навигации мобильных робототехнических платформ на сельскохозяйственных территориях .....</b>	<b>66</b>
<i>Астапова М.А., Аксаментов Е.А.</i>	
<b>Применение многозадачного глубокого обучения в задаче распознавания эмоций в речи.....</b>	<b>82</b>
<i>Рябинов А.В., Уздяев М.Ю., Ватаманюк И.В.</i>	
<b>Метод измерения влажности пиломатериала, реализуемый на ПЛК .....</b>	<b>110</b>
<i>Нгуен В. В., Шилин А. А., Момот П. М.</i>	
<b>Распознавание символьной информации для автоматизации производственных процессов .....</b>	<b>122</b>
<i>Панищев В. С., Труфанов М. И., Добросердов О. Г., Хомяков О. О.</i>	
<b>Синтез и параметризация моделей газочувствительных датчиков .....</b>	<b>138</b>
<i>Бондарь О.Г., Брежнева Е.О., Добросердов О. Г., Андреев К.Г., Поляков Н.В.</i>	
<b>Автоматизированный подбор руководителей образовательных проектов на основе генетических алгоритмов .....</b>	<b>162</b>
<i>Ковшов Е. Е., Кувшинников В. С., Осипенко Л. Е.</i>	

## CONTENT

### MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original articles

<b>Experimental Research of Physical and Mechanical Characteristics of Reclamation Pipelines Made of Composite Materials .....</b>	<b>8</b>
<i>Novikov S. G., Malykhin V. V., Budylna M. D.</i>	
<b>Wear Model of Sliding Rough Surfaces .....</b>	<b>25</b>
<i>Gorlenko A. O., Ageev E. V.</i>	

### CONSTRUCTION

Original articles

<b>A Mathematical Model for Automated Heat Flow Control of an Energy-Efficient Ventilation System.....</b>	<b>38</b>
<i>Yezhov V. S., Semicheva N. E., Tyutyunov D. N., Burtsev A. P., Perepelitsa N. S., Burtsev A. P.</i>	
<b>Investigation of the Degree of Augmentation of the Mass Transfer Coefficient of the Heat Transfer Medium in a Vortex Heat Exchanger of a Gas Pressure Regulating and Metering Station Heating System .....</b>	<b>53</b>
<i>Grigiriva N. P., Monastyrev P. V., Pakhomova E. G., Semicheva N. E.</i>	

### COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Original articles

<b>Use of Spectral Landscape Indices for Obstacle Detection in the Tasks of Mobile Robotic Platforms Navigation in Agricultural Areas .....</b>	<b>66</b>
<i>Astapova M. A., Aksamentov E. A.</i>	
<b>Applying Multitask Deep Learning to Emotion Recognition in Speech.....</b>	<b>82</b>
<i>Ryabinov A. V., Uzdiaev M. Yu., Vatamaniuk I. V.</i>	
<b>PLC-based lumber humidity measurement method .....</b>	<b>110</b>
<i>Nguyen V. V., Shilin A. A., Momot P. M.</i>	
<b>Recognition of Character Information for Automation of Production Processes .....</b>	<b>123</b>
<i>Panishchev V. S., Trufanov M. I., Dobroserdov O. G., Khomyakov O. O.</i>	
<b>Synthesis and Parameterization of Gas Sensor Models .....</b>	<b>138</b>
<i>Bondar O. G., Brezhneva E. O., Dobroserdov O. G., Andreev K. G., Polyakov N. V.</i>	
<b>Automated Leadership Selection Educational Projects Based on Genetic Algorithms.....</b>	<b>162</b>
<i>Kovshov E. E., Kuvshinnikov V. S., Osipenko L. E.</i>	

### Экспериментальные исследования физико-механических характеристик мелиоративных трубопроводов из композитных материалов

С.Г. Новиков <sup>1</sup>, В.В. Малыхин <sup>2</sup> ✉, М.Д. Будылина <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Региональный открытый социальный институт  
ул. Маяковского 85, г. Курск 305009, Российская Федерация

<sup>2</sup> Юго-Западный государственный университет  
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

<sup>3</sup> Курский государственный университет  
ул. Радищева 33, г. Курск 305000, Российская Федерация

✉ e-mail: malykhin1946@mail.ru

#### Резюме

**Цель исследования.** Совершенствование способов и техники поливов является важнейшей задачей орошаемого земледелия. В нашей стране и за рубежом значительная часть площадей орошается поверхностным поливом по бороздам, полосам и чекам, который наиболее приемлем при имеющем место резком удорожании энергоносителей. Все большее внимание уделяется внедрению средств механизации и автоматизации поверхностных поливов, а также разработке различных эффективных способов распределения воды по полю и сокращению ее потерь. Это с успехом достигается за счет использования на поливе гибких плоскостворачиваемых трубопроводов. Для увеличения производительности полива, повышения качества и надежности целесообразно применять конструкции с упрочненным швом или бесшовные плоскостворачиваемые трубопроводы. Целью и задачами работы являются: совершенствование поверхностных способов полива с использованием гибких мелиоративных трубопроводов, повышающих производительность полива и обеспечивающих эффективность распределения воды по полю; получение экспериментальных характеристик трубопроводов.

**Методы.** Согласно предъявляемым техническим требованиям и условиям эксплуатации были проведены различные физико-механические испытания тканевых каркасов, полимерных пленочных покрытий, наносимых на каркас, и трубопроводов с этими покрытиями. Эксперименты проведены по стандартным методикам, а также на разработанной специальной установке.

**Результаты.** Проведенные эксперименты подтвердили соответствие плоскостворачиваемых трубопроводов предъявленным техническим требованиям.

**Заключение.** Разработанные бесшовные и с усиленным технологическим швом плоскостворачиваемые трубопроводы имеют повышенные прочностные и эксплуатационные характеристики, что позволяет совершенствовать поверхностные способы полива и обеспечивают эффективность распределения воды по полю.

**Ключевые слова:** плоскостворачиваемый тканевый каркас; полимерные покрытия; орошение; водные ресурсы; физико-механические характеристики.

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

**Для цитирования:** Новиков С.Г., Малыхин В.В., Будылина М.Д. Экспериментальные исследования физико-механических характеристик мелиоративных трубопроводов из композитных материалов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(1): 8-24. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-8-24>.

Поступила в редакцию 27.10.2020

Подписана в печать 07.12.2020

Опубликована 31.03.2021

## Experimental Research of Physical and Mechanical Characteristics of Reclamation Pipelines Made of Composite Materials

Sergey G. Novikov <sup>1</sup>, Vitaly V. Malykhin <sup>2</sup> ✉, Marina D. Budylna <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Regional Open Social Institute  
85 Mayakovskogo str., Kursk 305009, Russian Federation

<sup>2</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

<sup>3</sup> Kursk State University  
33 Radishcheva str., Kursk 305000, Russian Federation

✉ e-mail: malykhin1946@mail.ru

### Abstract

**Purpose of research.** Improving irrigation methods and techniques is the most important task of irrigated agriculture. In our country and abroad, a significant part of the area is watered by surface irrigation along furrows, strips and checks, which is most acceptable in the case of a sharp increase in the cost of energy carriers. More and more attention is being paid to the introduction of mechanical aids and automation of surface irrigation, as well as the development of various effective ways to distribute water across the field and reduce its losses. This is successfully achieved by using flexible lay-flat pipelines for irrigation. To increase irrigation productivity, improve quality and reliability, it is advisable to use structures with a reinforced seam or seamless lay-flat pipelines. The goal and objectives of the paper are the following ones: improving surface irrigation methods through the use of flexible reclamation pipelines that increase irrigation productivity and ensure efficient water distribution across the field; obtaining experimental characteristics of pipelines.

**Methods.** According to the technical requirements and operating conditions, various physical and mechanical tests of fabric frames, polymer film coatings applied to the frame and pipelines with these coatings have been carried out. The experiments have been performed according to standard methods, as well as on a developed special installation.

**Results.** The undertaken experiments confirmed the compliance of lay-flat pipelines with the technical requirements.

**Conclusion.** The developed seamless and reinforced technological seam lay-flat pipelines have increased strength and performance characteristics, which allows you to improve surface irrigation methods and ensure the efficiency of water distribution across the field.

**Keywords:** lay-flat fabric frame; polymer coatings; irrigation; water.

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

**For citation:** Novikov S. G., Malykhin V. V., Budylna M. D. Experimental Research of Physical and Mechanical Characteristics of Reclamation Pipelines Made of Composite Materials. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(1): 8-24 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-8-24>.

Received 27.10.2020

Accepted 07.12.2020

Published 31.03.2021

\*\*\*

## Введение

В России водные ресурсы распределены крайне неравномерно по ее территории и их дефицит особенно ощущается в маловодные годы, каким является 2020 г. в бассейнах Дона, Кубани, Волги, Терека. За последние 20 лет (с 2000 по 2019 гг.) объем водопотребления в РФ на орошения, обводнения пастбищ, сельскохозяйственное водоснабжение, реабилитацию малых рек снизился с 12,6 млрд. м<sup>3</sup> до 7,2 млрд. м<sup>3</sup> (на 42,9%).

На современном этапе развития существенно возросли требования рационального природопользования к технике и технологиям, которые должны быть в первую очередь ресурсосберегающими и экологически безопасными.

В нашей стране и за рубежом значительная часть площадей орошается поверхностным поливом по бороздам, полосам и чекам.

Поверхностный полив наиболее приемлем, так как имеет место резкое удорожание энергоносителей в нашей стране.

Однако этот способ полива характеризуется неравномерностью распределения оросительной воды между бороздами, большими потерями на филь-

трацию и поверхностный сброс, слабо механизирован.

Указанные недостатки могут быть значительно минимизированы за счет разработки различных эффективных способов распределения воды по полю и сокращению ее потерь, внедрения средств механизации. Это с успехом достигается за счет использования на поливе гибких плоскосворачиваемых трубопроводов.

В области использования гибких мелиоративных трубопроводов основной фактор интенсификации – дальнейшее улучшение их качества, увеличение ресурса работоспособности, снижение массы и повышение других технико-экономических характеристик.

На поверхностном поливе в настоящее время широко применяют гибкие плоскосворачиваемые трубопроводы, изготавливаемые из мелиоративного материала путем его продольной склейки внахлест. Качество этих трубопроводов определяется, прежде всего, прочностью клеевого шва, которая невелика, что не позволяет создавать повышенные напоры, определяющие производительность полива.

Использование такой конструкции поливного трубопровода не в полной

мере отвечает требованиям механизированного полива, не позволяет повышать производительность шланговых поливальщиков, приводит к перерасходу мелиоративного материала на образование шва, уменьшает сроки эксплуатации трубопроводов, увеличивает затраты на их ремонт. Велики потери от размыва поливаемых площадей при разрушении шва, особенно при ночных поливах.

Для повышения качества и надежности трубопроводов, увеличения производительности и эффективности полива целесообразно применять трубопроводы шовной конструкции с более прочным швом или (что более перспективно) бесшовные плоскосворачиваемые трубопроводы, обладающие повышенной прочностью. Они состоят из бесшовного тканевого каркаса (цилиндрическая оболочка), на внешнюю и внутреннюю поверхность которого наносятся покрытия из полимерных материалов. Однако до сих пор бесшовные трубопроводы изготавливались небольшими опытными партиями, не организовано их серийное производство. Недостаточно исследованы их физико-механические и эксплуатационные характеристики.

Целью и задачами работы являются:

– совершенствование поверхностного способа полива с помощью новых конструкций гибких плоскосворачиваемых трубопроводов, обладающих повышенной прочностью и обеспечиваю-

щих эффективность распределения воды по полю;

– получение экспериментальных физико-механических и эксплуатационных характеристик трубопроводов<sup>1</sup>.

## Материалы и методы

Согласно предъявляемым техническим требованиям и условиям эксплуатации, были проведены различные физико-механические испытания тканевых каркасов, полимерных плёночных покрытий, наносимых на каркас, и трубопроводов с этими герметизирующими и защитными покрытиями.

Массы  $1\text{ м}^2$ , плотности нитей по основе и утку, прочностные и деформационные характеристики тканевых каркасов и гибких трубопроводов при кратковременном нагружении материалов определены по стандартным методикам на полосках тканей и трубопроводов по основе и утку размером  $50 \times 200$  мм на испытательной машине FM 1000<sup>2</sup>.

Образцы закреплялись в верхнем и нижнем зажимах прибора, затем начинали растягиваться с постоянной скоростью. При этом фиксировались растягивающие усилия и соответствующие им деформации, что дало возможность построить диаграммы нагрузка – относи-

<sup>1</sup> Новиков С.Г. Разработка гибких мелиоративных трубопроводов из полимерных материалов для поверхностного полива: дис...канд. техн. наук: 06.01.02. Курск, 1992. 286 с.

<sup>2</sup> ГОСТ 3810-72 и др. Ткани и штучные изделия текстильные. Методы испытаний: сборник. М.: Изд-во стандартов, 1982. 22с. Содерж.: ГОСТ 3810-72-ГОСТ 3813-72.

тельная деформация и проанализировать полученные результаты. Определены средние арифметические величины после испытания не менее трёх образцов.

На основании теоретических прочностных исследований были подобраны армирующие ткани гибких трубопроводов [1-3].

Для изготовления бесшовного каркаса (поставлен ГСКБ по ирригации г. Ташкент) применялась ткань с основой и утком из капроновых нитей № 34,5/2 в два конца, переплетение нитей полотняное.

Армирующим материалом усиленных шовных трубопроводов являлась ткань ТК-100.

При изготовлении бесшовных поливных трубопроводов использовались каркасы как непропитанные, так и пропитанные специальными латексно-резорцинформальдегидными составами на основе латекса ДМВП-10Х.

Предварительная пропитка осуществлялась с целью исследования адгезионных свойств герметизирующего покрытия к капроновому каркасу. Для улучшения адгезии была пропитана этими же составами и ткань ТК-100. Проведены исследования влияния предварительной пропитки на упругопрочностные характеристики тканей каркасов гибких трубопроводов.

Физико-механическим испытаниям подвергались усиленный шовный и бесшовные трубопроводы с полимерными покрытиями следующих видов:

– одностороннее эмульсионное покрытие на основе водных полиуретанов;

– одностороннее покрытие на основе органических полиуретанов;

– одностороннее латексное покрытие;

– двустороннее латексное покрытие и внешнее защитное из полиуретанового лака;

– двустороннее латексное покрытие и внешнее защитное на основе водных полиуретанов (каркас предварительно пропитан латексно-формальдегидными составами).

Герметизирующие покрытия были нанесены различными способами по специально разработанным технологиям на бесшовный капроновый каркас.

Ткань ТК—100 усиленного шовного трубопровода обрешинена с двух сторон [4-6].

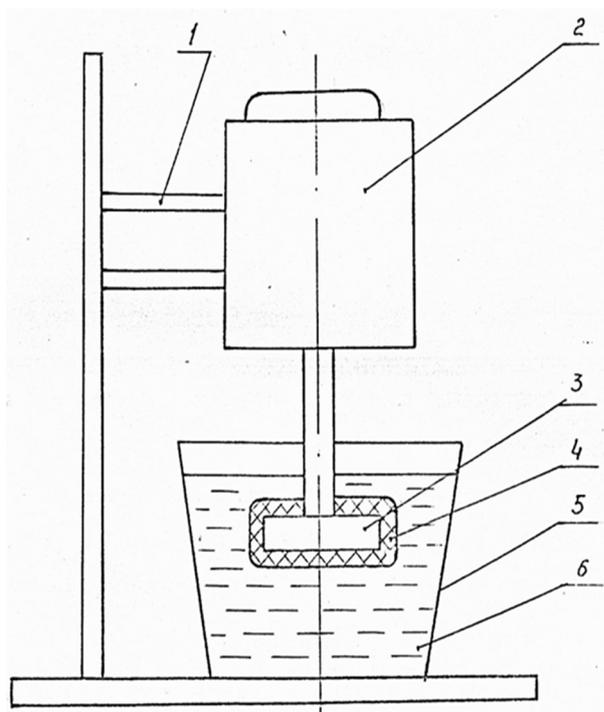
Эксперименты по получению различных физико-механических характеристик полимерных покрытий каркасов проводились по стандартным методикам на поверенных приборах<sup>1</sup> [7].

Эксперименты по исследованию износостойкости латексного покрытия проводились по разработанной нами методике на специальном стенде (рис.1). Стенд состоял из кронштейна 1, на котором был укреплен электродвигатель 2. К валу электродвигателя крепился диск 3,

---

<sup>1</sup> ГОСТ 8978-75. Кожа искусственная и плёночные материалы. Методы определения устойчивости к многократному изгибу. М.: Изд-во стандартов, 1975. 8 с.; ГОСТ 8977-74. Кожа искусственная и плёночные материалы. Методы определения жёсткости и упругости. М.: Изд-во стандартов, 1985. 9 с.

который покрывался слоем латексной плёнки 4 (к диску 3 может наклеиваться и материал трубопровода).



**Рис. 1.** Стенд для исследования износоустойчивости латексной пленки; 1 – кронштейн; 2 – электрический двигатель; 3 – стальной диск; 4 – латексная пленка; 5 – сосуд; 6 – абразивная среда

**Fig. 1.** Stand for the study of the wear resistance of latex film: 1 – bracket; 2 – electric motor; 3 – steel disc; 4 – latex film; 5 – vessel; 6 – abrasive medium

Испытуемый образец 4 помещался в сосуд 5, наполненный модельной абразивной средой. Испытуемый образец имел диаметр 189,7 мм. Модельная абразивная среда содержала воду с добавлением 1% дизельного топлива, серную кислоту или щёлочь, неокатанный песок. Размеры частиц песка составляли 1–2,5 мм и 5% по объёму. Через каждые 10 часов пульпу заменяли, чтобы исключить влияние окатывания песка.

Интенсивность износа оценивалась величиной, характеризующей в наших опытах скорость износа

$$J = \frac{\Delta M}{St\rho'}$$

где  $J$  – скорость износа, м/с;

$S$  – площадь контакта образца и модельной абразивной среды, м<sup>2</sup>;

$\rho$  – плотность латексной плёнки, кг/м<sup>3</sup>;

$t$  – время износа, с.

В опытах износ образца проводился в течение 100 часов.

Особенностью экспериментальной установки является то, что абразивный износ изучается при круговом движении испытуемых образцов под слоем воды со взвешенными частицами песка, находящимися в сосуде небольшого размера. Вследствие чего отпадает необходимость в создании циркуляционного тракта с насосом, трубопроводами, баками, бункерами и другими громоздкими устройствами.

Скорость вращения диска выбрана с учётом предупреждения вращения испытуемых образцов и смеси с одной и той же угловой скоростью или очень беспорядочного состояния смеси во всём объёме сосуда. Скорость вращения диска такова, что относительная скорость латексной плёнки и абразивной среды соответствует средним скоростям движения воды в трубопроводах при их эксплуатации<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> ГОСТ 270-75 (СТ СЭВ 2594-80). Резина. Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении. М.: Изд-во стандартов, 1982. 7 с.

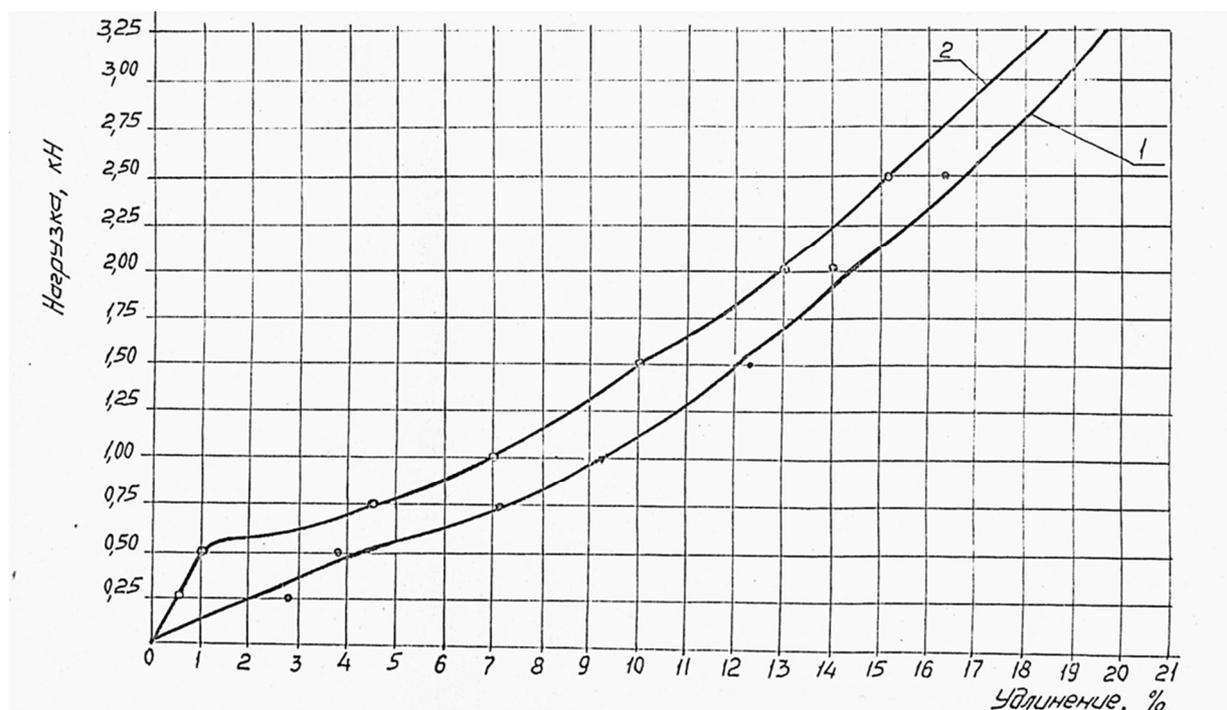
## Результаты и их обсуждение

Диаграммы усилие-деформация тканевых каркасов представлены на рис. 2-5.

Анализ показал, что пропитка незначительно улучшает упругопрочностные характеристики ткани по основе и существенно снижает их по утку. Это объясняется тем, что при осуществлении процесса пропитки происходит вытяжка ткани по основе и усадка её по утку. Увеличение длины пропитанной ткани происходит из-за того, что вытяжка идёт в основном за счет остаточного удлинения ткани; заполнение же ткани латексно-резорцинформальдегидной смесью механически препятствует возврату упругих растяжений [8].

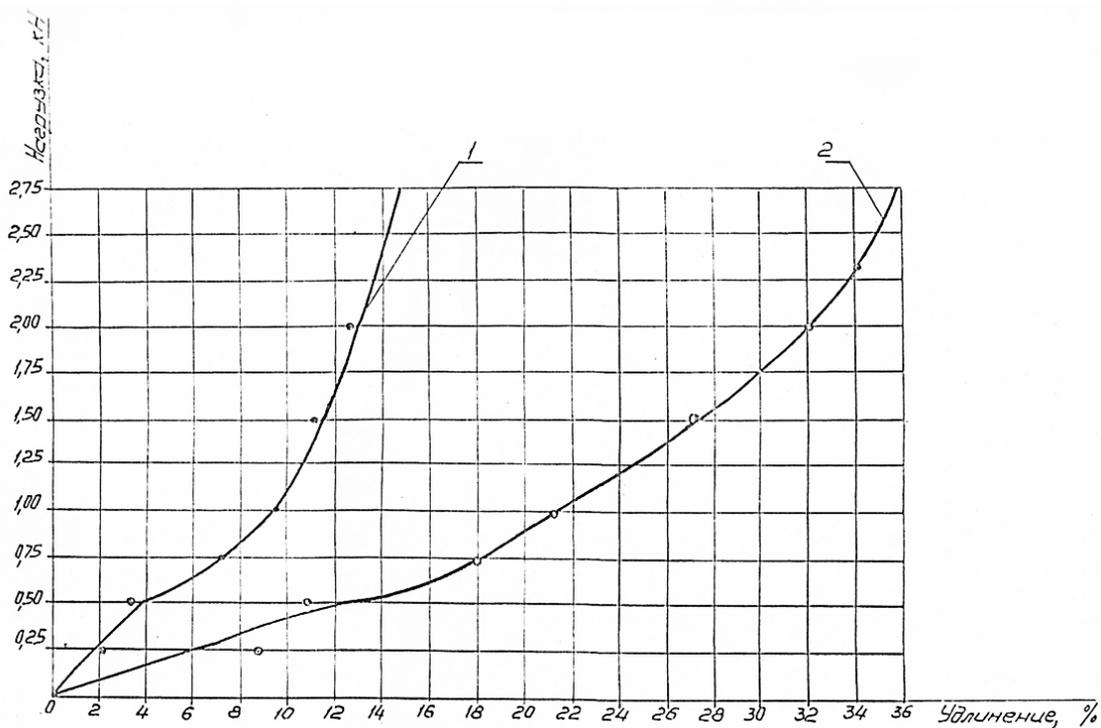
Пропитка увеличивает массу каркасов и их жёсткость.

При изготовлении трубопроводов следует, анализируя их деформационно-прочностные характеристики и прочность связи герметизирующего покрытия с тканевым каркасом, по возможности, избегать предварительную пропитку ткани каркаса или же предусматривать вопрос уменьшения усадки материала. Это достигается, например, термообработкой каркаса горячим воздухом под натяжением или замочкой в горячей воде с последующим отжимом. Термообработка под натяжением каркасов перед пропиткой позволит стабилизировать размеры трубопроводов в процессе их изготовления и при дальнейшей эксплуатации [9].



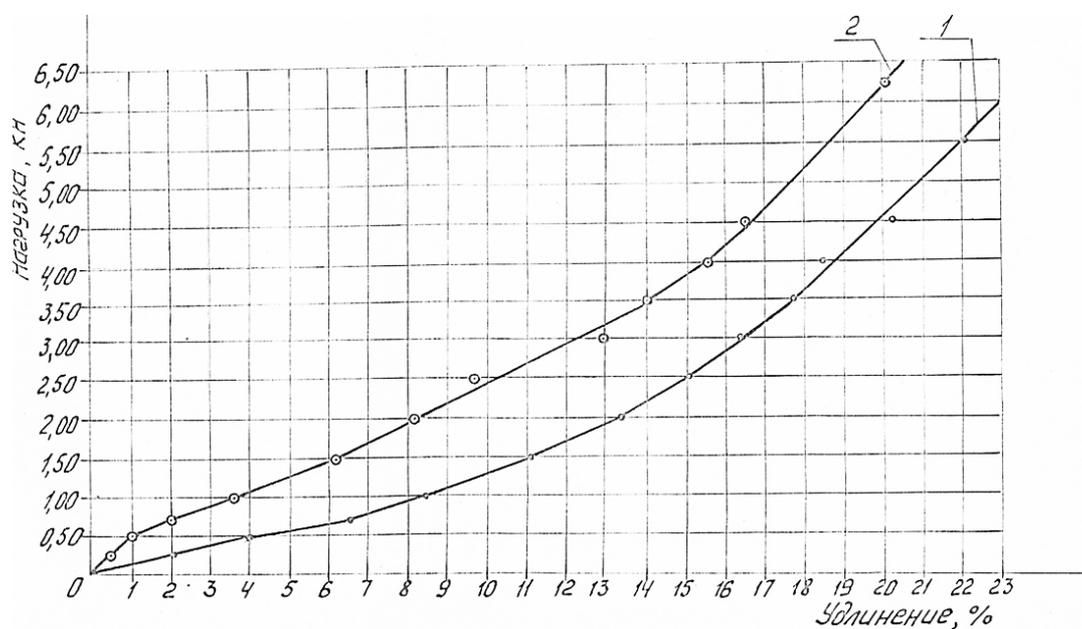
**Рис. 2.** Прочностные характеристики ткани бесшовного каркаса по основе (полоска 50×200 мм):  
1 – суровьё; 2 – пропитанная ткань

**Fig. 2.** Strength characteristics of seamless carcass fabric base (strip 50 × 200 mm): 1 – severity;  
2 – impregnated fabric



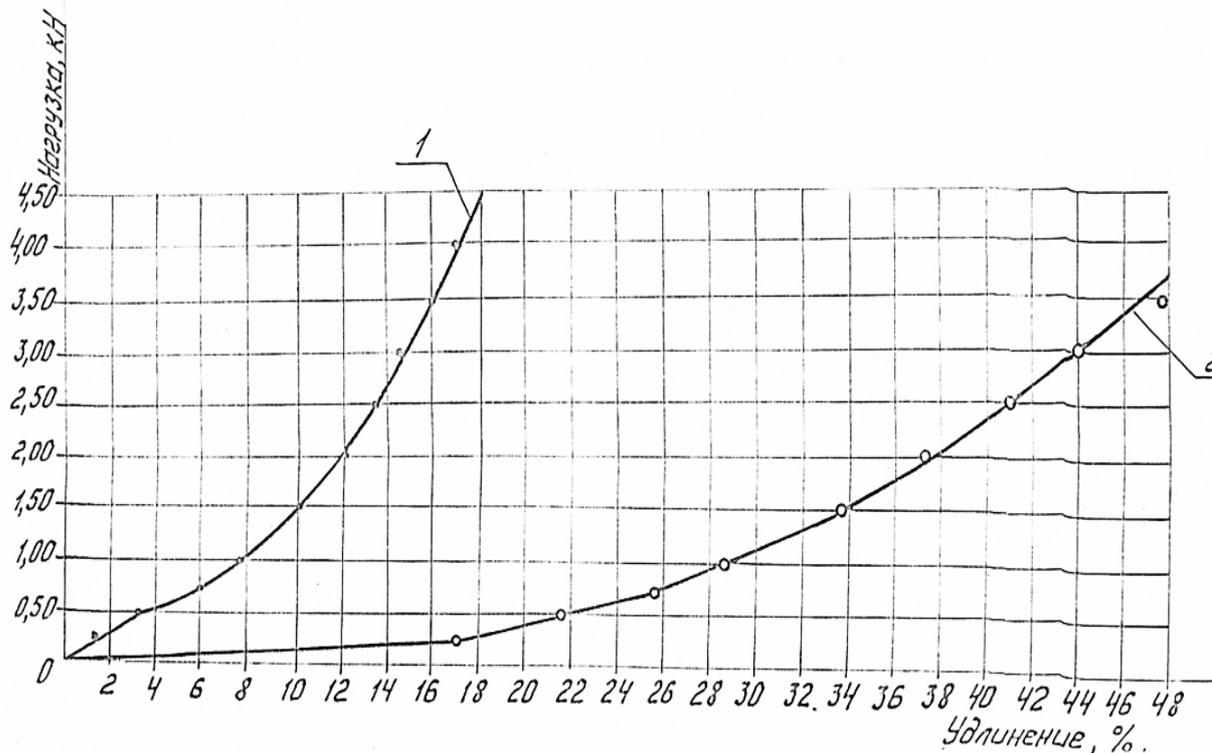
**Рис. 3.** Прочностные характеристики ткани бесшовного каркаса по утку (полоска 50×200 мм):  
1 – суровьё; 2 – пропитанная ткань

**Fig. 3.** Strength characteristics of the fabric of the seamless weft frame (strip 50 × 200 mm):  
1 – severity; 2 – impregnated fabric



**Рис. 4.** Прочностные характеристики ткани ТК-100 по основе (полоска 50×200 мм):  
1 – суровьё; 2 – пропитанная ткань

**Fig. 4.** Strength characteristics of TK-100 fabric on the basis (strip 50×200 mm):  
1 – severity; 2 – impregnated fabric



**Рис. 5.** Прочностные характеристики ткани ТК-100 по утку (полоска 50×200 мм):

1 – суровьё; 2 – пропитанная ткань

**Fig. 5.** Strength characteristics of TK-100 fabric on weft (strip 50 × 200 mm):

1 – severity; 2 – impregnated fabric

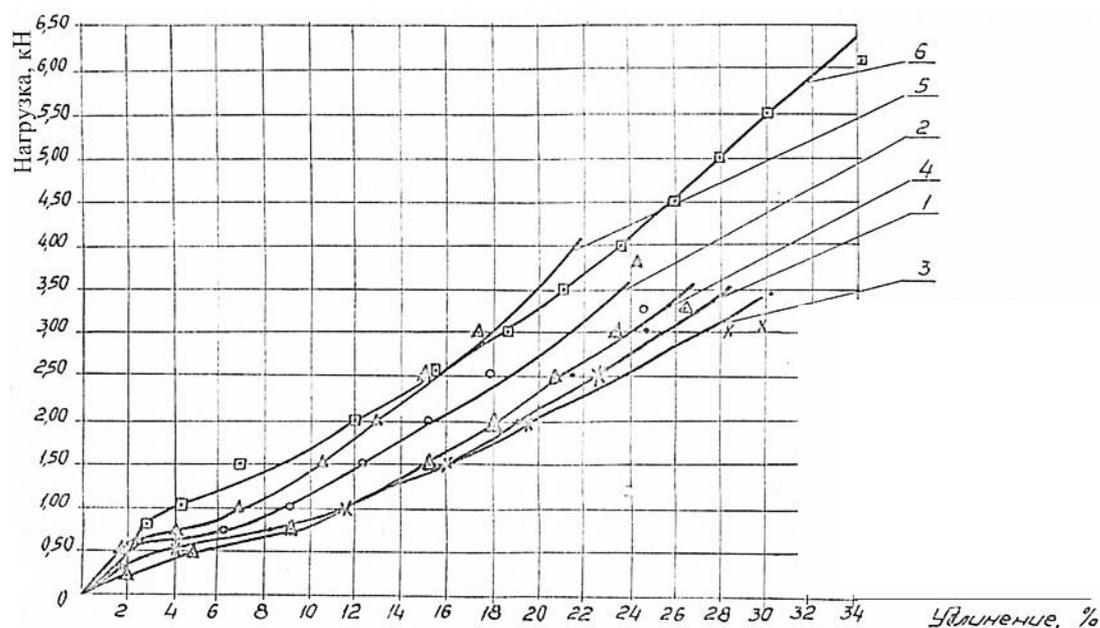
Прочностные характеристики по утку существующей мелиоративной ткани для изготовления серийных шовных трубопроводов значительно ниже характеристик тканей, которые были использованы для изготовления каркасов, рассчитанных на избыточное давление до 0,1МПа. Упомянутая мелиоративная ткань не может быть применена для производства гибких бесшовных трубопроводов к поливной машине ППА-165УМ.

При выборе ткани для изготовления бесшовных каркасов плосковорачиваемых трубопроводов предпочтение должно отдаваться более лёгким и равнопрочным тканям по основе и утку.

Для изготовления бесшовных каркасов рекомендуется применять ткань, разработанную ГСКБ по ирригации.

Упругопрочностные зависимости приведены на рис. 6 и рис. 7.

Анализ экспериментальных данных подтверждает, что деформации трубопроводов по основе и утку значительны. Кривые растяжения при сравнительно небольших усилиях отклоняются от прямой линии закона Гука, зависимость между усилиями и деформациями за пределами пропорциональности носит уже нелинейный характер. Закон Гука для этих тканей даже при малых усилиях следует заменять нелинейным законом упругости.



**Рис. 6.** Прочностные характеристики трубопроводов по основе (полоска 50×200 мм):  
**1** – трубопровод с односторонним эмульсионным покрытием; **2** – трубопровод с односторонним покрытием на основе органических полиуретанов; **3** – трубопровод с односторонним латексным покрытием; **4** – трубопровод с двусторонним латексным покрытием и внешним защитным из полиуретанового лака; **5** – трубопровод с двусторонним латексным покрытием и внешним защитным на основе водных полиуретанов; **6** – трубопровод усиленный шовный

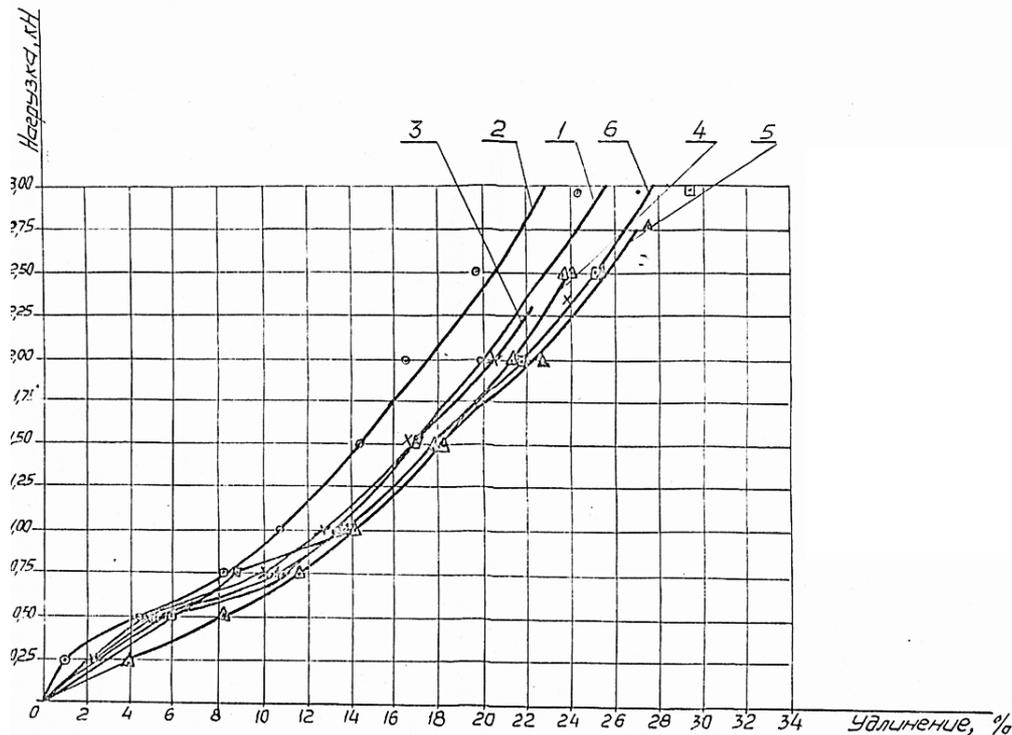
**Fig. 6.** Strength characteristics of the pipeline on the basis (strip 50 × 200 mm):  
**1** – pipeline with one-sided emulsion coating based on aqueous polyurethanes;  
**2** – pipeline with one-sided coating based on organic polyurethanes; **3** – pipeline with double-sided latex coating; **4** – pipeline with double-sided latex coating and external protective polyurethane varnish; **5** – pipeline with double-sided latex coating and external protective and external protective on the basis of aqueous polyurethanes;  
**6** – reinforced suture pipeline

При определении прочностных характеристик трубопроводов обязательно следует учитывать растяжимость их материалов. Кроме того, материалы герметизирующих покрытий и технология их нанесения на тканевый каркас существенно влияют на зависимости нагрузка-деформация трубопроводов. Это необходимо иметь в виду при их проектировании и изготовлении. Образцы всех видов трубопроводов были доведены до разрыва. Разрыв образцов происходил по утку при избыточном давлении

0,10-0,135 МПа, что подтвердило правильность выбора материалов армирующих каркасов. В случае эксплуатации трубопроводов под большим избыточным давлением следует увеличивать прочность уточных нитей каркасов<sup>1</sup> [10-13].

Экспериментальные данные по износоустойчивости латексной плёнки даны в табл. 1.

<sup>1</sup> ГОСТ 270-75 (СТ СЭВ 2594-80). Резина. Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении. М.: Изд-во стандартов, 1982. 7 с.



**Рис. 7.** Прочностные характеристики трубопроводов по утку (полоска 50×200 мм):

1 – трубопровод с односторонним эмульсионным покрытием; 2 – трубопровод с односторонним покрытием на основе органических полиуретанов; 3 – трубопровод с односторонним латексным покрытием; 4 – трубопровод с двусторонним латексным покрытием и внешним защитным из полиуретанового лака; 5 – трубопровод с двусторонним латексным покрытием и внешним защитным на основе водных полиуретанов; 6 – трубопровод усиленный шовный

**Fig. 7.** Strength characteristics of the pipeline on the weft (strip 50 × 200 mm): 1 – pipeline with one-sided emulsion coating based on aqueous polyurethanes; 2 – pipeline with one-sided coating based on organic polyurethanes; 3 – pipeline with double-sided latex coating; 4 – pipeline with double-sided latex coating and external protective polyurethane varnish; 5 – pipeline with double-sided latex coating and external protective and external protective on the basis of aqueous polyurethanes; 6 – reinforced suture pipeline

Средняя скорость износа

$$\bar{J} = 0,045 \cdot 10^{-8} \text{ м/с.}$$

Среднеквадратичное отклонение

$$G = \sqrt{\frac{\sum_1^N (\bar{J} - J)^2}{N-1}} = 0,001 \cdot 10^{-8} \text{ м/с.}$$

Коэффициент вариации

$$\delta = \frac{G}{\bar{J}} \cdot 100\% = \frac{0,001 \cdot 10^{-8}}{0,045 \cdot 10^{-8}} \cdot 100\% = 16\%.$$

В результате обработки экспериментальных данных получим, что скорость

износа составляет  $(0,045 \pm 0,007) \cdot 10^{-8}$  м/с с надёжностью 84% [14].

Проведенные исследования на износостойчивость герметизирующего латексного покрытия толщиной 0,2-0,4 мм позволили определить совокупные воздействия факторов, действующих на трубопровод в период его работы. Латексная плёнка обеспечивает герметичность трубопровода от эрозии в течение всего ресурса работоспособности [15].

**Таблица 1.** Результаты износоустойчивости латексной пленки**Table 1.** Latex Film Wear Resistance Results

Масса диска вместе с латексной пленой, $10^{-3}$ кг / The mass of the disc together with the latex film, $10^{-3}$ kg	Изменение массы образца, $10^{-3}$ кг / Change in sample mass, $10^{-3}$ kg	Время износа $10^3$ с / Wear time $10^3$ s	Накопленное изменение массы, $10^{-3}$ кг / Cumulative mass change, $10^{-3}$ kg	Накопленная сумма времени, $10^3$ с / Accumulated amount of time, $10^3$ s	Скорость износа, $10^{-8}$ м/с / Wear rate, $10^{-8}$ m / s
13,218	0	0	0	0	0
13,171	0,047	36	0,047	36	0,046
13,125	0,046	36	0,093	72	0,045
13,078	0,047	36	0,140	108	0,046
13,032	0,046	36	0,186	144	0,045
12,992	0,040	36	0,226	180	0,039
12,944	0,048	36	0,274	216	0,047
12,897	0,047	36	0,381	252	0,046
12,850	0,048	36	0,429	288	0,047
12,803	0,047	36	0,476	324	0,046
12,695	0,046	36	0,523	360	0,045

По результатам всех испытаний следует, что латексное покрытие, герметизирующее каркас, удовлетворяет предъявляемым агротребованиям [16-20].

### Выводы

Плоскосворачиваемые трубопроводы всех видов, изготовленные по разработанным технологиям, соответствуют требуемым характеристикам видов.

В большей степени по агротехническим требованиям удовлетворяет трубопровод с двусторонним латексным покрытием.

Анализ результатов экспериментов подтверждает, что кривые растяжения

трубопроводов при сравнительно небольших усилиях отклоняются от прямой линии и за пределами пропорциональности носят нелинейный характер. При определении прочностных характеристик трубопроводов обязательно следует учитывать растяжимость материалов, т.к. их деформации по основе и утку значительны.

Прочностные зависимости нагрузка-деформация трубопроводов определены следующими факторами: предварительной пропиткой армирующих каркасов; материалами полимерных покрытий и технологиями их нанесения на тканевый каркас.

### Список литературы

1. Расчет гибких эластичных трубопроводов из полимерных материалов / С. Г. Новиков, Р. В. Глаголев, С. А. Зайцев, Е. С. Журавлева // Современная наука: проблемы, инновации, решения: матер. Междунар. науч.-практ. конф. (Курск, 19-20 декабря 2014г.) / отв. за вып. Р. В. Глаголев; Курский институт социального образования (филиал) РГСУ. Курск: ООО «Учитель», 2014. С. 40–49.
2. Расчет эластичных оболочек из полимерных материалов / С.Г. Новиков, Р.В. Глаголев, В.В. Малыхин, С.А. Сергеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2014. №1. С.78-85.
3. Новиков С.Г., Куценко В.Н., Малыхин В.В. Инженерные методы расчетов гибких плосковорачиваемых трубопроводов из композиционных материалов с учетом их веса // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 7, №3(24). С.139-146.
4. Новиков С.Г., Ляхов В.И. Установка для изготовления гибких бесшовных оболочек из композитных материалов // Провинциальные научные записки. 2019. № 2(10). С. 58-60.
5. Пат. 2376141 РФ, МПК В29D 23/00. Способ изготовления напорных резиноканевых рукавов//С.Г. Новиков, А.Е.Чижов, Е.А. Чижов. (РФ). №2008 121103/12; Заявл. 26.05.2008; Оpubл. 20.12.2009, Бюл. №35.
6. Новиков С.Г., Малыхин В.В. Перспективы применения гибких плосковорачиваемых трубопроводов из композиционных материалов // Провинциальные научные записки. 2020. № 1(11). С.61-65.
7. Лепетов В.А. Резиновые технические изделия. М.-Л.:Химия, 1965. 472 с.
8. Новиков С.Г. Промышленная безопасность гибких трубопроводов из композиционных материалов. Курск, 2012. 160 с.
9. Разработка гибких высоконапорных шлангов для МГД - генераторов и пожарных рукавов из новых видов сырья с целью повышения их эксплуатационных свойств: Отчет о НИР/ЦНИИЛВ; Рук. В.И.Ходырев. РГ 61024776; инв. №0265.0047789. М, 1994. 62с.
10. Разработка конструкций гибких трубопроводов из композитных материалов нового поколения / С.Г. Новиков, Р.В. Глаголев, С.А. Зайцев [и др.]. Курск: ООО «Учитель», 2014. 96 с.
11. Пат. 2019089 РФ, МПК А01G 25/02. Поливной трубопровод // С.Г. Новиков, В. А. Волосухин (РФ). №4897070/15; Заявл. 23.10.1990; Оpubл. 15.09.1994, Бюл. №17.
12. Пат. 2326526 РФ, МПК А01G 25/02. Поливной трубопровод // С.Г. Новиков, В.А. Волосухин, С.С. Новиков и др. (РФ). №2006107798/12; Заявл. 13.03.2006; Оpubл. 20.06.2008, Бюл. №17.

13. Повышение надежности поливных плоскостворачиваемых трубопроводов / С.Г. Новиков, В.В. Малыхин [и др.] // Материалы и упрочняющие технологии-2011: сб. материалов XVIII Рос. науч.-техн. конф. с международным участием / редкол.: В.Н. Гадалов [и др.]; Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2011. С.82-87.

14. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1988. 239 с.

15. Новиков С.Г., Должиков А.А. Классификация материалов для применения в изготовлении гибких оболочек // Провинциальные научные записки. 2019. № 1(9). С.110-113.

16. Новиков С. Г., Кагиров А.Н., Транспортирующий гибкий трубопровод повышенной прочности // Молодежь и наука XXI века: сборник материалов XVII Всероссийской научно-технической конференции (14-15 апреля 2010 г.) / под ред. Н.Н. Шкодкиной, О.Л. Жигалевой. Железногорск, 2010. С.171-172.

17. Вопросы эксплуатации гибких трубопроводов при поливе / С.Г. Новиков, Р.В. Глаголев, И.Ю. Воронцов, В.А. Адам // Молодежь и наука XXI века: сборник материалов XXII Всероссийской научно-технической конференции 22-23 апреля 2015 г.) / под ред. О.Л. Жигалевой, Н.Н. Шкодкиной. Курск, 2015. С.165-166.

18. Материалы армирующих тканевых каркасов в гибких трубопроводах / С.Г. Новиков, Р.В. Глаголев, Е.В. Буланова, А.В. Ефанова // Молодежь и наука XXI века: сборник материалов XXII Всероссийской научно-технической конференции (22-23 апреля 2015 г.) / под ред. О.Л. Жигалевой, Н.Н. Шкодкиной. Курск, 2015. С.174-175.

19. Новиков С.Г., Глаголев Р.В. Обзор прочностных и гидравлических исследований гибких трубопроводов // Молодежь и наука XXI века: сборник материалов XXII Всероссийской научно-технической конференции (22-23 апреля 2015 г.) / под ред. О.Л. Жигалевой, Н.Н. Шкодкиной. Курск, 2015. С.190-192.

20. Новиков С.Г., Глаголев Р.В., Мальцева А.С. Выбор материалов, разработка конструкций и технологий изготовления гибких оболочек // Молодежь и наука XXI века: сборник материалов XXIII Всероссийской научно-технической конференции (20-21 апреля 2016 г.) / под ред. О.Л. Жигалевой, Н.Н. Шкодкиной. Курск, 2016. С. 233-237.

## References

1. Novikov S.G., Glagolev R.V., Zaitsev S.A., Zhuravleva E.S. [Calculation of flexible elastic pipelines made of polymeric materials]. *Sovremennaya nauka: problemy, innovatsii, resheniya. Mater. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Modern science: problems, innovations, solutions. Mater. Int. scientific-practical conf.]. Kursk, 2014, pp. 40–49 (In Russ.).

2. Novikov S.G., Glagolev R.V., Malykhin V.V., Sergeev S.A. Raschet elastichnykh obolochek iz polimernykh materialo [Calculation of elastic shells from polymeric materials].

*Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2014, no.1, pp.78-85 (In Russ.).

3. Novikov S.G., Kutsenko V.N., Malykhin V.V. Inzhenernye metody raschetov gibkikh ploskosvorachivaemykh truboprovodov iz kompozitsionnykh materialov s uchetom ikh vesa [Engineering methods for calculating flexible flat-rolled pipelines made of composite materials taking into account their weight]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2017, vol. 7, no. 3 (24), pp.139-146 (In Russ.).

4. Novikov S.G., Lyakhov V.I. Ustanovka dlya izgotovleniya gibkikh besshovnykh obolochek iz kompozitnykh materialov [Installation for the manufacture of flexible seamless shells from composite materials]. *Provintsial'nye nauchnye zapisk = Provincial Scientific Notes*, 2019, no. 2 (10), pp. 58-60 (In Russ.).

5. Novikov S.G., Chizhov A.E., Chizhov E.A. *Sposob izgotovleniya napornykh rezinotkanevykh rukavov* [Method of manufacturing pressure head rubber-fabric hoses]. Patent RF, no. 121103/12, 2008 (In Russ.).

6. Novikov S.G., Malykhin V.V. Perspektivy primeneniya gibkikh ploskosvorachivaemykh truboprovodov iz kompozitsionnykh materialov [Prospects for the use of flexible flat-rolled pipelines made of composite materials]. *Provintsial'nye nauchnye zapiski = Provincial Scientific Notes*, 2020, no. 1 (11), pp.61-65 (In Russ.).

7. Lepetov V.A. *Rezinovye tekhnicheskie izdeliya* [Rubber technical products]. Moscow-Leningrad, Chemistry Publ., 1965. 472 p. (In Russ.).

8. Novikov S.G. *Promyshlennaya bezopasnost' gibkikh truboprovodov iz kompozitsionnykh materialov* [Industrial safety of flexible pipelines made of composite materials]. Kursk, 2012. 160 p. (In Russ.).

9. *Razrabotka gibkikh vysokonapornykh shlangov dlya MGD - generatorov i pozharnykh rukavov iz novykh vidov syr'ya s tsel'yu povysheniya ikh ekspluatatsionnykh svoistv. Otchet o NIR/TsNIILV* [Development of flexible high-pressure hoses for MHD - generators and fire hoses from new types of raw materials in order to improve their operational properties. Report on R&D / TsNIILV];. RG 61024776; inv. No. 0265.0047789. Moscow, 1994, 62 p. (In Russ.).

10. Novikov S.G., Glagolev R.V., Zaitsev S.A. *Razrabotka konstruksii gibkikh truboprovodov iz kompozitnykh materialov novogo pokoleniya* [Development of constructions of flexible pipelines from composite materials of new generation]. Kursk, 2019. 96 p. (In Russ.).

11. Novikov S.G., Volosukhin V. A. *Polivnoi truboprovod* [Irrigation pipeline]. Patent RF, no. 4897070/15, 1994 (In Russ.).

12. Novikov S.G., Volosukhin V.A., Novikov S.S. [et al.]. *Polivnoi truboprovod* [Irrigation pipeline]. Patent RF, no. 2006107798/12, 2006 (In Russ.).

13. Novikov S.G., Malykhin V.V. [Improving the reliability of irrigated flat-welded pipelines]. *Materialy i uprochnyayushchie tekhnologii-2011. Sb. materialov XVIII Ros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunarodnym uchastiem*. [Materials and strengthening technologies-2011. Collection of articles. materials XVIII Ros. scientific and technical conf. with international participation]. Kursk, 2011, pp.82-87 (In Russ.).

14. Lvovskiy E.N. *Statisticheskie metody postroeniya empiricheskikh formul* [Statistical methods for constructing empirical formulas]. Moscow, Vysh. shk. Publ., 1988. 239 p. (In Russ.).

15. Novikov S.G., Dolzhikov A.A. Klassifikatsiya materialov dlya primeneniya v izgotovlenii gibkikh obolochek [Classification of materials for use in the manufacture of flexible shells]. *Provintsial'nye nauchnye zapiski = Provincial Scientific Notes*, 2019, no. 1 (9), pp. 110-113(In Russ.).

16. Novikov S. G., Kagiroy A.N. [Transporting flexible pipeline of increased strength]. *Molodezh' i nauka XXI veka. Sbornik materialov XVII Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Youth and science of the XXI century. Collection of materials of the XVII All-Russian scientific and technical conference]. Zheleznogorsk, 2010, pp.171-172 (In Russ.).

17. Novikov S.G., Glagolev R.V., Vorontsov I.Yu., Adam V.A. [Issues of operating flexible pipelines during irrigation]. *Molodezh' i nauka XXI veka. Sbornik materialov XXII Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Youth and Science of the XXI Century. Collection of Materials of the XXII All-Russian Scientific and Technical Conference]. Kursk, 2015, pp.165-166 (In Russ.).

18. Novikov S.G., Glagolev R.V., Bulanova E.V., Efanova A.V. [Materials of reinforcing fabric frames in flexible pipelines]. *Molodezh' i nauka XXI veka. Sbornik materialov XXII Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Youth and Science of the XXI Century. Collection of Materials of the XXII All-Russian Scientific and Technical Conference]. Kursk, 2015, p. 174-175 (In Russ.).

19. Novikov S.G., Glagolev R.V. [Review of strength and hydraulic studies of flexible pipelines]. *Molodezh' i nauka XXI veka. Sbornik materialov XXII Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Youth and Science of the XXI Century. Collection of Materials of the XXII All-Russian Scientific and Technical Conference]. Kursk, 2015, pp.190-192 (In Russ.).

20. Novikov S.G., Glagolev R.V., Maltseva A.S. [The choice of materials, the development of structures and technologies for the manufacture of flexible shells]. *Molodezh' i nauka XXI veka. Sbornik materialov XXIII Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii =* [Youth and Science of the XXI Century. Collection of Materials of the XXIII All-Russian Scientific and Technical Conference]. Kursk, 2016, pp.233-237 (In Russ.).

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

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

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

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

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

**Будылина Марина Дмитриевна**, магистрант, Курский государственный университет, e-mail: marina563767@yandex.ru

**Marina D. Budylina**, Master Student, Kursk State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: marina563767@yandex.ru

## Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-25-37>

## Модель изнашивания трущихся шероховатых поверхностей

А.О. Горленко <sup>1</sup>, Е.В. Агеев <sup>2</sup> ✉

<sup>1</sup> Брянский государственный технический университет  
бул. 50 лет Октября 7, г. Брянск 241035, Российская Федерация

<sup>2</sup> Юго-Западный государственный университет  
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: ageev\_ev@mail.ru

### Резюме

**Цель исследования.** Разработать модель изнашивания, учитывающую параметры качества поверхностного слоя и условия трения, которая позволит путем управляемого технологического воздействия обеспечить требуемую интенсивность изнашивания поверхностей трения.

**Методы.** Требуемую интенсивность изнашивания поверхностей трения позволяет обеспечить электро-механическая обработка (ЭМО), в частности проводимая на отделочно-упрочняющих режимах.

Повышение износостойкости, предела выносливости и других эксплуатационных свойств, а вместе с тем изменение физико-механических и геометрических показателей поверхностного слоя деталей достигается сочетанием на поверхности обрабатываемой детали термического и силового воздействий. Для достижения этого эффекта разработана оригинальная установка, которая включает в себя устройство для механической обработки на основе универсального станка с комплектом необходимого инструмента и приспособлений для закрепления обрабатываемой детали и подвода смазочно-охлаждающей жидкости и электрического тока большой силы и малого напряжения, а также преобразователя промышленного электроточка и блоков управления режимами обработки, средств коммутации и ЭВМ.

**Результаты.** Предложен подход к представлению природы трения и изнашивания. На основе предложенной модели изнашивания, учитывающей параметры качества поверхностного слоя и условия трения, представляется возможным обеспечивать требуемую интенсивность изнашивания поверхностей трения путем управляемого технологического воздействия. Разработанная модель изнашивания, учитывающая параметры качества поверхностного слоя и условия трения, позволяет путем управляемого технологического воздействия обеспечить требуемую интенсивность изнашивания поверхностей трения.

**Заключение.** Расчетные данные, полученные с использованием разработанной модели, и данные, полученные экспериментальным путем, найдут практическое применение при создании ресурсосберегающих процессов обработки металлических сплавов и композиционных материалов.

**Ключевые слова:** поверхностный слой; качество поверхностного слоя; трение; изнашивание; износостойкость; модель изнашивания; триботехнические испытания.

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

**Для цитирования:** Горленко А.О., Агеев Е.В. Модель изнашивания трущихся шероховатых поверхностей // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(1): 25-37. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-25-37>.

Поступила в редакцию 15.01.2021

Подписана в печать 10.02.2021

Опубликована 31.03.2021

## Wear Model of Sliding Rough Surfaces

Alexandr O. Gorlenko <sup>1</sup>, Evgeny V. Ageev <sup>2</sup> ✉

<sup>1</sup> Bryansk State Technical University  
bul. 50 Let Oktyabrya 7, Bryansk 241035, Russian Federation

<sup>2</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: ageev\_ev@mail.ru

### Abstract

**Purpose of research.** To develop a wear model that takes into account the quality parameters of the surface layer and friction conditions, which will allow, through controlled technological action, providing the required wear intensity of friction surfaces.

**Methods.** Electromechanical processing, in particular, can provide the required intensity of friction surfaces wear being carried out in finishing and strengthening modes.

An increase in wear resistance, endurance limit and other operational properties, and at the same time a change in the physical, mechanical and geometric parameters of the surface layer of parts is achieved by a combination of thermal and force influences on the surface of the processed part. To achieve this effect, an original installation has been developed, which includes a device for machining based on a universal machine with a set of necessary tools and devices for fixing a workpiece and supplying coolant and electric current of high power and low voltage, as well as an industrial electric current converter and control units for processing modes, switching devices and computers.

**Results.** An approach to the representation of the nature of friction and wear has been proposed. Based on the proposed wear model, which takes into account the quality parameters of the surface layer and friction conditions, it is possible to provide the required wear intensity of friction surfaces through controlled technological action.

The developed wear model, which takes into account the quality parameters of the surface layer and friction conditions, makes it possible to provide the required wear intensity of friction surfaces through controlled technological action.

**Conclusion.** The calculated data obtained with the help of the developed model and the data obtained experimentally will find practical application in creating resource-saving processes for processing metal alloys and composite materials.

**Keywords:** surface layer; surface layer quality; friction; wear; wear resistance; wear model; tribotechnical tests.

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

**For citation:** Gorlenko A. O., Ageev E. V. Wear Model of Sliding Rough Surfaces. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(1): 25-37 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-25-37>.

Received 15.01.2021

Accepted 10.02.2021

Published 31.03.2021

\*\*\*

### Введение

В настоящее время существуют известные теории трения и изнашивания,

в том числе учитывающие молекулярные (адгезионные) и механические (де-

формационные) составляющие процесса. Недостатком данных теорий является то, что они не в полной мере учитывают параметры качества сопряженных поверхностей трения [1-5].

Предлагается следующий подход к оценке природы процессов трения и изнашивания. Природа трения заключается в процессе контакта относительно перемещающихся поверхностей, имеющих неровности профиля и склонность к межатомному взаимодействию, приводящем к изменению микрогеометрических и физико-механических характеристик сопряжения.

Природа изнашивания заключается в наличии напряжений в материалах контактирующих поверхностей, которые стремятся избавиться от них диспергированием отдельных частиц различной размерности, приближаясь к минимуму производства энтропии [6-12].

Методология проведения теоретических исследований представлена на рис. 1.

**Целью настоящей работы являлось** обеспечение требуемой интенсивности изнашивания поверхностей трения путем управляемого технологического воздействия на основе предложенной модели изнашивания, учитывающей параметры качества поверхностного слоя и условия трения.

## Материалы и методы

Методика проведения практических исследований представлена на рис. 2.

Для достижения этого эффекта разработана оригинальная установка, которая включает в себя устройство для механической обработки на основе универсального станка с комплектом необходимого инструмента и приспособлений для закрепления обрабатываемой детали и подвода смазочно-охлаждающей жидкости и электрического тока большой силы и малого напряжения, а также преобразователя промышленного электротока и блоков управления режимами обработки, средств коммутации и ЭВМ (рис. 3).

## Результаты и их обсуждение

При электромеханической обработке методами линейного регрессионного анализа установлены значения коэффициентов  $K_J$ ,  $m$  и  $n$  в модели изнашивания

$$J_h = K_J C_X^m C_F^n, \quad (1)$$

которое с учетом этих значений принимает вид

$$J_t = 38,82 C_X^{0,11} C_F^{1,21}, \quad (2)$$

причем значения параметров качества поверхностного слоя образцов, изготовленных из стали 40ХН и высокопрочного чугуна ВЧ-50, а также условия трения варьировались в следующих пределах:  $Ra = 0,4-3,2$  мкм;  $Wz = 5,6-16,8$  мкм;  $Hmax = 11-25$  мкм;  $tm = 50-72\%$ ;  $Sm = 38-140$  мкм;  $k = 1,5-3,5$ ;  $\lambda' = 1,0-1,4$ ;  $f = 0,1-0,3$ ;  $q = 1,6-4,0$  МПа;  $v = 0,2-1,1$  м/с. Исходные данные для линейного регрессионного анализа представлены в табл. 1.

В соответствии с методологией проведения теоретических исследований в качестве модели изнашивания поверхностей трения предлагается кинетическая модель, представляемая в виде:

$$J_n = K_J C_X^m C_F^n,$$

где  $J_n$  – интенсивность изнашивания;  
 $K_J$  – коэффициент изнашивания;  
 $C_X$  – параметр, характеризующий качество поверхностного слоя;  
 $C_F$  – параметр, характеризующий условия трения;  
 $m, n$  – коэффициенты.

Данное выражение является моделью изнашивания трущихся поверхностей деталей триботехнических систем, учитывающей параметры качества поверхностного слоя и условия трения

Параметр  $C_X$  характеризует влияние микрогеометрии и физико-механических свойств поверхностного слоя

$$C_X = \frac{(Ra Wz H \max)^{1/6}}{tm^{3/2} Sm^{1/2} k^{2/3} \lambda'},$$

где  $Ra, tm, Sm, Wz$  и  $H \max$  – параметры шероховатости, волнистости и макроотклонений;  $k$  – коэффициент упрочнения поверхностного слоя;  $\lambda'$  – коэффициент, учитывающий влияние остаточных напряжений

Параметр  $C_F$  определяется исходя из следующих соображений. Триботехническая система, обменивающаяся с окружающей средой теплом (в результате действия силы трения) и массой (в результате наличия диспергированных в процессе износа частиц), находится в состоянии равновесия при минимуме рассеяния энергии (производства энтропии), стабилизации процесса тепловыделения, установившемся процессе изнашивания, формировании равновесного состояния поверхностного слоя и, следовательно, минимальном износе трущихся поверхностей.

$$C_F = \frac{fqv}{[Q_{уд}]},$$

где  $f$  – коэффициент трения;  
 $q$  – давление в зоне контакта;  
 $v$  – скорость относительного скольжения сопряженных поверхностей трения;  
 $[Q_{уд}]$  – допустимая удельная мощность трения.

Параметр  $C_F$  является безразмерной величиной, показывающей, насколько удельная мощность трения ( $fqv$ ) в реальном случае отличается от допустимой по справочным данным ( $[Q_{уд}]$ ). Его значение должно стремиться к минимальному, насколько позволяют добиться этого возможности технологических методов отделочно-упрочняющей обработки

Значение коэффициента трения определяется в соответствии с положениями молекулярно-механической теории трения

$$f = \frac{\tau_0}{HV} + \beta' + T_m,$$

где  $\tau_0$  – сдвиговое сопротивление при экстраполяции нормального давления к нулю;

$HV$  – микротвердость поверхностного слоя,  $HV = kHV_{исх}$ ;  $\beta'$  – коэффициент упрочнения молекулярных связей;  $T_m$  – механическая составляющая коэффициента трения, характеризующая влияние макроотклонений, волнистости, шероховатости и физико-механических свойств поверхностного слоя на процесс трения, определяемая как

$$T_m = \frac{8\pi\alpha_s (k\sigma_m)^{1/3}}{tm} \sqrt{\frac{30(1-\mu^2)(2\pi q_0 Ra Wz H \max)^{1/3}}{E Sm tm}}$$

Таким образом, представляется возможным обеспечивать требуемую интенсивность изнашивания поверхностей трения путем управляемого технологического воздействия с целью обеспечения требуемых параметров качества поверхностного слоя сопряженных деталей, в частности параметров шероховатости, волнистости, макроотклонений, а также коэффициента упрочнения поверхностного слоя

Рис. 1. Методология теоретических исследований

Fig. 1. Methodology of theoretical research

Требуемую интенсивность изнашивания поверхностей трения позволяет обеспечить электрохимическая обработка (ЭМО), в частности проводимая на отделочно-упрочняющих режимах.

Электрохимическая обработка основана на сочетании термического и силового воздействий на поверхность обрабатываемой детали, что приводит к изменению физико-механических и геометрических показателей поверхностного слоя деталей и, как следствие, к повышению износостойкости, предела выносливости и других эксплуатационных свойств.

Сущность метода ЭМО заключается в том, что в процессе обработки через место контакта инструмента и заготовки проходит ток большой силы и низкого напряжения.

Высокое сопротивление зоны контакта приводит к сильному нагреву контактирующих микронеровностей обрабатываемой поверхности

Под силовым воздействием инструмента они деформируются и

Поверхностный слой упрочняется за счет быстрого отвода тепла в основную массу материала и скоростного охлаждения от температуры фазового превращения металла. При этом разогрев до температур фазовых превращений является необходимым условием упрочняющих режимов обработки

Технология ЭМО была реализована на специальной установке, представляющей собой технологический комплекс, состоящий из

Инструмент и приспособления для закрепления обрабатываемой детали

Универсальный станок (применяемый для механической обработки заготовок)

Инструмент и приспособления для подвода электрического тока большой силы и малого напряжения

Силовой блок для преобразования промышленного электрического тока

Блок управления режимами обработки

Средства коммутации и подвода смазывающе-охлаждающей технологической среды

Блок сопряжения с ПЭВМ

Рис. 2. Методика практических исследований

Fig. 2. Methodology of practical research



Рис. 3. Установка для электромеханической обработки

Fig. 3. Installation for electrical and mechanical processing

Таблица 1. Исходные данные для расчета коэффициентов  $K_j$ ,  $m$  и  $n$  в модели изнашивания

Table 1. Initial data for calculating the coefficients  $K_j$ ,  $m$  and  $n$  in the wear model

№ опыта / Experience No.	Технологические режимы ЭМО / Technological modes of EMP			Параметр $C_X$ / Parameter $C_X$	Параметр $C_F$ / Parameter $C_F$	Интенсивность изнашивания $J_h \times 10^{-11}$ / The wear rate $J_h \times 10^{-11}$
	$j$ , А/мм <sup>2</sup> / $j$ , А/мм <sup>2</sup>	$p$ , МПа / $p$ , МПа	$v_0$ , м/сек / $v_0$ , м/сек			
1	450	20	0,01	0,311	0,254	12,8
2	550	10	0,02	0,293	0,254	9,7
3	700	20	0,02	0,291	0,254	8,1
4	900	10	0,01	0,253	0,254	3,6
5	500	12,5	0,03	0,401	0,123	2,88
6	750	7,5	0,046	0,384	0,118	2,38
7	825	12,5	0,03	0,361	0,118	2,16
8	875	7,5	0,046	0,283	0,037	0,98
9	875	12,5	0,03	0,309	0,123	1,12

**Примечание:**  $j$  – плотность тока;  $p$  – давление роликов-электродов;  $v_0$  – скорость обработки  
**Note:**  $j$  – current density;  $p$  – pressure of the electrode rollers;  $v_0$  – processing speed

При алмазном выглаживании и точении образцов, изготовленных из сталей 45 и 18ХГТ методами линейного регрессионного анализа по данным, приведенным в табл. 2, установлена

тесная корреляционная зависимость между интенсивностью изнашивания и параметром  $C_X$  (коэффициент парной корреляции  $R = 0,89$ )

$$J_h = 9,333 \cdot 10^{-9} C_X^{1,335}. \quad (3)$$

Сравнение значений интенсивности изнашивания, рассчитанных с использованием выражения (3) и полученных экспериментальным путем, позволяет считать рассматриваемый подход к определению интенсивности изнашивания как функции от параметра  $C_X$  вполне обоснованным.

Исследования по технологическому обеспечению требуемой интенсивности изнашивания поверхностей трения путем управления значением параметра  $C_X$

проводились на образцах, изготовленных из стали 45 с применением технологических методов, в частности алмазного выглаживания и точения (табл. 3, 4).

Расчетные данные, полученные с использованием разработанной модели, и данные, полученные экспериментальным путем, найдут практическое применение при создании ресурсосберегающих процессов обработки металлических сплавов и композиционных материалов [13-20].

**Таблица 2.** Фактическое  $J_h$ , ожидаемое  $\hat{J}_h$ , значение интенсивности изнашивания образцов и параметра  $C_X$

**Table 2.** Actual  $J_h$ , expected  $\hat{J}_h$ , value of the wear rate of the samples and the parameter  $C_X$

$J_h \times 10^{-9}$	$\hat{J}_h \times 10^{-9}$	$C_X$	$J_h \times 10^{-9}$	$\hat{J}_h \times 10^{-9}$	$C_X$
2,51	1,71	0,28	40,9	5,36	0,66
3,31	3,31	0,46	4,51	6,24	0,74
3,01	2,21	0,34	4,01	5,04	0,63
2,17	0,81	0,16	3,81	4,51	0,59
3,16	2,47	0,37	6,52	8,23	0,91
3,74	4,51	0,58	8,02	10,09	1,06
3,16	2,56	0,38	4,26	5,8	0,7
2,84	1,95	0,31	3,91	4,93	0,62

**Таблица 3.** Результаты испытаний на изнашивание (алмазное выглаживание)

**Table 3.** The results of testing for wear (diamond smoothing)

№ образца / Sample no.	Диаметр образца, мм / The diameter of the specimen, mm	$C_{X\text{расч}}$ / $C_X$ estimated value	$P_n$ , Н / $P_n$ , Н	Условия трения / Friction conditions		$J_h \times 10^{-9}$ / $J_h \times 10^{-9}$
				$q$ , МПа / $q$ , МПа	$v$ , м/с / $v$ , m / s	
1	35	0,38	125	2,8	0,57	7,4
2	50	0,32	160	2,2	0,8	7,0
3	65	0,28	195	1,7	1,1	6,7

**Примечание:**  $P_n$  – усилие выглаживания. Остальные режимы выглаживания:  $R_u = 1,5$  мм (радиус индентора);  $S_n = 0,075$  мм/об (продольная подача);  $v_0 = 10$  м/мин (скорость обработки).  $C_{X\text{исх}} = 0,85$ .

**Note:**  $P_n$  – smoothing force. Other smoothing modes:  $R_u = 1.5$  mm (indenter radius);  $S_n = 0.075$  mm / rev (longitudinal feed);  $v_0 = 10$  m / min (processing speed).  $C_{X\text{исх}} = 0.85$

**Таблица 4.** Результаты испытаний на изнашивание (точение)**Table 4.** The results of testing for wear (turning)

№ образца / Sample no.	Диаметр образца, мм / The diameter of the specimen, mm	$C_{X \text{ расч}} / C_X$ estimated value	$S_n$ , мм/об / $S_n$ , mm / revolution	Условия трения / Friction conditions		$J_h \times 10^{-7} / J_h \times 10^{-7}$
				$q$ , МПа / $q$ , МПа	$v$ , м/с / $v$ , m / s	
1	35	0,72	0,06	2,8	0,57	11,3
2	50	0,64	0,09	2,2	0,8	10,7
3	65	0,59	0,125	1,7	1,1	10,2

**Примечание:**  $S_n$  – продольная подача. Остальные режимы обработки:  $v_{\text{рез}} = 80$  м/мин (скорость резания);  $t_{\text{рез}} = 0,1$  мм (глубина резания).  $C_{X \text{ исх}} = 0,85$   
**Note:**  $S_n$  – longitudinal feed. Other modes of treatment:  $v_{\text{рез}} = 80$  m / min (cutting speed);  $t_{\text{cutting}} = 0,1$  mm (cutting depth).  $C_{X \text{ initial}} = 0,85$

## Выводы

1. Предложен подход к представлению природы трения и изнашивания.
2. На основе предложенной модели изнашивания, учитывающей параметры

качества поверхностного слоя и условия трения, представляется возможным обеспечивать требуемую интенсивность изнашивания поверхностей трения путем управляемого технологического воздействия.

## Список литературы

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

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

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

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

7. Горленко А.О., Шевцов М.Ю., Агеева Е.В. Формирование в поверхности трения деталей машин градиентных износостойких структур с помощью комбинированной электромеханической обработки // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22. № 5(80). С. 24 – 35.

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

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

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

11. Горленко А.О., Шевцов М.Ю. Обработка поверхностей трения комбинированной электромеханической обработкой // Технология машиностроения и материаловедение. 2018. № 2. С. 33-38.

12. Чернова Н.А., Семёнова А.В., Воронина М.В. Эффективность электромеханической обработки деталей, предназначенных для художественной обработки // Автоматизированное проектирование в машиностроении. 2019. № 7. С. 134-136.

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

14. Принятие решений по статистическим моделям в управлении качеством продукции / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, С.В. Сапожников, С.Н. Кутепов, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 5(74). С. 78-92.

15. Диффузия водорода в сварных соединениях конструкционных сталей / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 6(75). С. 85-95.

16. Проведение рентгеноспектрального микроанализа твердосплавных электроэрозионных порошков / Е.В. Агеев, Г.Р. Латыпова, А.А. Давыдов, Е.В. Агеева // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 5-2 (44). С. 99-102.

17. Оценка эффективности применения твердосплавных электроэрозионных порошков в качестве электродного материала / Е.В. Агеев, Г.Р. Латыпова, А.А. Давыдов, Е.В. Агеева // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2012. № 1. С. 19-22.

18. Порошки, полученные электроэрозионным диспергированием отходов твердых сплавов - перспективный материал для восстановления деталей автотракторной техники / Е.В. Агеев, В.Н., Гадалов Е.В. Агеева, Р.В. Бобрышев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 1-1 (40). С. 182-189.

19. Исследование химического состава порошков, полученных электроэрозионным диспергированием твердого сплава / Е.В. Агеев, Б.А. Семенихин, Е.В. Агеева, Р.А. Латыпов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. № 5-1 (38). С. 138-144.

20. Получение твердосплавных изделий холодным изостатическим прессованием электроэрозионных порошков и их исследование / Е.В. Агеева, Р.А. Латыпов, П.И. Бурлак, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. № 5 (50). С. 116-125.

## References

1. Popov O. N., Vinokurov G. G. *Primenenie teorii markovskikh tsepei dlya modelirovaniya iznashivaniya poverkhnosti treniya poroshkovykh materialov* [Application of the theory of Markov chains for modeling the wear of the friction surface of powder materials]. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova = Bulletin of the North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov*, 2017, no. 5 (61), pp. 67-77 (In Russ.).

2. Vinokurov G. G., Starostin E. G., Popov O. N. *Ispol'zovanie teorii markovskikh tsepei dlya opisaniya iznashivaniya poroshkovykh pokrytii pri trenii skol'zheniya* [Using the theory of Markov chains to describe the wear of powder coatings during sliding friction]. *Vestnik mashinostroeniya = Vestnik Mashinostroeniya*, 2018, no. 2, pp. 35-40 (In Russ.).

3. Palchikova G. S., Krivtsov A. N., Moskalyuk D. D. *Analiz teorii treniya i iznashivaniya polimernykh materialov* [Analysis of the theory of friction and wear of polymer materials]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika = Actual Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice*, 2019, vol. 7, no. 1 (44), pp. 279-282 (In Russ.).

4. Chichinadze A.V., Brown E. D., Kozhemyakina D. V., Crickets Y. G., Bakin A. I., Suvorov A.V., Kokonin S. S. Primenenie teorii teplovoi dinamiki i modelirovaniya treniya i iznashivaniya tverdykh tel pri proektirovanii tormozov aviakoles [Application of theories of thermal dynamics and simulation of friction and wear of solids in the design of brakes aviacoles]. *Trenie i iznos = Friction and Wear*, 2005, vol. 26, no. 3, pp. 261-268 (In Russ.).

5. Chichinadze A.V., Kozhemyakina V. D., Suvorov A.V., Kokonin S. S. Primenenie teorii teplovoi dinamiki i modelirovaniya treniya i iznashivaniya tverdykh tel pri proektirovanii tyazhelonagruzhennykh tormozov transportnykh mashin [Application of theories of thermal dynamics and modeling of friction and wear of solid bodies in the design of heavily-loaded brakes of transport machines]. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmax = Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms*, 2009, no. 5, pp. 31-37 (In Russ.).

6. *Inzheneriya poverkhnosti detalei* [Engineering of the surface of parts]; ed. by A. G. Suslov. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 320 p. (In Russ.).

7. Gorlenko A. O., Shevtsov M. Yu., Ageeva E. V. Formirovanie v poverkhnosti treniya detalei mashin gradientnykh iznosostoikikh struktur s pomoshch'yu kombinirovannoi elektromekhanicheskoi obrabotki [Formation of gradient wear-resistant structures in the friction surface of machine parts using combined electromechanical processing]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2018, vol. 22, no. 5(80), pp. 24 – 35 (In Russ.).

8. Suslov A. G., Bezhyazichny V. F., Bazrov B. M., Babichev A. P., Bochkarev P. Y., Gorlenko A., etc. *Spravochnik tekhnologa* [Directory technologist]. Moscow, 2019, pp. 391 – 398 (In Russ.).

9. Gorlenko A. O. Povyshenie kachestva poverkhnostnogo sloya i ekspluatatsionnykh svoystv detalei elektromekhanicheskoi obrabotki [Improving the quality of the surface layer and the operational properties of parts of Electromechanical treatment]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2019, no. 1(91), pp. 8 – 16 (In Russ.).

10. Degtyarev N. M., Shepherds A. G. Mekhanicheskaya obrabotka krestovin kardannykh sharnirov, uprochnennykh elektromekhanicheskoi obrabotki [Machining of universal joints universal joints, hardened electro-mechanical treatment]. *Agrotekhnika i energoobespechenie = Agriculture and Energy Supply*, 2014, no. 1 (1), pp. 339-343 (In Russ.).

11. Gorlenko A. O., Shevtsov M. Yu. Obrabotka poverkhnostnostei treniya kombinirovannoi elektromekhanicheskoi obrabotki [Processing of friction surfaces by combined electromechanical processing]. *Tekhnologiya mashinostroeniya i materialovedenie = Tekhnologiya Mashinostroeniya i Materialovedenie*, 2018, no. 2, pp. 33-38 (In Russ.).

12. Chernova N. A., Semenova A.V., Voronina M. V. Effektivnost' elektromekhanicheskoi obrabotki detalei, prednaznachennykh dlya khudozhestvennoi obrabotki [Efficiency of electromechanical processing of parts intended for artistic processing]. *Avtomatizirovannoe*

*proektirovanie v mashinostroenii = Computer-aided Design in Mechanical Engineering*, 2019, no. 7, pp. 134-136 (In Russ.).

13. Sergeev N. N., Gvozdev A. E., Sergeev A. N., I Tikhonova. V., Kutepov S. N., Kuzovleva O. V., Ageev E. V. Perspektivnye stali dlya kozhukhov domennykh agregatov [Promising steels for blast furnace casings]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2017, vol. 7, no. 2 (23), pp. 6-15 (In Russ.).

14. Zhuravlev G. M., Gvozdev A. E., Sapozhnikov S. V., Kutepov S. N., Ageev E. V. Prinyatie reshenii po statisticheskim modelyam v upravlenii kachestvom produktsii [Decision-making on statistical models in product quality management]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2017, vol. 21, no. 5 (74), pp. 78-92 (In Russ.).

15. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Ageev E. V. Diffuziya vodoroda v svarnykh soedineniyakh konstruktsionnykh staley [Diffusion of hydrogen in welded joints of structural steels]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2017, vol. 21, no. 6 (75), pp. 85-95 (In Russ.).

16. Ageev E. V., Latypova G. R., Davydov A. A., Ageeva E. V. Provedenie rentgenospektral'nogo mikroanaliza tverdospлавnykh elektro-erozionnykh poroshkov [Conducting X-ray spectral microanalysis of hard-alloy electroerosive powders]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 5-2 (44), pp. 99-102 (In Russ.).

17. Ageev E. V., Latypova G. R., Davydov A. A., Ageeva E. V. Otsenka effektivnosti primeneniya tverdospлавnykh elektroerozionnykh poroshkov v kachestve elektrodnoho materiala [Evaluation of the effectiveness of the use of hard-alloy electroerosive powders as an electrode material]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2012, no. 1, pp. 19-22 (In Russ.).

18. Ageev E. V., Gadalov V. N., Ageeva E. V., Bobryshev R. V. Poroshki, poluchennye elektroerozionnym dispergировaniem otkhodov tverdyykh сплавов - perspektivnyi material dlya vosstanovleniya detalei avtotraktornoi tekhniki [Powders obtained by electroerosive dispersion of solid alloy waste - a promising material for restoring parts of automotive equipment]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 1-1 (40), pp. 182-189 (In Russ.).

19. Ageev E. V., Semenikhin B. A., Ageeva E. V., Latypov R. A. Issledovanie khimicheskogo sostava poroshkov, poluchennykh elektroerozionnym dispergированием tverdogo сплава [Investigation of the chemical composition of powders obtained by electroerosive

dispersion of a hard alloy]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2011, no. 5-1 (38), pp. 138-144 (In Russ.).

20. Ageeva E. V., Latypov R. A., Burak P. I., Ageev E. V. Poluchenie tverdosplavnykh izdelii kholodnym izostaticheskim pressovaniem elektroerozionnykh poroshkov i ikh issledovanie [Obtaining hard-alloy products by cold isostatic pressing of electroerosive powders and their research]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2013, no. 5 (50), pp. 116-125 (In Russ.).

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Горленко Александр Олегович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автомобильного транспорта, Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Российская Федерация, e-mail: bugi12@bk.ru, SPIN-код: 4377-4421, AuthorID: 175172

**Alexander O. Gorlenko**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Road Transport, Bryansk State Technical University, Bryansk, Russian Federation, e-mail: bugi12@bk.ru, SPIN-код: 4377-4421, AuthorID: 175172

**Агеев Евгений Викторович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ageev\_ev@mail.ru, ORCID: <http://0000-0002-3862-8624>

**Evgeny V. Ageev**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of Materials Technology and Transport Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ageev\_ev@mail.ru, ORCID: <http://0000-0002-3862-8624>

**Математическая модель для автоматизированного управления тепловыми потоками энергоэффективной системы вентиляции**

**В. С. Ежов**<sup>1</sup> ✉, **Н. Е. Семичева**<sup>1</sup>, **Д. Н. Тютюнов**<sup>1</sup>, **А. П. Бурцев**<sup>1</sup>,  
**Н. С. Перепелица**<sup>1</sup>, **А. П. Бурцев**<sup>1</sup>

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

✉ e-mail: vl-ezhov@yandex.ru

**Резюме**

**Цель исследования.** В современных системах вентиляции и кондиционирования (СКВ) одной из главных составляющих является система автоматического управления (САУ), выполняющая различные функции, а также обеспечивающая высокоэффективную работу в диапазоне от функций выключения до централизованного регулирования и управления климатическими параметрами (температура, влажность воздуха, контроль за концентрациями вредных веществ, скорость воздуха). Целью является исследование математической модели управления тепловыми потоками системы приточно-вытяжной вентиляции со встроенным комплексным теплообменником-рекуператором с целью утилизации низкопотенциального тепла вентиляционных газов и выбросов с попутным получением термоэлектричества.

**Методы.** Для достижения поставленных целей в работе использовались методы математического моделирования и создания расчетной модели. В основе автоматического управления СКВ положен принцип обратной связи – регулирования процессов за счет получения информации от внешних датчиков на основе математического моделирования физических процессов, происходящих в обслуживаемом здании или сооружении.

**Результаты.** Экспериментальная приточно-вытяжная установка с пластинчатым теплообменником-рекуператором, работает в квазистационарном режиме теплопередачи. В качестве нагревающей среды используется вытяжной воздух, удаляемый из помещения. При этом управление системой происходит при независимой схеме присоединения к системе теплоснабжения. Нагреваемый в помещении воздух рассматривается как несжимаемый газ, теплообмен между нагревающим и нагреваемым теплоносителями является стационарным процессом, турбулентность нагревающего и нагреваемого потоков теплоносителей является изотропной. Результатом исследования является математическая модель управления тепловыми потоками в системе приточно-вытяжной вентиляции со встроенным комплексным теплообменником-рекуператором. Получены оптимальные значения затрачиваемой тепловой энергии и параметров работы вентиляционной установки.

**Заключение.** Предложена и исследована математическая модель управления тепловыми потоками в системе приточно-вытяжной вентиляции со встроенным комплексным теплообменником-рекуператором. Получены оптимальные значения затрачиваемой тепловой энергии и параметров работы вентиляционной установки.

**Ключевые слова:** приточно-вытяжная установка; утилизация; коэффициент теплопередачи; электрическая мощность; эффективность; автономность; вентиляционные газы; термоэлектричество.

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

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках научно-исследовательской работы №1.12.20ф «Исследование алгоритмов, моделей и методов повышения эффективности функционирования сложных технических систем».

**Для цитирования:** Математическая модель для автоматизированного управления тепловыми потоками энергоэффективной системы вентиляции / В. С. Ежов, Н. Е. Семичева, Д. Н. Тютюнов, А. П. Бурцев, Н. С. Перепелица, А. П. Бурцев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(1): 38-52. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-38-52>.

Поступила в редакцию 14.01.2021

Подписана в печать 02.02.2021

Опубликована 31.03.2021

## A Mathematical Model for Automated Heat Flow Control of an Energy-Efficient Ventilation System

Vladimir S. Yezhov <sup>1</sup>✉, Natalya E. Semicheva <sup>1</sup>, Dmitriy N. Tyutyunov <sup>1</sup>,  
Alexey P. Burtsev <sup>1</sup>, Nikita S. Perepelitsa <sup>1</sup>, Alexander P. Burtsev <sup>1</sup>

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

✉ e-mail: vl-ezhov@yandex.ru

### Abstract

**Purpose of research.** In modern ventilation and air conditioning systems (VAC), one of the main components is an automatic control system (ACS) which performs various functions and also provides highly efficient operation in the range from shutdown functions to centralized regulation and control of climate parameters (temperature, humidity, monitoring concentrations of harmful substances, air speed). The goal is to study a mathematical model of heat flow control of a supply and exhaust ventilation system with a built-in integrated recuperative heat exchanger for the purpose of utilization of low-temperature heat of ventilation gases and emissions with the associated production of thermoelectricity.

**Methods.** To achieve these goals, we used methods of mathematical simulation and computational model development. The automatic control of VAC is based on the principle of feedback – regulation of processes by obtaining information from external sensors based on mathematical simulation of physical processes occurring in the building or structure serviced.

**Results.** An experimental supply and exhaust system with a plate heat exchanger-recuperator operates in a quasi-steady heat transfer mode. Exhaust air removed from the room is used as a heating medium. At the same time, the system is controlled using an independent scheme of connection to the heat supply system. The air heated in the room is considered as an incompressible gas, the heat exchange between the heating and heated heat transfer media is a steady-state process, the turbulence of the heating and heated flow of heat transfer media is isotropic. The result of the study is a mathematical model of heat flow control in the supply and exhaust ventilation system with a built-in integrated heat exchanger-recuperator. The optimal values of the heat energy consumed and the parameters of the ventilation system operation are obtained.

**Conclusion.** A mathematical model of heat flow control in a supply and exhaust ventilation system with a built-in integrated heat exchanger-recuperator is proposed and investigated. The optimal values of the consumed heat energy and the parameters of the ventilation system operation are obtained.

**Keywords:** supply and exhaust system; utilization; heat transfer coefficient; electrical power; efficiency; autonomy; ventilation gases; thermoelectricity.

**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 research work No. 1.12.20 f "Research of algorithms, models and methods for improving the efficiency of complex technical systems".

**For citation:** Yezhov V. S., Semicheva N. E., Tyutyunov D. N., Burtsev A. P., Perepelitsa N. S., Burtsev A. P. A Mathematical Model for Automated Heat Flow Control of an Energy-Efficient Ventilation System. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(1): 38-52 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-38-52>.

Received 14.01.2021

Accepted 02.02.2020

Published 31.03.2021

\*\*\*

## Введение

В современных системах вентиляции и кондиционирования (СКВ) одной из главных составляющих является система автоматического управления (САУ), выполняющая различные функции, а также обеспечивающая высокоэффективную работу в диапазоне от функций выключения до централизованного регулирования и управления климатическими параметрами (температура, влажность воздуха, контроль за концентрациями вредных веществ, скорость воздуха).

В основе автоматического управления СКВ положен принцип обратной связи – регулирования процессов за счет получения информации от внешних датчиков на основе математического моделирования физических процессов, происходящих в обслуживаемом здании или сооружении.

## Материалы и методы

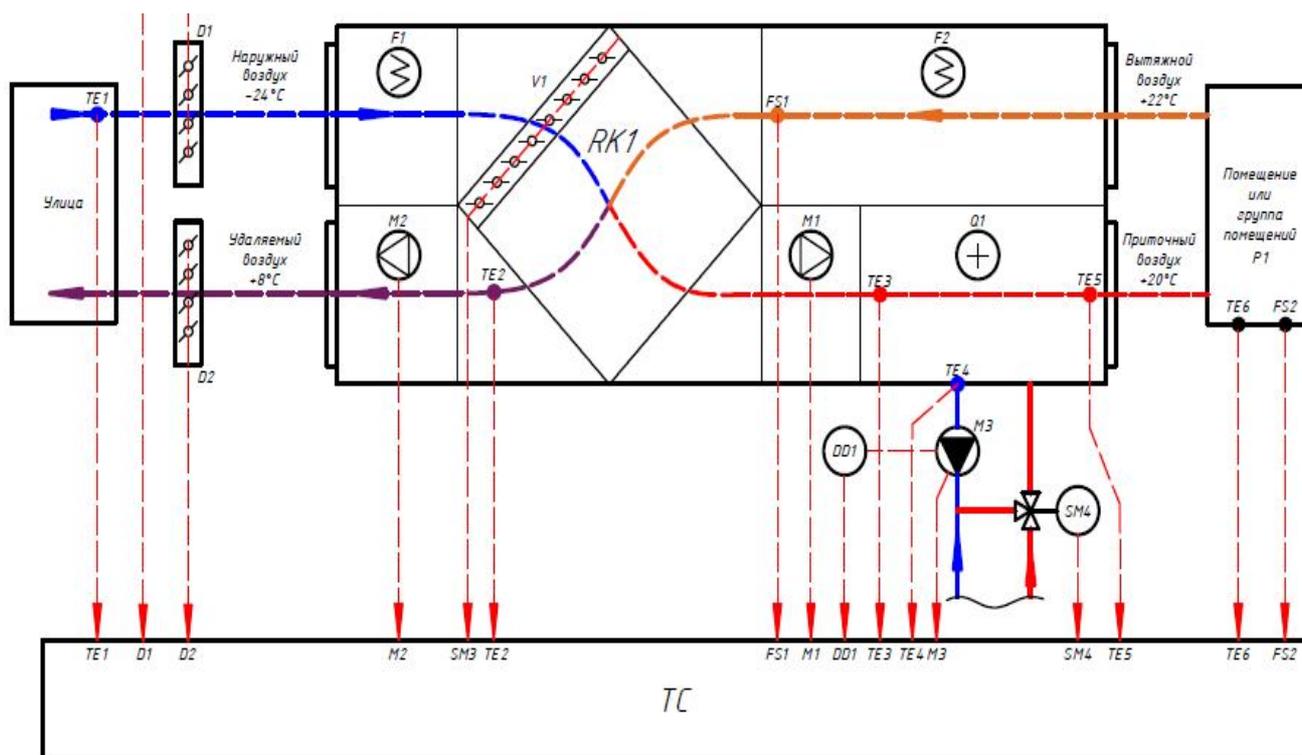
Принципиальная схема приточно-вытяжной механической вентиляционной системы с САУ приведена на рис. 1.

Исследуемая экспериментальная приточно-вытяжная с пластинчатым теплообменником-рекуператором система вентиляции, работающая в квазистационарном режиме теплопередачи, приведена на рис. 2.

В качестве нагревающей среды используется вытяжной воздух, удаляемый из помещения. При этом управление системой происходит при независимой схеме присоединения к системе теплоснабжения.

Нагреваемый в помещении воздух рассматривается как несжимаемый газ, теплообмен между нагревающим и нагреваемым теплоносителями является стационарным процессом, турбулентность нагревающего и нагреваемого потоков теплоносителей является изотропной.

Представим схему на рис.1 в упрощенном виде – рис. 2. с целью получения оптимального режима использования теплоты. В этом случае систему вентиляции помещения или групп помещений будем считать тепловой нагрузкой  $R$ , потребляющей тепло  $Q_1''$ .

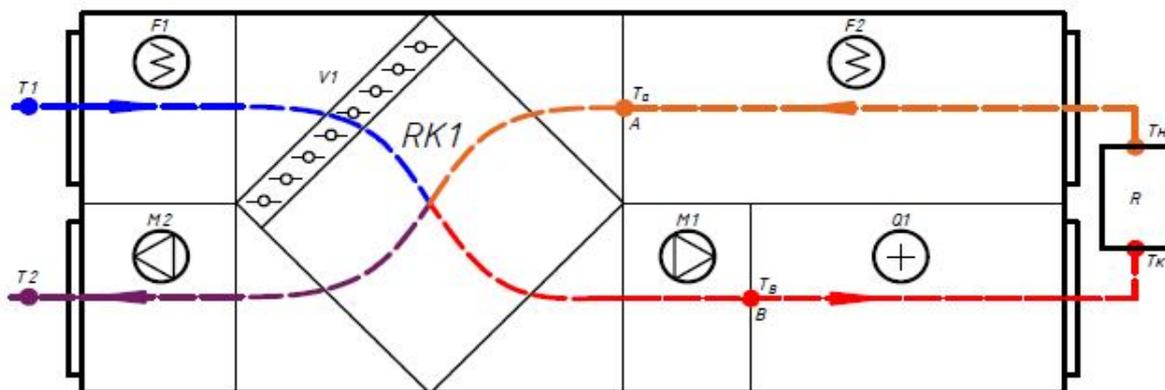


**Рис. 1.** Схема управления системой приточно-вытяжной вентиляции с рекуператором:

**TC** – контроллер; **D1** – заслонка приточного воздуха; **D2** – заслонка вытяжного воздуха; **F1** – фильтр приточный; **F2** – фильтр вытяжной; **M1** – приточный вентилятор; **M2** – вытяжной вентилятор; **P1** – панель управления; **V1** – регулирующая заслонка на входе в рекуператор; **Q1** – водяной калорифер; **FS1** – каналный датчик влажности; **FS2** – комнатный датчик влажности; **RK1** – пластинчатый рекуператор; **SM1, SM2** – электрический привод регулирующей заслонки; **SM3** – электрический привод байпаса; **SM4** – электрический привод 3-ходового клапана водяного нагревателя; **TE1** – датчик наружного воздуха; **TE2** – Датчик температуры воздуха после рекуператора; **TE3** – датчик температуры от обмерзания водяного нагревателя; **TE4** – датчик температуры обратного теплоносителя; **TE5** – каналный датчик температуры; **TE6** – комнатный датчик температуры; **DD1** – реле защиты от сухого хода; **M3** – циркуляционный насос водяного нагревателя

**Fig. 1.** Diagram of the control of the supply and exhaust ventilation system with a recuperator:

**TC** – controller; **D1** – supply air damper; **D2** – exhaust air damper; **F1** – supply air filter; **F2** – exhaust air filter; **M1** – forced draft fan; **M2** – induced fan; **P1** – control panel; **V1** – control valve at the recuperator inlet; **Q1** – hot water calorifier; **FS1** – duct humidity sensor; **FS2** – room humidity sensor; **RK1** – plate recuperator; **SM1, SM2** – adjustable damper electric drive; **SM3** – bypass electric drive; **SM4** – electric drive of water heater three way valve; **TE1** – outdoor air sensor; **TE2** – air temperature sensor upstream the recuperator; **TE3** – temperature sensor for anti-freezing of water heater; **TE4** – return heat carrier temperature sensor; **TE5** – duct temperature sensor; **TE6** – room temperature sensor; **DD1** – dry run protection relay; **M3** – water heater circulating pump



**Рис. 2.** Расчетная схема установки: **RK1** – рекуператор пластинчатый; **F1** – фильтр приточный; **F2** – фильтр вытяжной; **M1** – приточный вентилятор; **M2** – вытяжной вентилятор; **Q1** – водяной калорифер; **T1** и **T2** – температуры приточного и вытяжного воздуха. **T<sub>a</sub>** – температура воздуха в точке А на входе в пластинчатый теплообменник-рекуператор; **T<sub>b</sub>** – температура воздуха в точке В на выходе из пластинчатого теплообменника-рекуператора; **T<sub>к</sub>**, **T<sub>н</sub>** – соответственно температуры воздуха в обогреваемом помещении и на выходе из него; **V1** – регулирующая заслонка на входе в рекуператор; **R** – тепловая нагрузка на систему вентиляции для помещения или группы помещений

**Fig. 2.** Design diagram of the installation: **RK1** – plate recuperator; **F1** – supply filter; **F2** – exhaust filter; **M1** – forced draft fan; **M2** – induced fan; **Q1** – hot water calorifier; **T1** and **T2** – supply and exhaust air temperatures; **T<sub>a</sub>** – air temperature at point A at the inlet of the plate heat exchanger-recuperator; **T<sub>b</sub>** – air temperature at point B at the outlet of the plate heat exchanger-recuperator; **T<sub>к</sub>**, **T<sub>н</sub>** – air temperatures in the room heated and at the room exit correspondingly; **V1** – control valve at the recuperator inlet; **R** – thermal load on the ventilation system for a room or group of rooms

## Результаты и их обсуждение

Переданное количество теплоты (Вт) определяется по формуле

$$Q'' = \bar{\gamma} \cdot \bar{V}_{\text{кан}} \cdot (\bar{t}_{\text{ex}} - \bar{t}_{\text{вых}}) \cdot 10^3, \quad (1)$$

где  $\bar{\gamma}_e$  – объемная теплоемкость, кДж/(м<sup>3</sup> °С);  $G_{\text{кан}}$  – массовый расход в канале пластинчатого теплообменника-рекуператора, м<sup>3</sup>/ч;  $t_{\text{ex}}, t_{\text{вых}}$  – температуры горячего потока воздуха на входе и выходе из рекуператора, °С.

Это тепло можно использовать частично:  $Q_1''$  на подогрев наружного воздуха,  $Q_2''$  на получение термоЭДС:

$$Q'' = Q_1'' + Q_2''. \quad (2)$$

Слагаемые  $Q_1''$ ,  $Q_2''$  можно предста-

вить в виде:

$$Q_1'' = a_1 \cdot Q_1'' + a_2 \cdot Q_2'', \quad (3)$$

где  $a_1 = 0,85 \dots 0,88$ ;  $a_2 = 0,12 \dots 0,15$  соответственно доли компонентов  $Q_1''$ ,  $Q_2''$  в тепловом балансе (2).

Из уравнения (3) следует:

$$a_1 + a_2 = 1. \quad (4)$$

При наличии тепловой нагрузки  $R$  уравнение теплового баланса будет иметь вид:

$$Q_{\text{ex}} = Q_{\text{вых}}, \quad (5)$$

где  $Q_{\text{ex}}$ ,  $Q_{\text{вых}}$  – соответственно суммарные тепловые потоки на входе и выходе системы вентиляции.

При этом  $Q_{вых}$  в формуле (5) определяется как

$$Q_{вых} = Q_A + Q_M + Q_\phi + Q_V, \quad (6)$$

где  $Q_A, Q_M, Q_\phi, Q_V$  – тепловые потоки в вентилируемом помещении.

В выражении (6) справедливо соотношение:

$$Q_\phi = Q_V \approx 0. \quad (7)$$

При установке заслонки V1 и приточного вентилятора M1 (рис. 1-3) между приточным и вытяжным воздуховодами системы вентиляции в соответствии с требованиями следует учитывать расходы воздуха  $G_1, G_M$  и коэффициент смешения в точке А горячей и холодной и воздушных масс U:

$$U = \frac{T_1 - T_A}{T_A - T_2}. \quad (8)$$

Важно отметить, что расход воздуха в квазистационарном режиме имеет прямо пропорциональную зависимость от тепловых потоков:

$$Q_1 = G_1 \cdot c_1 \cdot (T_1 - T_2); \quad (9)$$

$$Q_M = G_M \cdot c_M \cdot (T_1 - T_2), \quad (10)$$

где температуры  $T_1$  и  $T_2$  приняты в интервале 15...65°C.

При этом можно считать, что удельные теплоемкости при постоянном давлении  $c_1$  и  $c_M$  – равны 1,005 кДж/кг·°С;  $G_1$  – расход воздуха в приточном воздуховоде, кг/с;  $G_M$  – расход воздуха через приточный вентилятор M1 и точке А.

Будем рассматривать согласованную работу заслонки V1 и приточного вентилятора M1 соответственно на их линейных участках MN, PL (рис. 3 и рис. 4).

Указанное согласование производится с учетом коэффициента смешения U:

$$Q_M = \mu \cdot U \cdot Q_1, \quad (11)$$

где  $\mu \geq 1, \mu = const$

Нагреваемый теплоноситель проходит через регулирующую заслонку V1 с долей открытия  $k_1$ , далее поток транспортируется вентилятором M1 с тепловой нагрузкой R, функционирующего с долей полной производительности приточного вентилятора M1,  $k_M$  – ( $0 \leq k_M \leq 1$ , при этом величины тепловых потоков  $Q_{1A}, Q_{MA}$  в точке А можно определить по формулам:

$$Q_{1A} = k_1 \cdot Q_1; \quad (12)$$

$$Q_{MA} = \mu \cdot U \cdot Q_1 \cdot k_1 \cdot k_M. \quad (13)$$

Тепловой поток вентилируемого помещения с теплотой R имеет температуру  $T_k = 293$  К ( $t_k = 20^\circ\text{C}$ ).

В квазистационарном режиме поток  $Q_k$  передается через стенку теплообменника-рекуператора, при этом уравнение будет иметь вид:

$$Q_k = k \cdot (T_k - T_n) \cdot F = k \cdot (t_k - t_n) \cdot F, \quad (14)$$

где  $T_n = t_n + 273$  – температура приточного воздуха в помещении;  $F$  – площадь внутренней поверхности рекуператора, м<sup>2</sup>,  $k$  – коэффициент теплопередачи рекуператора, Вт/м<sup>2</sup>·°С.

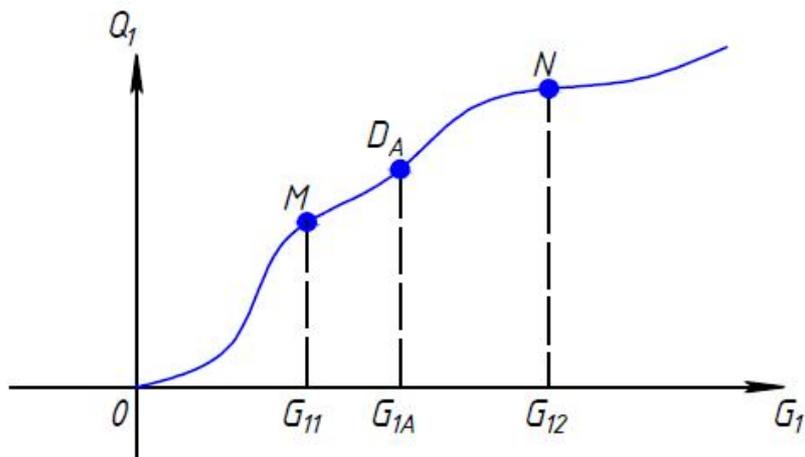


Рис. 3. Тепловая характеристика клапана V1

Fig. 3. Thermal characteristic of valve V1

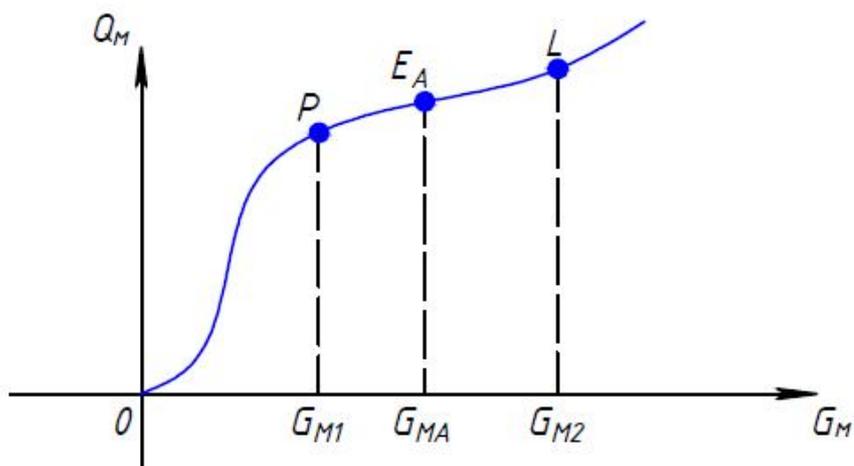


Рис. 4. Тепловая характеристика смесительного насоса M1

Fig. 4. Thermal characteristics of the M1 mixing pump

Процесс вентиляции в номинальном режиме является стационарным – с течением времени значения основных параметров не меняются. На основании этих особенностей, в уравнении теплового баланса необходимо учесть  $T_k - T_n = t_k - t_n$ :

$$Q_{\text{вых}} = Q_k + Q_2; \quad (15)$$

$$Q_{\text{вых}} = k \cdot (t_k - t_n) \cdot F + Q_2, \quad (16)$$

где  $Q_2 = \text{const}$ .

В итоге получим баланс в точке А:

$$k_1 \cdot Q_1 = \mu \cdot Q_1 \cdot U \cdot k_M \cdot k_M = k \cdot (t_k - t_n) \cdot F + Q_2. \quad (17)$$

$$k_1 \cdot Q_1 \cdot (1 + \mu \cdot U \cdot k_M) = k \cdot (t_k - t_n) \cdot F + Q_2. \quad (18)$$

Введем обозначение:

$$\frac{1}{Q_1} \cdot (k_1 \cdot (t_k - t_n) \cdot F + Q_2) = C = \text{const}. \quad (19)$$

Из (19) следует:

$$k_M = \frac{c}{\mu \cdot U \cdot K_1} - \frac{1}{\mu \cdot U}. \quad (20)$$

Обозначив:

$$a = \frac{c}{\mu \cdot U}; b = \frac{1}{\mu \cdot U}, \quad (21)$$

где  $a, b = \text{const}$ , получим

$$K_M = \frac{a}{k_1} - b, \quad (22)$$

где  $a > 0, b > 0$ , причем  $0 < K_1 \leq \frac{a}{b} \leq 1$ ,

т.к.  $0 < K_N \leq 1$ .

Графически зависимость (20) представлена на рис. 5 в виде семейства кривых I, II, III, причем  $t_{нI} < t_{нII} < t_{нIII}$ .

Коэффициенты  $k_M$  и  $k_1$  из выражения (22) связаны обратно пропорциональной зависимостью. С ростом температуры приточного воздуха  $t_n$  соответствующая кривая семейства приближается к оси абсцисс и пересекает

её в точке  $\frac{a}{b}$ . На рис. 6 кривым I, II, III

соответствуют температуры  $t_{нI} < t_{нII} < t_{нIII}$ .

Данные  $T_1, T_2, T_M, U, Q_1, Q_2, F$  в номинальном режиме хранятся в ПЗУ (постоянно запоминающем устройстве), встроенном в ТС.

Проанализируем работу схемы на рис. 2, основываясь на уравнении теплового баланса (18). Будем полагать, что нарушения температурного напора  $\Delta T_{кн} = T_k - T_n$  при условии отсутствия внутренних источников тепла (холода) в вентилируемом помещении с тепловой нагрузкой R происходит за счет изменения температуры наружного воздуха  $T_n$  на некоторую величину  $\Delta T_n$ . Такая динамика соответственно приводит к изменению температуры  $T_k$ .

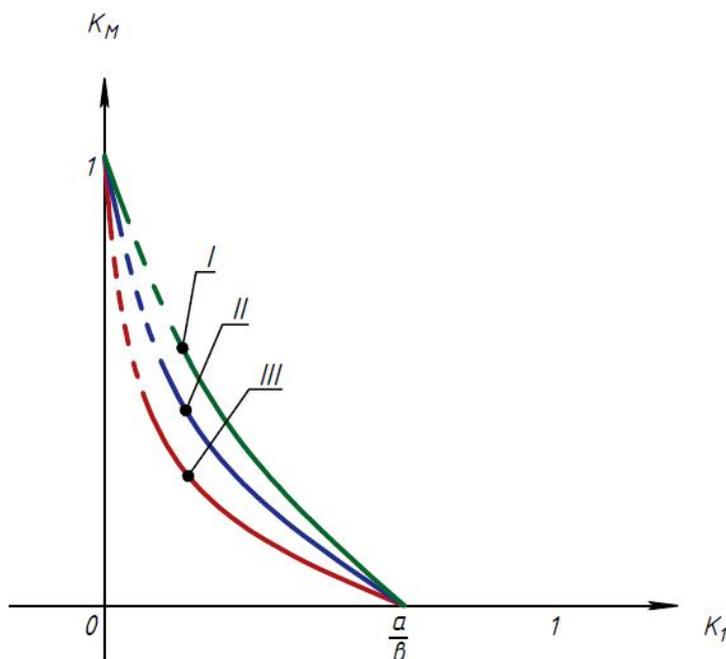


Рис. 5. Зависимость  $k_M$  от  $k_1$

Fig. 5.  $k_M$  Dependence on  $k_1$

Проведем исследование теплового баланса при изменении температурного режима в схеме на рис. 2. Допустим, что температура приточного воздуха  $T_n$  уменьшилась на величину  $\Delta T_n$  градусов, что при неизменных положениях  $k_l$  и  $k_M$  приведем к понижению температуры тепловой нагрузки R на величину  $\Delta T_k$  градусов. Для восстановления теплового баланса достаточно увеличить долю  $k_l$  полного открытия клапана V1 на величину  $\Delta k_l$  соответственно уменьшить долю  $k_M$  полной производительности смешительного насоса M1 на величину  $\Delta k_M$ :

$$Q_1 \cdot (k_1 - \Delta k_1) \cdot (1 + \mu \cdot U \cdot (k_M - \Delta k_M)) = k \cdot ((T_k - \Delta T_k) - (T_n - \Delta T_n)) \cdot F + Q_2. \quad (23)$$

В предельном случае при полной остановке работы насоса N1 ( $\Delta k_M=0$ ) имеем:

$$\Delta k_1 = \frac{k \cdot F \cdot (\Delta T_n - \Delta T_k)}{Q_1 \cdot (1 + \mu \cdot U \cdot k_1)}. \quad (24)$$

Если учесть, что  $\Delta k_l \geq 0$ , то очевидно должно выполняться условие:

$$\Delta T_n \geq \Delta T_k. \quad (25)$$

Допустим, что температура приточного воздуха  $T_n$  увеличилась на  $\Delta T_k$  градусов, что при неизменных положениях  $k_l$  и  $k_M$  приведет к повышению температуры в помещении R на величину  $\Delta T_k$  градусов. В этом случае для восстановления теплового баланса достаточно увеличить долю  $k_M$  полной производительности приточного вентилятора M1 на величину  $\Delta k_M$  и соответственно уменьшить долю  $k_l$  полной производительности клапана V1 на величину  $\Delta k_l$ :

$$Q_1 \cdot (k_1 - \Delta k_1) \cdot (1 + \mu \cdot U \cdot (k_M + \Delta k_M)) = k \cdot (T_k + \Delta T_k) - (T_n + \Delta T_n) \cdot F + Q_2. \quad (26)$$

В предельном случае при полном закрытии клапана V1 ( $\Delta k_l=0$ ) имеем:

$$\Delta k_M = \frac{\Delta T_k - \Delta T_n}{Q_1 \cdot k_1 \cdot \mu \cdot U}, \quad (27)$$

где из требования  $\Delta k_M=0$  следует выполнение условия:

$$\Delta T_k \geq \Delta T_n. \quad (28)$$

Объединив соотношения (20-25), получим объединенную формулу управления тепловыми потоками:

$$\Delta k_1 = \pm \left( \frac{k \cdot F \cdot ((T_k \mp \Delta T_k) - (T_n \mp \Delta T_n)) + Q_2}{Q_1 \cdot (1 + \mu \cdot U \cdot (k_N \mp \Delta k_N))} - k_1 \right), \quad (29)$$

где верхние знаки «+» или «-» соответствуют падению  $T_n$  на величину  $\Delta T_n$ , нижние знаки «-» росту  $T_n$  на величину  $\Delta T_n$ . В обоих случаях  $\Delta T_n \geq 0$ ,  $\Delta T_k \geq 0$ .

Система ТС позволяет реализовать зависимость (24) в режиме реального времени с учетом момента запаздывания  $\tau$  достижения номинальной температуры  $T_k$ .

Рассмотрим вариант вентиляции с минимальными затратами энергии при сохранении номинальной температуры  $T_k$ . Учитывая выражения и данный перепад температур  $\Delta T_k = T_k - T_n$ , исследуем на локальный экстремум функцию:

$$F(k_1, k_M) = F(k_1) = k_1 + k_M = k_1 + \frac{a}{k_1} - f \rightarrow \min. \quad (30)$$

Продифференцируем выражение:

$$\frac{dF(k_1)}{dk_1} = 1 - \frac{a}{k_1^2}. \quad (31)$$

Определяем критические точки первого рода:

$$\frac{dF(k_1)}{dk_1} = 1 - \frac{a}{k_1^2} = 0 \Rightarrow \tag{32}$$

$$\Rightarrow k_{11} = -\sqrt{a}, k_{12} = \sqrt{a}.$$

Если учесть, что  $k_1 > 0$ , то следует оставить  $k_{12} = \sqrt{a}$ .

Из рис. 6 следует, что точка  $k_{12} = \sqrt{a}$  является точкой локального минимума. Опираясь на иллюстрацию графика второй производной функции  $F(k_1)$  на рис. 7, можно сделать вывод об отсутствии точек перегиба.

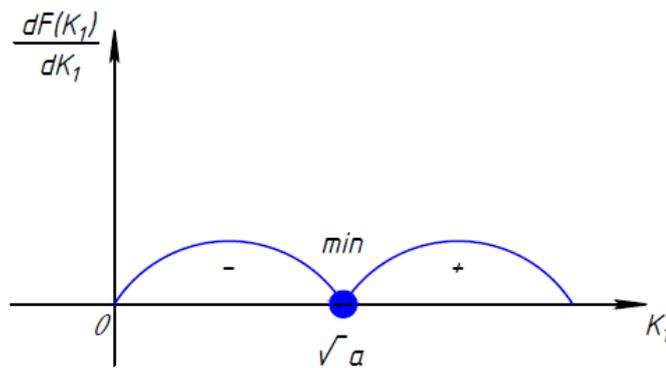


Рис. 6. Условие определения локального экстремума

Fig. 6. Condition for determining the local extremum

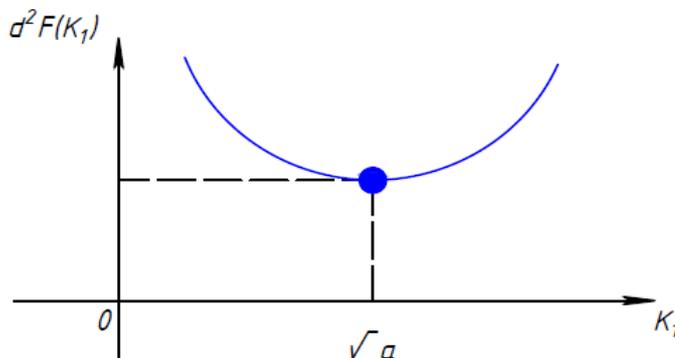


Рис. 7. Определение зависимости  $F''_{k_1, k_2}(k_1)$  на полуинтервале (0; 1]

Fig. 7. The definition of an addiction on the half-interval (0; 1].

Итак,  $F_{\min} = F(\sqrt{a}) = 2\sqrt{a} - b$ . С дру-

гой стороны:  $\frac{d^2F(k_1)}{dk_1^2} = F''_{k_1, k_2}(k_1) =$

$$= \left(1 - \frac{a}{k_1^2}\right)'_{k_1} = \frac{2a}{k_1^3} > 0, \text{ т.е. график функ-}$$

ции  $F(k_1)$  на интервале (0; 1].

**Выводы**

1. Предложена и исследована математическая модель управления тепловыми потоками в системе приточно-вытяжной вентиляции со встроенным комплексным теплообменником-рекуператором.

2. Получены оптимальные значения затрачиваемой тепловой энергии и параметров работы вентиляционной установки.

### Список литературы

1. Архипов Т. В. Автоматическое регулирование вентиляции и кондиционирования воздуха. М., 2012. 242 с.
2. Полевой А. А. Автоматизация холодильных установок и систем кондиционирования воздуха. М., 2011. 244 с.
3. Штокман Е. А., Скорик Т. А. Основы отопления и вентиляции. М.: Феникс, 2011. 352 с.
4. Гальперин Л.Г. Моделирование тепловых процессов. М., 2011. 112 с.
5. Федоров С.С., Тютюнов Д.Н., Ключева Н.В. К вопросу моделирования процесса управления системой теплоснабжения ресурсоэффективных зданий // Строительство и реконструкция. 2014. №1. С. 86-89.
6. Федоров С.С., Тютюнов Д.Н., Кобелев Н.С. Математическая модель системы автоматизированного регулирования параметров теплоносителя отапливаемых зданий, // Известия Курского государственного технического университета. 2010. №3(32). С. 40-44.
7. Федоров С.С., Тютюнов Д.Н., Кобелев Н.С. Алгоритм автоматического управления приводом системы отопления зданий и сооружений // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. №5, ч.2. С. 355-359.
8. Федоров С.С. Система управления процессом теплоснабжения при зависимом присоединении к тепловым сетям // Строительство и реконструкция. 2014. №5. С. 106-110.
9. Системы автоматизированного регулирования параметров теплоносителя отапливаемых зданий / С.С. Федоров, Н.С. Кобелев, В.А. Минко [и др.] // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2010. №4. С. 111-115.
10. Федоров С.С., Тютюнов Д.Н., Ключева Н.В. Управление системой отопления зданий с позиции ресурсосбережения // Строительство и реконструкция. 2013. №5. С. 36-39.
11. Бурцев А.П., Герасимов М.С. Разработка и применение схемы плавного пуска SOFT-START // Молодежь и наука: шаг к успеху: сборник научных статей 4-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых. Курск, 2020. С.60-64.
12. Бурцев А.П., Кочергин О.Б. Модернизация DC-DC преобразователя на базе микросхемы МТ3608 // Перспективное развитие науки, техники и технологий: сборник научных статей 10-ой Международной научно-практической конференции. Курск, 2020. С. 27-31.
13. Бурцев А.П. Создание схемы регулирования сигнала ШИМ на основе логической микросхемы // Молодежь и наука: шаг к успеху: сборник научных статей 4-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых. Курск, 2020. С. 257-260.

14. Исследование теплообмена в термоэлектрических преобразователях / В.С. Ежов, А.П. Бурцев., Н.С. Перепелица, А.П. Бурцев // Проектирование и строительство: сборник научных трудов 4-й Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров. Курск, 2020. С. 117-121.

15. Разработка методики определения характеристик конструкции комплексного пластинчатого теплообменника при утилизации низкопотенциального тепла сбросных газов и вентиляционных выбросов / В.С. Ежов, Н.Е. Семичева, А.П. Бурцев, Н.С. Перепелица, М.Е. Попова // Проблемы и перспективы развития России: молодежный взгляд в будущее: сборник научных трудов 2-й Всероссийской научной конференции. Курск, 2019. С. 178-182.

16. Ежов В.С., Бурцев А.П., Перепелица Н.С. Разработка инновационной конструкции автономного термоэлектрического источника ЭДС для использования в системах теплоснабжения // Молодежь и XXI век - 2020: сборник научных трудов 10-й Международной научной конференции. Курск, 2020. С. 245-248.

17. Basic calculation based on the direct conversion of the heat into electricity for IHP / Ezhov V., Brezhnev A., Burtsev A., Bredikhina N., Burtsev A. // Conference proceedings 7th international conference contemporary achievements in civil engineering. 23-24. April 2019. Subotica, SERBIA, 2019.

18. Разработка экспериментальной конструкции комплексного воздухоподогревателя для утилизации низкопотенциального тепла сбросных вентиляционных выбросов / В.С. Ежов, Н.Е. Семичева, А.П. Бурцев, Н.С. Перепелица, Д.А. Ермаков, А.П. Бурцев // Современные проблемы в строительстве: постановка задач и пути их решения: сборник научных статей Международной научно-практической конференции. Курск, 2019. С. 225-233.

19. Исследование процесса генерации термоэлектричества при утилизации низкопотенциального тепла сбросных газов / В.С. Ежов, Н.Е. Семичева, А.П. Бурцев, В.И. Зенченков, Д.А. Ермаков // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. №23(2). С. 74-84.

20. Ежов В.С., Семичева Н.Е., Бурцев А.П., Соколов С.М., Перепелица Н.С. Термоэлектрический источник электроснабжения для теплового пункта. Патент 2705348 РФ от 06.11.2019. 11 с.

## References

1. Arkhipov T. V. *Avtomaticheskoe regulirovanie ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukh* [Automatic regulation of ventilation and air conditioning]. Moscow, 2012. 242 p. (In Russ.).

2. Polevoy A. A. *Avtomatizatsiya kholodil'nykh ustanovok i sistem konditsionirovaniya vozdukh* [Automation of refrigeration units and air conditioning systems]. Moscow, 2011. 244 p. (In Russ.).

3. Shtokman E. A., Skorik T. A. *Osnovy otopleniya i ventilyatsii* [Fundamentals of heating and ventilation]. Moscow, 2011. 352 p. (In Russ.).

4. Galperin L. G. *Modelirovanie teplovykh protsessov* [Modeling of thermal processes]. Moscow, 2011. 112 p. (In Russ.).

5. Fedorov S. S., Tyutyunov D. N., Klyueva N. V. K voprosu modelirovaniya protsessa upravleniya sistemoi teplosnabzheniya resursoeffektivnykh zdanii [On the issue of modeling the process of controlling the heat supply system of resource-efficient buildings]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiy = Construction and Reconstruction*, 2014, no. 1, pp. 86-89 (In Russ.).

6. Fedorov S. S., Tyutyunov D. N., Kobelev N. S. Matematicheskaya model' sistemy avtomatizirovannogo regulirovaniya parametrov teplonositelya otaplivaemykh zdanii [Mathematical model of automated control of heat parameters of heated buildings]. *Izvestiya Kurskogo gosudarstvennogo technicheskogo universiteta = Proceedings of the Kursk State Technical University*, 2010, no.3(32), pp. 40-44 (In Russ.).

7. Fedorov S. S., Tyutyunov D. N., Kobelev N. S. Algoritm avtomaticheskogo upravleniya privodom sistemy otopleniya zdanii i sooruzhenii [An Algorithm for automatic drive control of the heating system of buildings and structures]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2011, no. 5, pt. 2, pp. 355-359 (In Russ.).

8. Fedorov S. S. Sistema upravleniya protsessom teplosnabzheniya pri zavisimom prisoedinenii k teplovyim setyam [Process control System of a heat supply at a dependent Association to calorific nets]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiy = Construction and Reconstruction*, 2014, no. 5, pp. 106-110 (In Russ.).

9. Fedorov S. S., Kobelev N. S., Minko V. A. et al. Sistemy avtomatizirovannogo regulirovaniya parametrov teplonositelya otaplivaemykh zdanii [Systems of automated regulation of parameters of the heat carrier of heated buildings]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova = Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*, 2010, no. 4, pp. 111-115 (In Russ.).

10. Fedorov S. S., Tyutyunov D. N., Klyueva N. V. Upravlenie sistemoi otopleniya zdanii s pozitsii resursosberezheniya [Management of the heating system of buildings from the position of resource saving]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiy = Construction and Reconstruction*, 2013, no. 5, pp. 36-39 (In Russ.).

11. Burtsev A. P., Gerasimov M. S. [Development and application of the SOFT-START soft-START scheme]. *Sbornik nauchnykh statei 4-i Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh "Molodezh' i nauka: shag k uspekh"* [Collection of scientific articles of the 4th All-Russian scientific conference of promising developments of young scientists "Youth and science: a step to success"]. Kursk, 2020, pp. 60-64 (In Russ.).

12. Burtsev A. P., Kochergin O. B. [Modernization of DC-DC converter based on MT3608 microchip]. *Sbornik nauchnykh statei 10-oi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Perspektivnoe razvitie nauki, tekhniki i tekhnologii"* [Collection

of scientific articles of the 10th International scientific and practical Conference "Perspective development of science, technology and technologies". Kursk, 2020, pp. 27-31 (In Russ.).

13. Burtsev A. P. [Creation of a PWM signal regulation scheme based on a logic chip]. *Sbornik nauchnykh statei 4-i Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh "Molodezh' i nauka: shag k uspekhu"* [Collection of scientific articles of the 4th All-Russian scientific conference of promising developments of young scientists "Youth and science: a step to success"]. Kursk, 2020, pp. 257-260 (In Russ.).

14. Yezhov V. S., Burtsev A. P., Perepelitsa N. S., Burtsev A. P. [Research of heat transfer in thermoelectric converters]. *Sbornik nauchnykh trudov 4-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov, magistrrov i bakalavrov "Proektirovanie i stroitel'stvo"* [Collection of scientific works of the 4th International scientific and practical conference of young scientists, postgraduates, masters and bachelors "Design and construction"]. Kursk, 2020, pp. 117-121 (In Russ.).

15. Ezhov V. S., Russia N. E. Burtsev A. P., Perepelitsa N. S., Popova M. E. [Development of methods for determining characteristics of the structure of an integrated plate exchanger in the utilization of low-grade heat waste gas and air emissions]. *Sbornik nauchnykh trudov 2-i Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii "Problemy i perspektivy razvitiya Rossii: molodezhnyi vzglyad v budushchee"* [Collection of scientific works of the 2nd Russian scientific conference "Problems and prospects of development of Russia: youth look to the future"]. Kursk, 2019, pp. 178-182 (In Russ.).

16. Ezhov V. S., Burtsev A. P., Perepelitsa N. S. [Development of an innovative design of an autonomous thermoelectric EMF source for use in heat supply systems]. *Sbornik nauchnykh trudov 10-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Molodezh' i XXI vek - 2020"*. [Collection of scientific works of the 10th International Scientific Conference "Youth and the XXI century-2020"]. Kursk, 2020, pp. 245-248 (In Russ.).

17. Ezhov V., Brezhnev A., Burtsev A., Bredikhina N., Burtsev A. Basic calculation based on the direct conversion of the heat into electricity for IHP [Basic calculation based on the direct conversion of the heat into electricity for IHP]. *Conference proceedings 7th international conference contemporary achievements in civil engineering*. Subotica, SERBIA, 2019.

18. Ezhov V. S., Semicheva N. E., Burtsev A. P., Perepelitsa N. S., Ermakov D. A., Burtsev A. P. [Development of an experimental design of a complex air heater for utilization of low-potential heat of waste ventilation emissions]. *Sbornik nauchnykh statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sovremennye problemy v stroitel'stve: postanovka zadach i puti ikh resheniya»* [Collection of scientific articles of the International scientific and practical Conference "Modern problems in construction: statement of tasks and ways of their solution"]. Kursk, 2019, pp. 225-233 (In Russ.).

19. Ezhov V. S., Semicheva N. E., Burtsev A. P., Zenchenkov V. I., Ermakov D. A. *Issledovanie protsessa generatsii termoelektrichestva pri utilizatsii nizkopotentsial'nogo tepla cbrosnykh gazov* [Investigation of the process of generating thermoelectricity in the utilization of

low-potential heat of waste gases]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2019, no.23(2), pp. 74-84 (In Russ.).

20. Ezhov V. S., Semicheva N. E., Burtsev A. P., Sokolov S. M., Perepelitsa N. S. *Termoelektricheskii istochnik elektrosnabzheniya dlya teplovogo punkta* [Thermoelectric power supply source for a thermal point]. Patent RF, no. 2705348, 2019. (In Russ.).

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Ежов Владимир Сергеевич**, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоводоснабжения, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, email: vl-ezhov@yandex.ru

**Семичева Наталья Евгеньевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоводоснабжения, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: nsemicheva@yandex.ru

**Тютюнов Дмитрий Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kaf.vm@mail.ru

**Бурцев Алексей Петрович**, аспирант кафедры теплогазоводоснабжения, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ap\_burtsev@mail.ru

**Перепелица Никита Сергеевич**, магистрант кафедры теплогазоводоснабжения, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: nikperepelicza@mail.ru

**Бурцев Александр Петрович**, студент кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: burtsev-999@mail.ru

**Vladimir S. Yezhov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vl-ezhov@yandex.ru

**Natalya E. Semicheva**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: nsemicheva@yandex.ru

**Dmitrij N. Tyutyunov**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Higher Mathematics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kaf.vm@mail.ru

**Alexey P. Burtsev**, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ap\_burtsev@mail.ru

**Nikita S. Perepelitsa**, Undergraduate, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: nikperepelicza@mail.ru

**Alexander P. Burtsev**, Student, Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: burtsev-999@mail.ru

## Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-53-65>



## Исследование степени интенсификации коэффициента массообмена теплоносителя в вихревом теплообменном аппарате системы отопления газорегуляторного пункта

Н.П. Григорова <sup>1</sup>, П.В. Монастырев <sup>2</sup>, Е.Г. Пахомова <sup>1</sup>, Н.Е. Семичева <sup>1</sup> ✉

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

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

✉ e-mail: kafedra-ipm@mail.ru

### Резюме

**Цель исследования.** Исследовать степень интенсификации коэффициента массообмена теплоносителя, контактируемого с «пятном» жидкости на поверхности лопасти завихрителя при его бомбардировке дисперсными загрязнениями в вихревом теплообменном аппарате с целью выявления закономерности, позволяющей получать расчетные значения коэффициента теплоотдачи теплоносителя, имеющие наилучшее согласование с полученными экспериментальными значениями, представленными в ранее опубликованных статьях.

**Методы.** Комплексный анализ степени интенсификации коэффициента массообмена теплоносителя на поверхности лопасти завихрителя в вихревом теплообменнике на основе известных теоретических положений и уравнений тепломассообменных процессов.

**Результаты.** Получена зависимость интенсификации коэффициента массообмена теплоносителя, контактируемого с «пятном» жидкости на поверхности лопасти завихрителя при его бомбардировке дисперсными загрязнениями, что позволяет получить наилучшее согласование расчетных и экспериментальных значений коэффициента теплоотдачи в вихревом теплообменнике газорегуляторного пункта.

**Заключение.** Значения коэффициента теплоотдачи теплоносителя, вычисленные с помощью полученной зависимости интенсификации коэффициента массообмена теплоносителя, имеют удовлетворительную сходимость с опытными данными, что позволяет использовать данную зависимость в инженерных расчетах конструктивных параметров вихревого теплообменного аппарата, используемого в качестве теплообменника для системы отопления производственного помещения газорегуляторного пункта. Данное техническое решение позволяет не только экономить природный газ как источник выработки тепловой энергии, но и снизить негативное воздействие на окружающую среду, так как нет необходимости в сжигании природного газа. В данном случае выработка тепловой энергии осуществляется за счет регулируемого перепада давления природного газа, поступающего из магистрали к потребителям.

**Ключевые слова:** производственное здание; газорегуляторный пункт; коэффициент теплоотдачи; вихревой теплообменный аппарат; природный газ.

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

© Григорова Н.П., Монастырев П.В., Пахомова Е.Г., Семичева Н.Е., 2021

**Для цитирования:** Исследование степени интенсификации коэффициента массообмена теплоносителя в вихревом теплообменном аппарате системы отопления газорегуляторного пункта // Н. П. Григорова, П. В. Монастырев, Е. Г. Пахомова, Н. Е. Семичева // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(1): 53-65. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-53-65>.

Поступила в редакцию 21.01.2021

Подписана в печать 17.02.2021

Опубликована 31.03.2021

## Investigation of the Degree of Augmentation of the Mass Transfer Coefficient of the Heat Transfer Medium in a Vortex Heat Exchanger of a Gas Pressure Regulating and Metering Station Heating System

Natalia P. Grigiriva <sup>1</sup>, Pavel V. Monastyrev <sup>2</sup>, Ekaterina G. Pakhomova <sup>1</sup>,  
Natalia E. Semicheva <sup>1</sup> ✉

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

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

✉ e-mail: kafedra-ipm@mail.ru

### Abstract

**Purpose of research.** is to investigate the degree of augmentation of the mass transfer coefficient of a heat transfer medium in contact with a "spot" of liquid on the surface of the vortex blade when it is bombarded with dispersed contaminants in a vortex heat exchanger in order to identify a pattern that allows obtaining design values of the heat transfer coefficient of the heat transfer medium that have the best agreement with the experimental values provided in previously published articles [4, 6, 7].

**Methods.** A complex analysis of the degree of augmentation of the mass transfer coefficient of the heat transfer medium on the surface of the vortex blade in a vortex heat exchanger based on the known theoretical positions and equations of heat and mass transfer processes.

**Results.** The dependence of the augmentation of the mass transfer coefficient of the heat transfer medium in contact with the "spot" of liquid on the surface of the vortex blade when it is bombarded with dispersed contaminants was obtained, which allows obtaining the best agreement of the design and experimental values of the heat transfer coefficient in the vortex heat exchanger of a gas pressure regulating and metering station.

**Conclusion.** The values of the heat transfer coefficient of the heat transfer medium calculated using the obtained dependence of the augmentation of the mass transfer coefficient of the heat transfer medium have a satisfactory convergence with the experimental data, which allows us to use this dependence in engineering calculations of the design parameters of the vortex heat exchanger used as a heat exchanger for the heating system of the working area of the gas pressure regulating and metering station. This technical solution allows not only saving natural gas as a source of heat generation, but also reducing the negative impact on the environment, since there is no need to burn natural gas. In this case, the production of thermal energy is carried out due to a regulated pressure drop of natural gas coming from the main line to consumers.

**Keywords:** working area; gas pressure regulating and metering station; heat transfer coefficient; vortex heat exchanger; natural gas.

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

**For citation:** Grigiriva N. P., Monastirev P. V., Pakhomova E. G., Semicheva N. E. Investigation of the Degree of Augmentation of the Mass Transfer Coefficient of the Heat Transfer Medium in a Vortex Heat Exchanger of a Gas Pressure Regulating and Metering Station Heating System. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(1): 53-65 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-53-65>.

Received 21.01.2021

Accepted 17.02.2021

Published 31.03.2021

\*\*\*

## Введение

На сегодняшний момент времени особенно актуальна проблема разработки научно-обоснованной технологии использования энергии сжатого природного газа в качестве источника тепловой энергии, в частности в системе отопления небольших производственных зданий.

Это связано с тем, что производство тепловой энергии при сжигании топлива крайне энергозатратно и тормозит внедрение политики ресурсосбережения и энергоэффективности.

Использование энергии сжатого природного газа в качестве источника выработки тепловой энергии в системе отопления производственного помещения газорегуляторного пункта возможно при применении вихревого теплообменного аппарата [1, 2], возможность использования которого доказана в статье [3], на основании теплотехнического расчета параметров конструкции вихревого теплообменника.

Расчетные и опытные значения коэффициента теплоотдачи теплоносителя на поверхности лопасти завихрителя в вихревом теплообменнике, а также относительная сходимость полученных результатов представлены в статьях [4, 5, 6, 7].

В данной статье представлено исследование степени интенсификации коэффициента массообмена теплоносителя, контактируемого с «пятном» жидкости на поверхности лопасти завихрителя при его бомбардировке дисперсными загрязнениями, которое позволило получить зависимость интенсификации коэффициента массообмена теплоносителя, позволяющую получать расчетные значения коэффициента теплоотдачи, имеющие наилучшее согласование со значениями, полученными экспериментальным путем.

## Материалы и методы

Вихревой теплообменник является контактным аппаратом, в котором под действием движущихся сил процесса тепломассообмена при термодинамическом расслоении природного газа осуществляется перемещение массы и энергии от одной среды (движущегося потока теплоносителя) к другой (жидкости, которая находится на поверхности лопасти завихрителя).

Процессы теплообмена подразделяются на следующие виды:

- явный, неосложнённый массообменом;
- тепломассообмен, теплообмен, осложнённый массообменом.

При этом считаем разность температур движущейся силой теплообмена, где  $\Delta t$  – температурный напор, который определяется среднеарифметическим или среднелогарифмическим методом и является частным случаем среднеинтегрального напора (при линейном распределении температур или при постоянном коэффициенте теплопередачи)<sup>1</sup>.

Определяемая по смоченному (мокрому) термометру разность температур  $t_M$  жидкости и теплоносителя является движущей силой теплообмена.

Термодинамической движущей силой процесса теплообмена является градиент химического потенциала среды [8].

В данном случае используется разность абсолютных влагосодержаний теплоносителя до и после контакта с «пятном» жидкости.

Отбираемое жидкостью количество тепла определяется по формуле

$$Q = W \cdot C_{p_{ж}} (t_{п.ж} - t_{и}), \quad (1)$$

где  $W$  – количество испаряющейся жидкости;

$C_{p_{ж}}$  – удельная, средняя за весь процесс теплоёмкость жидкости;

$t_{п.ж}$  – температура «пятна» жидкости;

$t_{и}$  – температуры испарения в пограничном слое.

Температура теплоносителя по смоченному термометру в течение процесса теплообмена изменяется от  $t_{1M}$  до  $t_{2M}$ , при этом количество теплоты, которое отдается теплоносителем, определяется как

$$Q = V_{в.г} \cdot \rho_{в.г} \cdot C_{p_{в.г}} (t_{1M} - t_{2M}), \quad (2)$$

где  $C_{p_{в.г}}$  – удельная, средняя за весь процесс теплоёмкость теплоносителя, приведённая к единице сухого теплоносителя:

$$C_{p_{в.г}} = C_{p_{с.г}} + \tau \frac{d_{в.г}}{\Delta t_{в.г}}, \quad (3)$$

где  $C_{p_{с.г}}$  – удельная теплоёмкость теплоносителя, постоянная для интервала температур практической эксплуатации газорегуляторного пункта;

$\Delta t_{в.г}$  – температурный напор теплоносителя, насыщенного мелкодисперсной влагой.

При контакте с «пятном» жидкости его влагосодержание изменяется от  $d_{1M}$  до  $d_{2M}$  (согласно соответствующим этому влагосодержанию температурам  $t_{1M}$  и  $t_{2M}$ ). В связи с разнонаправленностью процессов и полидисперсностью капель жидкости, изменение концентраций и температур в пограничном слое сред значительно неоднородно. Температура «пятна» жидкости  $t_{п.ж}$ , средняя за весь процесс, будет больше температуры испарения в пограничном слое  $t_{п.ж} < t_{и}$ , температура контактирующего теплоносителя снижается  $t_{в.г.1} > t_{в.г.2}$ . Следовательно, разность средних температур (температурный напор  $\Delta t = t_{п.ж} - t_{в.г.2}$ ) будет меньше начальной  $\Delta t < \Delta t_0$ .

<sup>1</sup> Прокофьев П.С. Совершенствование систем кондиционирования воздуха с использованием роторного утилизатора низкопотенциальной теплоты: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Волгоград, 2013. 19 с.

Отношение  $\Delta t/\Delta t_0$  определяет меру использования движущейся силы процесса тепломассообмена, что характеризует его интенсификацию. В пределах бесконечно малого изменения поверхности контакта  $dF$  можно считать средние температуры теплоносителя  $t_{в.г.}$  и «пятна» жидкости  $t_{п.ж.}$  постоянными, тогда:

$$\Delta t = t_{в.г.} - t_{п.ж.} \quad (4)$$

Бесконечно малое количество теплоты, которой обмениваются теплоноситель и «пятно» жидкости в пределах  $dF$ :

$$dQ = \alpha_{\kappa} \cdot \Delta t \cdot dF \quad (5)$$

«Пятно» жидкости примет от теплоносителя количество теплоты, тогда её температура увеличится на  $dt_{п.ж.}$ :

$$dQ = W \cdot C_{p_{ж.}} \cdot dt_{п.ж.} \quad (6)$$

Теплоноситель отдаёт теплоту, и его температура уменьшится на  $dt_{в.г.}$ :

$$dQ = V_{в.г.} \cdot \rho_{в.г.} \cdot C_{p_{в.г.}} \cdot dt_{в.г.} \quad (7)$$

Продифференцируем уравнение (4):

$$d(\Delta t) = dt_{в.г.} - dt_{п.ж.} \quad (8)$$

и найдём  $dt_{в.г.}$  и  $dt_{п.ж.}$  из уравнений (6) и (7):

$$dt_{в.г.} = -\frac{dQ}{V_{в.г.} \cdot \rho_{в.г.} \cdot C_{p_{в.г.}}}; \quad dt_{п.ж.} = \frac{dQ}{W \cdot C_{p_{ж.}}} \quad (9)$$

Подставляя  $dt_{в.г.}$  и  $dt_{п.ж.}$  в уравнение (8), имеем:

$$\begin{aligned} d(\Delta t) &= -\frac{dQ}{V_{в.г.} \cdot \rho_{в.г.} \cdot C_{p_{в.г.}}} + \frac{dQ}{W \cdot C_{p_{ж.}}} = \\ &= -dQ \left( \frac{1}{V_{в.г.} \cdot \rho_{в.г.} \cdot C_{p_{в.г.}}} - \frac{1}{W \cdot C_{p_{ж.}}} \right) = -m \cdot dQ, \\ dQ &= \frac{-d(\Delta t)}{m} \quad (10) \end{aligned}$$

Подставляя в уравнение (5)  $dQ$  из уравнения (10) и после разделения переменных, получим дифференциальное уравнение интенсификации теплообмена:

$$\frac{d(\Delta t)}{\Delta t} = -\alpha_{\kappa} \cdot m \cdot dF \quad (11)$$

Поверхность контакта на лопасти завихрителя обозначим через  $F_{\kappa}$ , а средний температурный напор – через  $\Delta t_{\kappa}$  [9].

В процессе интегрирования уравнения (11) по поверхности контакта  $F$  (в пределах от  $F=0$  до  $F=F_{\kappa}$  и, соответственно, в пределах от  $\Delta t=\Delta t_0$  до  $\Delta t=\Delta t_{\kappa}$ ) предполагаем, что средние за весь процесс  $\alpha_{\kappa}$  и  $m$  – постоянные величины на лопасти завихрителя вихревого теплообменного аппарата.

$$\int_{\Delta t_0}^{\Delta t_{\kappa}} \frac{d(\Delta t)}{\Delta t} = -\alpha_{\kappa} \cdot m \int_0^{F_{\kappa}} dF \quad (12)$$

После интегрирования получим:

$$\frac{\Delta t_{\kappa}}{\Delta t} = e^{-\alpha_{\kappa} \cdot m \cdot F_{\kappa}} \quad (13)$$

Таким образом, уравнение (13) с уравнением теплового баланса и состоянием сред для расчёта явного теплообмена являются достаточными, так как составляют замкнутую систему.

Как уже отмечалось, под зеркалом «пятна» жидкости процесс теплообмена протекает совместно с процессом массообмена. В результате усложняется расчёт коэффициента тепломассообмена ( $\chi_{см}$ ), удельной теплоёмкостью парогазовой смеси и движущейся силой процесса.

Приведём вывод уравнения интенсификации теплообмена по методике, используемой для теплообмена [10]:

$$\Delta t_{п.ж-и} = t_{п.ж} - t_{и}. \quad (14)$$

$$dQ = \alpha_M \Delta t_{п.ж} dF. \quad (15)$$

$$dQ = -W \cdot Cp_{ж} dt_{и}. \quad (16)$$

$$dQ = V_{в.г} \rho_{в.г} Cp_{в.г} dt_{в.г}. \quad (17)$$

Дифференцируем уравнение (14):

$$d(\Delta t_{п.ж-и}) = dt_{п.ж} - dt_{и}. \quad (18)$$

Из уравнений (16) и (17) находим:

$$dt_{в.г} = -\frac{dQ}{V_{в.г} \rho_{в.г} Cp_{в.г}} = -dQ \left( \frac{1}{W \cdot Cp_{ж}} - \frac{1}{V_{в.г} \rho_{в.г} Cp_{в.г}} \right) = -m_M dQ, \quad (19)$$

$$\text{где } m_M = \frac{1}{W \cdot Cp_{ж}} + \frac{1}{V_{в.г} \rho_{в.г} Cp_{в.г}},$$

тогда:

$$dQ = -\frac{d(\Delta t_{п.ж-и})}{m_M}. \quad (20)$$

После подстановки  $dQ$  в уравнение (15) и разделяя переменные получаем дифференциальное уравнение интенсификации теплообмена [11]:

$$\frac{d(\Delta t_{п.ж-и})}{\Delta t_{п.ж-и}} = -\alpha_M m_M dF, \quad (21)$$

интегрируем:

$$\int_{\Delta t_{п.ж-и}^M}^{\Delta t_{п.ж-и}^K} \frac{d(\Delta t_{п.ж-и})}{\Delta t_{п.ж-и}} = -\alpha_M m_M \int_0^F dF, \quad (22)$$

где  $\Delta t_{п.ж-и}^M$  и  $\Delta t_{п.ж-и}^K$  – температурный напор в начале процесса теплообмена и массообмена и по истечении некоторого времени.

$$\frac{\Delta t_{п.ж-и}^K}{\Delta t_{п.ж-и}^M} = e^{-\alpha_M m_M F_k}. \quad (23)$$

Для процессов теплообмена при непосредственном контакте различных сред (жидкости и природного газа в качестве теплоносителя) характерны небольшие скорости (до 10 м/с) теплоносителя, разности температур, концентрации давлений, что позволяет существенно упростить дифференциальные уравнения переноса массы и энергии в пограничном слое природного газа и «пятна» жидкости; в том числе пренебречь эффектами термо- и бародиффузии, работой внешних сил и диссипацией энергии<sup>1</sup>.

Из уравнения (23) по начальным параметрам контактируемых сред можно определить конечную температуру теплоносителя на выходе из вихревого теплообменного аппарата.

Коэффициент интенсификации массообмена  $\alpha_{ин}$  определяется из полуэмпирического выражения путём решения критериального уравнения, полученного на основе опытных данных и справедливой в подтверждённых опытами пределах измерения определённых чисел подобия.

В контактных теплообменных аппаратах  $\alpha_{ин}$  является функцией двух переменных [12, 13]:

$$\alpha_{ин} = f(\text{Re}, \text{Pr}) \quad (24)$$

и определяет взаимосвязь между количеством используемой жидкости и

<sup>1</sup> Терехов В.И. Аэродинамика и теплообмен в ограниченных закрученных потоках: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 1987. 32 с.

расходом теплоносителя, находящуюся из уравнения:

$$\alpha_{\text{ин}} = \frac{W \cdot C_{p_{\text{ж}}} + V_{\text{в.г}} \rho_{\text{в.г}} C_{p_{\text{в.г}}}}{V_{\text{в.г}} \rho_{\text{в.г}} C_{p_{\text{в.г}}}}. \quad (25)$$

Уравнение (25) по своему физическому смыслу есть отношение теплового (водяного) эквивалента системы «вода-газ» к тепловому эквиваленту теплоносителю (газу) и характеризует идеализированный процесс, когда в контактируемом с водой природном газе отсутствуют загрязнения, изменяющие тепломассообмен между средами.

Как уже отмечалось, специфика транспортировки по трубопроводам природного газа, насыщенного водой, стимулирует перемещение в них массы твёрдых частиц в виде ржавчины и окалины. В этом случае коэффициент степени интенсификации массообмена выразится соотношением [14, 15]:

$$\alpha_{\text{ин}} = \frac{C_{p_{\text{ж}}}(W + d_r V_{\text{в.г}}) + V_{\text{в.г}} \rho_{\text{в.г}} C_{p_{\text{в.г}}}}{V_{\text{в.г}} \rho_{\text{в.г}} C_{p_{\text{в.г}}}}. \quad (26)$$

## Результаты и их обсуждение

Полученное выражение (26) для определения степени интенсификации массообмена теплоносителя на лопасти завихрителя в результате бомбардировки дисперсными загрязнениями позволяет наиболее точно рассчитать коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{\text{см}}$  в вихревом теплообменном аппарате, расположенном в помещении газорегуляторного пункта, который находится из уравнения

$$\alpha_{\text{см}} = \alpha_{\text{ин}}^{0,87} \cdot \alpha_{\text{к}}, \quad (27)$$

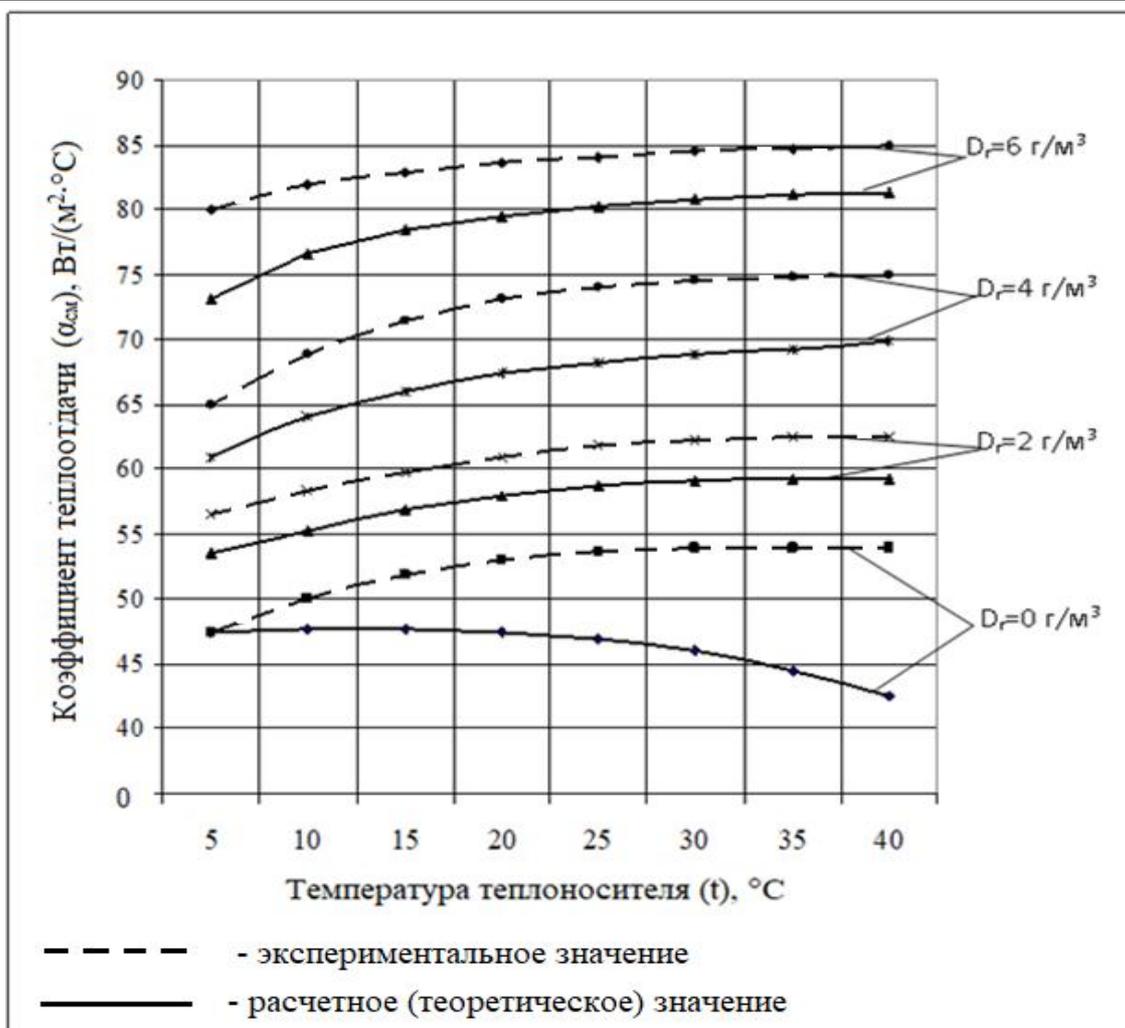
или в развёрнутом виде:

$$\alpha_{\text{см}} = 0,0228 \left[ \frac{C_{p_{\text{ж}}}(W + d_r V_{\text{в.г}}) + V_{\text{в.г}} \rho_{\text{в.г}} C_{p_{\text{в.г}}}}{V_{\text{в.г}} \rho_{\text{в.г}} C_{p_{\text{в.г}}}} \right] \times \left( \frac{\rho_{\text{в.г}} V_{\text{в.г}}}{T_{\text{в.г}}} \right)^{0,8} \left( \frac{\lambda_{\text{в.г}}}{d_{\text{в.г}}^{1,8} \rho_{\text{в.г}}^{0,47} \sigma_{\text{в.г}}^{0,47}} \right). \quad (28)$$

Для проверки адекватности полученной формулы (28) проведен анализ серии опытов в лабораторных условиях на экспериментальной установке. Данное исследование позволило графоаналитическим методом обработки экспериментальных данных по тепломассообмену с использованием теоретических разработок проверить полученную расчетную зависимость коэффициента теплоотдачи теплоносителя на поверхности лопасти завихрителя при его бомбардировке дисперсными загрязнениями в вихревом теплообменном аппарате газорегуляторного пункта [16, 17, 18].

Полученные результаты экспериментальных исследований и их сравнительная характеристика с расчетными значениями, полученными по зависимости (28) для расчета коэффициента теплоотдачи теплоносителя на поверхности лопасти завихрителя в вихревом теплообменнике газорегуляторного пункта, представлены на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что значения коэффициента теплоотдачи теплоносителя на поверхности лопасти завихрителя в вихревом теплообменнике, полученные с помощью расчетной зависимости (28), имеют относительную сходимость со значениями, которые были получены в процессе экспериментальных исследований.



**Рис. 1.** Сравнительная характеристика опытных и расчётных значений коэффициента теплоотдачи теплоносителя в вихревом теплообменном аппарате

**Fig. 1.** Comparative characteristics of experimental and design values of the heat transfer coefficient of the coolant in a vortex heat exchanger

При этом средняя точность корреляции составляет 8%, а максимальная точность – не более 20% (доверительная вероятность составляет 0,98).

Это связано с тем, что в процессе проведения измерений присутствуют методологические, субъективные и инструментальные погрешности. В частности, для термометров с ценой деления 0,1 и 0,2°С абсолютная погрешность является основной инструментальной погрешностью.

С субъективным восприятием отсчетов на шкалах термометров непосредственно связана дополнительная погрешность измерений, которая принимается равной цене одного деления шкалы. Так,  $\pm 0,2^\circ\text{C}$  по основной абсолютной погрешности составляет  $\pm 0,4 \div \pm 0,2^\circ\text{C}$  и определяется классом точности 0,5 и пределами шкалы от  $0^\circ\text{C}$  до  $+50^\circ\text{C}$ .

Кроме того, необходимо учитывать и остальные погрешности измерений, в частности условия теплообмена изме-

ряемого прибора с окружающей средой, неточность установки прибора, в результате чего, абсолютная погрешность измерения прибора может составлять  $\pm 0,6^\circ\text{C}$ , а относительная погрешность может достигать  $\pm 15\%$ .

Остальные неучтенные погрешности, в частности методические, которые связаны с обработкой результатов, полученных по зависимости (28), составляют приблизительно 5%.

### Выводы

Значения коэффициента теплоотдачи теплоносителя, вычисленные с помощью полученной зависимости интенсификации коэффициента массообмена теплоносителя, имеют удовлетворительную сходимость с опытными дан-

ными, что позволяет использовать данную зависимость в инженерных расчетах конструктивных параметров вихревого теплообменного аппарата, используемого в качестве теплообменника для системы отопления помещения производственного помещения газорегуляторного пункта. Данное техническое решение позволяет не только экономить природный газ как источник выработки тепловой энергии, но и снизить негативное воздействие на окружающую среду, так как нет необходимости в сжигании природного газа. В данном случае выработка тепловой энергии осуществляется за счет регулируемого перепада давления природного газа, поступающего из магистрали к потребителям.

### Список литературы

1. Пат. 2615878 Российская Федерация, МПК F 28 D 7/10. Вихревой теплообменный элемент / Кобелев Н.С., Григорова Н.П. [и др.]; заявитель и патентообладатель Курск. гос. техн. ун-т. №2016110870; заявл. 04.07.2016; опубл. 11.04.2017, Бюл. № 11.
2. Пат. 2622340 Российская Федерация: МПК F 28 D 7/10. Вихревой теплообменный элемент / Кобелев Н.С., Григорова Н.П. [и др.]; заявитель и патентообладатель Курск. гос. техн. ун-т. №2016128870953; заявл. 15.07.2016; опубл. 14.06.2017, Бюл. № 17.
3. Теплотехнический расчет конструктивных параметров вихревого теплообменного аппарата системы отопления газорегуляторного пункта / Н.П. Григорова, П.В. Монастырев, Е.Г. Пахомова, Н.Е. Семичева // Журнал БСТ. Технология и организация строительства. Наука 2.1. 2020. №8. С. 45-49.
4. Experimental study of influence of fine drop moisture and contaminants in heat carrier on coefficient of heat removal of vortex heat exchanger of gas control station heating system / G. E. Pakhomova, N. P. Grigорова, P.V. Monastirev, N. E. Semicheva // Journal of Applied Engineering Science. 2020. No. 18(3). P. 427 - 431.

5. Аэродинамика и теплообмен закрученного потока природного газа в вихревом теплообменном аппарате системы отопления газорегуляторного пункта / Н.П. Григорова, П.В. Монастырев, Е.Г. Пахомова, Н.Е. Семичева // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(3): 99-110. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-99-110>
6. Характер движения элементарного объема газа в вихревом теплообменном аппарате системы отопления газорегуляторного пункта / Н.П. Григорова, П.В. Монастырев, Е. Г. Пахомова, Н. Е. Семичева // Бюллетень строительной техники (БСТ). 2020. № 11 (1035). С. 53-55.
7. Григорова Н.П., Монастырев П.В. Экспериментальное исследование влияния мелкодисперсной капельной влаги и загрязнений в теплоносителе на коэффициент теплоотдачи вихревого теплообменника системы отопления газорегуляторного пункта // Современные проблемы в строительстве: постановка задач и пути их решения: сборник научных статей Международной научно-практической конференции / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2020. С. 139-141.
8. Седов А.И. Механика сплошных сред. М.: Наука, 1980. 348 с.
9. Сударев А.В., Кузнецов Л.А. Теплопередача закрученной струи воздуха при движении по внутренней поверхности цилиндра // Энергомашиностроение. 1968. №1. С. 18-21.
10. Уонг Ч. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: справочник. М.: Атомиздат, 1979. 216 с.
11. Третьяков В.В., Ягодкин В.И. Применение двухпараметрических моделей турбулентности для расчёта закрученных течений // Вихревой эффект и его применение в технике. Куйбышев, 1984. С. 233-238.
12. Хаузен Х. Теплопередача при противотоке, прямотоке и перекрёстном токе. М.: Энергоиздат, 1981. 384 с.
13. Щукин В.К., Халатов А.А. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах. М.: Машиностроение, 1982. 200 с.
14. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982. 472 с.
15. Халатов А.А. Теория и практика закрученных потоков. Киев: Наук. думка, 1989. 192 с.
16. Таубман Е.М. [и др.]. Контактные теплообменники М.: Химия, 1987. 256 с.
17. Халатов А.А. Новый критерий гидродинамического подобия внутренних закрученных потоков и результаты обобщения опытных данных // *Turbulenzmobelle und ihre Anwendung in der Technik*. Berlin, 1982. С. 38-42.

18. Щукин В.К., Халатов А.А., Летягин В.Г. Экспериментальное исследование структуры пристенного течения в потоке с начальной закруткой // Изв. вузов. Авиационная техника. 1991. С. 267-271.

## References

1. Kobelev N. S., Grigorova N. P. e. a.; *Vikhrevoi teploobmennyy element* [Vortical heat exchange element]. Patent RF, no. 2016110870, 2016.

2. Kobelev N. S., Grigorova N. P. e. a.; *Vikhrevoi teploobmennyy element* [Vortical heat exchange element]. Patent RF, no. 2016128870953, 2017.

3. Grigorova N. P., Monastyrev P. V., Pakhomova E. G., Semicheva N. E. Teplootekhnicheskii raschet konstruktivnykh parametrov vikhrevogo teploobmennogo apparata sistemy otopleniya gazoregulyatornogo punkta [Teplotekhnicheskyy raschet konstruktivnykh parametry vortirevogo heat exchanger of the heating system of the gas-regulating point]. *Zhurnal BST. Tekhnologiya i organizatsiya stroitel'stva. Nauka 2.1 = Technology and Organization of Construction. Nauka 2.1*, 2020, no. 8, pp. 45-49 (In Russ.).

4. Pakhomova, G. E., Grigorova N. P, Monastyrev P. V., Semicheva N. E. Experimental study of influence of fine drop moisture and contaminants in heat carrier on coefficient of heat removal of vortex heat exchanger of gas control station heating system. *Journal of Applied Engineering Science*, 2020, no. 18(3), pp. 427 - 431.

5. Grigorov N. P., Monastyrev P. V., Pakhomova E. G., Semicheva N. E. Aerodynamics and Heat Transfer of Swirling Natural Gas Flow in a Vortex Heat Exchanger of the Heating System of a Gas Control Point. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(3): 99-110 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-99-110>.

6. Grigorova, N. P., Monastyrev P. V., Pakhomova E. G., Semicheva N. E. Kharakter dvizheniya elementarnogo ob"ema gaza v vikhrevom teploobmennom apparate sistemy otopleniya gazoregulyatornogo punkta [The Nature of the motion of a particle in a vortex gas heat exchanger heating system gas control unit. *Byulleten' stroitel'noi tekhniki (BST) = Building Technical (BST)*, 2020, no. 11 (1035), pp. 53-55 (In Russ.).

7. Grigorova N. P., Monastyrev P. V. [Experimental study of the influence of fine-dispersed droplet moisture and pollution in the heat carrier on the heat transfer coefficient of the vortex heat exchanger of the gas-regulating point heating system]. *Sovremennye problemy v stroitel'stve: postanovka zadach i puti ikh resheniya. Sbornik nauchnykh statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Modern problems in construction: setting tasks and ways to solve them. Collection of scientific articles of the International Scientific and Practical Conference]. Kursk, 2020, pp. 139-141 (In Russ.).

8. Sedov A. I. *Mekhanika sploshnykh sred* [Mechanics of continuous media]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 348 p. (In Russ.).
9. Sudarev A.V., Kuznetsov L. A. Teploperedacha zakruchennoi strui vozdukha pri dvizhenii po vnutrennei poverkhnosti tsilindra [Heat transfer of a swirled air jet when moving along the inner surface of the cylinder]. *Energomashinostroenie*, 1968, no. 1, pp. 18-21 (In Russ.).
10. Wong Ch. *Osnovnye formuly i dannye po teploobmenu dlya inzhenerov* [Basic formulas and data on heat exchange for engineers]. Moscow, Atomizdat Publ., 1979. 216 p. (In Russ.).
11. Tretyakov V. V. , Yagodkin V. I. [Application of two-parameter turbulence models for calculating swirling currents]. *Vikhrevoi effekt i ego primenenie v tekhnike* [Vortex effect and its application in engineering]. Kuibyshev, 1984, pp. 233-238 (In Russ.).
12. Khauzen H. *Teploperedacha pri protivotoke, pryamotoke i perekrestnom toke* [Heat transfer in counter-current, direct current and cross-current]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 384 p. (In Russ.).
13. Shchukin V. K., Khalatov A. A. *Teploobmen, massoobmen i gidrodinamika zakruchennykh potokov v osesimmetrichnykh kanalakh* [Heat transfer, mass transfer and hydrodynamics of swirling flows in axisymmetric channels]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 200 p. (In Russ.).
14. Zhukauskas A. A. *Konvektivnyi perenos v teploobmennikakh* [Convective transfer in heat exchangers]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 472 p. (In Russ.).
15. Khalatov A. A. *Teoriya i praktika zakruchennykh potokov* [Theory and practice of swirling flows]. Kiev, Nauk. dumka, 1989. 192 p. (In Russ.).
16. Taubman E. M. [et al.]. *Kontaktnye teploobmenniki* [Contact heat exchangers]. Moscow, Khimiya Publ., 1987. 256 p. (In Russ.).
17. Khalatov A. A. *Novyi kriterii gidrodinamicheskogo podobiya vnutrennikh zakruchennykh potokov i rezul'taty obobshcheniya opytnykh dannykh* [A new criterion for the hydrodynamic similarity of internal swirling flows and the results of generalization of experimental data]. *Turbulenzmobbelle und ihre Anwendung in der Technik*. Berlin, 1982, pp. 38-42 (In Russ.).
18. Shchukin V. K., Khalatov A. A., Letyagin V. G. *Eksperimental'noe issledovanie struktury pristenogo techeniya v potoke s nachal'noi zakrutkoi* [Experimental study of the structure of the wall flow in a flow with an initial twist. ov]. *Izv. vuzov. Aviatsionnaya tekhnika = Izv.vuz. Aviation Equipmen*, 1991, pp. 267-271 (In Russ.).

---

## Информация об авторах / Information about the Authors

**Григорова Наталья Павловна**, аспирант кафедры теплогазоводоснабжения, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kafedra-ipm@mail.ru

**Монастырев Павел Владиславович**, доктор технических наук, директор института Архитектуры, строительства и транспорта, Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация, e-mail: monasteryrev68@mail.ru

**Пахомова Екатерина Геннадьевна**, кандидат технических наук, доцент, декан факультета строительства и архитектуры, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: fsa\_dekanat@mail.ru

**Семичева Наталья Евгеньевна**, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой теплогазоводоснабжения, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kafedra-ipm@mail.ru

**Natalia P. Grigorova**, Post-Graduate Student, Department of Heat and Gas Supply, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kafedra-ipm@mail.ru

**Pavel V. Monastyrev**, Dr. of Sci. (Engineering), Director of the Institute of Architecture, Construction and Transport, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, e-mail: monasteryrev68@mail.ru

**Ekaterina G. Pakhomova**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Construction and Architecture Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: fsa\_dekanat@mail.ru

**Natalia Ye. Semicheva**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Heat and Gas Supply Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kafedra-ipm@mail.ru

## Использование спектральных ландшафтных индексов для детектирования препятствий в задачах навигации мобильных робототехнических платформ на сельскохозяйственных территориях

М.А. Астапова<sup>1</sup> ✉, Е.А. Аксаментов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук 14-я линия В.О., 39, г. Санкт-Петербург 199178, Российская Федерация

✉ e-mail: [marinaastapova55@gmail.com](mailto:marinaastapova55@gmail.com)

### Резюме

**Цель исследования.** Целью исследования является разработка алгоритма детектирования препятствий на ортофотоплане местности на основе анализа спектральных ландшафтных индексов для использования в задачах навигации мобильных робототехнических средств на сельскохозяйственных территориях.

**Методы.** В работе были рассмотрены следующие ландшафтные индексы, характеризующие объекты различного типа на карте, полученной методом спектральной аэрофотосъемки: нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI), нормализованный индекс различий застройки (NDBI), нормализованный разностный индекс воды (NDWI) и почвенный растительный индекс (SAVI). Данные индексы обеспечивают оценку четырех основных классов объектов на карте: растительный покров, постройки, водные объекты и почвенный покров. Был предложен алгоритм, обеспечивающий сегментацию зон на карте, являющихся непроходимыми для наземных робототехнических средств, с использованием мультиспектральных изображений и рассмотренных индексов.

**Результаты.** Каждое изображение представляется в виде цветовой карты на основе попиксельного расчета указанных индексов. При этом три индекса SAVI, NDWI, NDBI совмещаются (накладываются друг на друга), а затем из результирующего изображения вычитается NDVI слой, чтобы выделить проходимые зоны. Таким образом, была получена формула для получения маски препятствий на изображении. На выходе данный алгоритм позволяет обобщить результаты расчета всех выбранных индексов и построить маску препятствий на изображении. Для количественной оценки работы алгоритма был произведен расчет площади препятствий, найденной при помощи индексов на выборке размеченных вручную изображений. Эксперименты показывают, что разработанный алгоритм в среднем обеспечивает детектирование 85,47% от площади всех непроходимых зон на изображениях в вышеуказанных классах земного покрова.

**Заключение.** Разработан и протестирован алгоритм для автоматизированного детектирования препятствий на карте, полученной из спектрального ортофотоплана местности, для использования в задачах навигации мобильных робототехнических средств на сельскохозяйственных территориях. В дальнейшем для определения ровных грунтовых участков планируется модифицировать разработанное решение, используя улучшенный модифицированный почвенный индекс MSAVI.

**Ключевые слова:** мультиспектральные изображения; карты местности; сегментация неопределенных зон; индексы для обработки изображений.

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

**Для цитирования:** Астапова М.А., Аксаментов Е.А. Использование спектральных ландшафтных индексов для детектирования препятствий в задачах навигации мобильных робототехнических платформ на сельскохозяйственных территориях // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(1): 66-81. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-66-81>.

Поступила в редакцию 23.12.2020

Подписана в печать 12.02.2021

Опубликована 31.03.2021

## Use of Spectral Landscape Indices for Obstacle Detection in the Tasks of Mobile Robotic Platforms Navigation in Agricultural Areas

Marina A. Astapova <sup>1</sup> ✉, Egor A. Aksamentov <sup>1</sup>

<sup>1</sup> St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS),  
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,  
39, 14th Line, St. Petersburg 199178, Russian Federation

✉ e-mail: [marinaastapova55@gmail.com](mailto:marinaastapova55@gmail.com)

### Abstract

**Purpose or research** is to develop an algorithm for detecting obstacles on the orthophotomap based on the analysis of the spectral landscape indices in the tasks of mobile robotic equipment navigation in agricultural areas.

**Methods.** The following landscape indices characterizing objects of various types on a map obtained by spectral aerial photography have been considered in the paper: normalized difference vegetation index (NDVI), normalized building difference index (NDBI), normalized difference water index (NDWI), and soil-adjusted vegetation index (SAVI). These indices provide an assessment of the four main classes of objects on the map: vegetation, buildings, water bodies, and soil cover. An algorithm that provides the segmentation of zones on the map which are impassable for ground robotic means using multispectral images and the considered indices was proposed.

**Results.** Each image is presented in the form of a colour map based on the pixel-by-pixel calculation of the indicated indices. In this case, three indices, i.e. SAVI, NDWI, NDBI, are combined (superimposed on each other), and then the NDVI layer is subtracted from the resulting image to highlight the passable zones. Thus, a formula to obtain a mask of obstacles in the image was obtained. Hence, this algorithm allows generalizing the results of calculations for all selected indices and constructing a mask of obstacles in the image. For quantitative assessment of the algorithm execution, the area of obstacles was calculated using the indices on a sample of manually marked images. The experiments conducted show that the developed algorithm provides, on average, detection of 85.47 % of the area of all impassable zones in the images in the above classes of land cover.

**Conclusion.** An algorithm for the automated detection of obstacles on a map obtained from a spectral orthophotomap of the area for use in the tasks of mobile robotic equipment navigation in agricultural areas has been developed and tested. In the further research, to determine flat soil areas, it is planned to modify the developed solution using the improved modified soil-adjusted vegetation index (MSAVI).

**Keywords:** multispectral images; area maps; segmentation of undefined zones; indexes for image processing.

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

**For citation:** Astapova M. A., Aksamentov E. A. Use of Spectral Landscape Indices for Obstacle Detection in the Tasks of Mobile Robotic Platforms Navigation in Agricultural Areas. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(1): 66-81 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-66-81>.

Received 23.12.2020

Accepted 12.02.2021

Published 31.03.2021

\*\*\*

## Введение

Методы сегментации непроходимых зон и препятствий на картах местности служат для решения задачи планирования движения мобильных робототехнических комплексов (РТК) на различных территориях [1,2]. Для построения маршрута навигационная система РТК должна заранее знать план местности с отмеченными на нем участками, являющимися непроходимыми зонами при его движении [3,4,5]. Данные дистанционного зондирования являются первичными источниками, широко используемыми для обнаружения различных типов земного покрова и препятствий [1]. Часто для картирования земного покрова применяется анализ спектральных характеристик спутниковых изображений или изображений, полученных при помощи беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Поскольку все объекты на изображении имеют определенный спектральный контур, то возможно их использовать для выделения определенных типов сегментов [6]. В исследованиях, посвященных дистанционному зондированию, часто используются соотношения различных полос. Наиболее известный и распространенный способ

оценки ландшафта местности основывается на различных мультиспектральных индексах. Для проведения такой оценки необходимо выбрать несколько видов индексов, чтобы сегментировать различные типы земного покрова для планирования движения РТК.

## Материалы и методы

При движении РТК препятствиями могут являться различные объекты, водоемы, постройки, камни, и растительность. Нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI) [7], в основном, используется в аграрной отрасли для мониторинга растительности, оценки состояний почвы и т.д. В данной статье рассматривается применение индекса NDVI для поиска препятствий на аграрной местности для дальнейшего осуществления навигации РТК. Рассмотрим некоторые существующие решения в данной области.

В статье [8] предложен подход к локализации препятствий для решения задач навигации робототехнических комплексов на аграрных территориях. Разработанный подход основывается на комбинировании результатов расчета индексов NDVI и работы нейронной сети. Подход в среднем обеспечивает об-

наружение 88% общей площади всех препятствий. Для расчета NDVI используются красные и ближние инфракрасные полосы. В красной области спектра (0,6–0,7 мкм) лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, а в ближнем участке инфракрасной области (0,7–1,3 мкм) находится область максимального отражения энергии клеточной структурой листа. То есть высокая фотосинтетическая активность (связанная, как правило, с густой растительностью) ведет к более низким значениям коэффициентов отражения в красном спектре и большим значениям в ближней инфракрасной области [9]. Нездоровая или редкая растительность отражает больше видимого света и меньше ближнего инфракрасного света. С помощью индекса NDVI можно детектировать следующие типы препятствий для мобильных РТК – кустарники, деревья, высокая растительность. Нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI) выбран потому, что форма сравнения между инфракрасным диапазоном и красным диапазоном минимизирует условия освещенности, вызванные изменениями рельефа, атмосферных условий и облачного покрова, а также благодаря большому количеству исследований, посвященных данному индексу.

В исследовании [10] приведен эффективный анализ обнаружения водоемов с использованием показателей нормализованного разностного водного индекса (NDWI), полученных со спутника

Landsat-8 OLI. Водные объекты обладают высокой поглощающей способностью и низким уровнем излучения в диапазоне от видимого до инфракрасного диапазона длин волн. В индексе используются зеленые и ближние инфракрасные полосы изображений дистанционного зондирования. Растительность имеет гораздо меньшие значения, что позволяет легче отличать растительность от водоемов [11]. В работе был выбран именно этот индекс, так как он прост в использовании и один из немногих индексов воды, который сегментирует именно водоемы. В отличие от модифицированного нормализованного разностного индекса воды (MNDWI), индекса влагостойкости (MSI), индекса воды (WI) и водного стресса (WRI), которые позволяют количественно оценить физиологический стресс растений из-за потери воды, обнаруживая изменения относительного содержания воды в листьях.

Для мониторинга и обнаружения изменений земного покрова, которые часто в результате непрекращающейся урбанизации, также используются спутниковые снимки. Для решения задачи выявления городских построек был предложен нормированный разностный индекс (NDBI), который обеспечивает автоматизацию процесса картирования населенных пунктов [12]. В работе [13] предложены методы построения индекса и их применение для извлечения данных о строениях со спутниковых данных Sentinel 2A. Городские строения

часто путают с голой почвой и бесплодной землей, поэтому в работе анализировались некоторые индексы застройки (NDBI, IBI, NBI, NBAI, MBI, NDSV, BRBA, BAEI, NDISI, BCI, CBI) и их преимущества и ограничения. NDBI в отличие от остальных представленных индексов показал следующие преимущества: скорость вычисления, благодаря упрощенной формуле; высокие коэффициенты корреляции; эффективно увеличивает контраст интенсивности между голой почвой и городской поверхностью. NDBI индекс выделяет городскую застройку, в которой обычно наблюдается более высокая отражательная способность в коротковолновой инфракрасной (SWIR) области по сравнению с ближней инфракрасной (NIR) областью. Отрицательное значение NDBI представляет водные объекты, где в качестве более высокого значения представляют районы застройки. Значение NDBI для растительности низкое. NDBI применим к мультиспектральным изображениям с полосой SWIR между 1,55-1,75 мкм и полосой NIR между 0,76-0,9 мкм [14]. NDBI позволяет детектировать препятствия в виде городских застроек, искусственных объектов (дома, заборы, агропромышленная техника и т.п.). В исследовании [15] NDBI оказался наиболее эффективным, чем другие индексы застройки (EBBI, UI, NDBaI), при распознавании застроенных территорий. Точность сегментирования застройки составила в среднем 76,45%.

Последний тип земного покрова – это почва. Для выделения почвы существует индекс растительности с поправкой на почву (SAVI) в некоторой степени схож с NDVI, но использует коэффициент  $L$  для корректировки воздействия шума почвы, который влияет на результаты обработки данных [16]. Этот индекс применяется для засушливых районов с редкой растительностью (менее 15% от общей площади) и открытых поверхностей почвы. SAVI позволяет детектировать голый грунт, почву (овраги, ямы).

Для выделения почвы также существует модифицированный индекс растительности с поправкой на почву (MSAVI) [17]. MSAVI можно использовать в качестве параметра для отражения степени опустынивания земли [18]. На данном этапе работы применение этого индекса невозможно из-за низкого качества мультиспектрального изображения.

На основе вышепроведенного обзора были выбраны четыре индекса для проведения дальнейшего исследования. Выбранные индексы: NDBI, NDWI, NDVI, SAVI, позволяют сегментировать на изображениях различные типы земного покрова и выделять следующие неопределимые зоны: постройки, водоемы, растительность, голый грунт или почва. Для объединения результатов применения различных индексов к мультиспектральным изображениям был разработан алгоритм, который рассматривается далее.

Для решения задачи сегментации непроходимых зон для наземных РТК с помощью индексов NDVI, NDWI, NDBI, SAVI был разработан алгоритм, представленный на рис. 1.

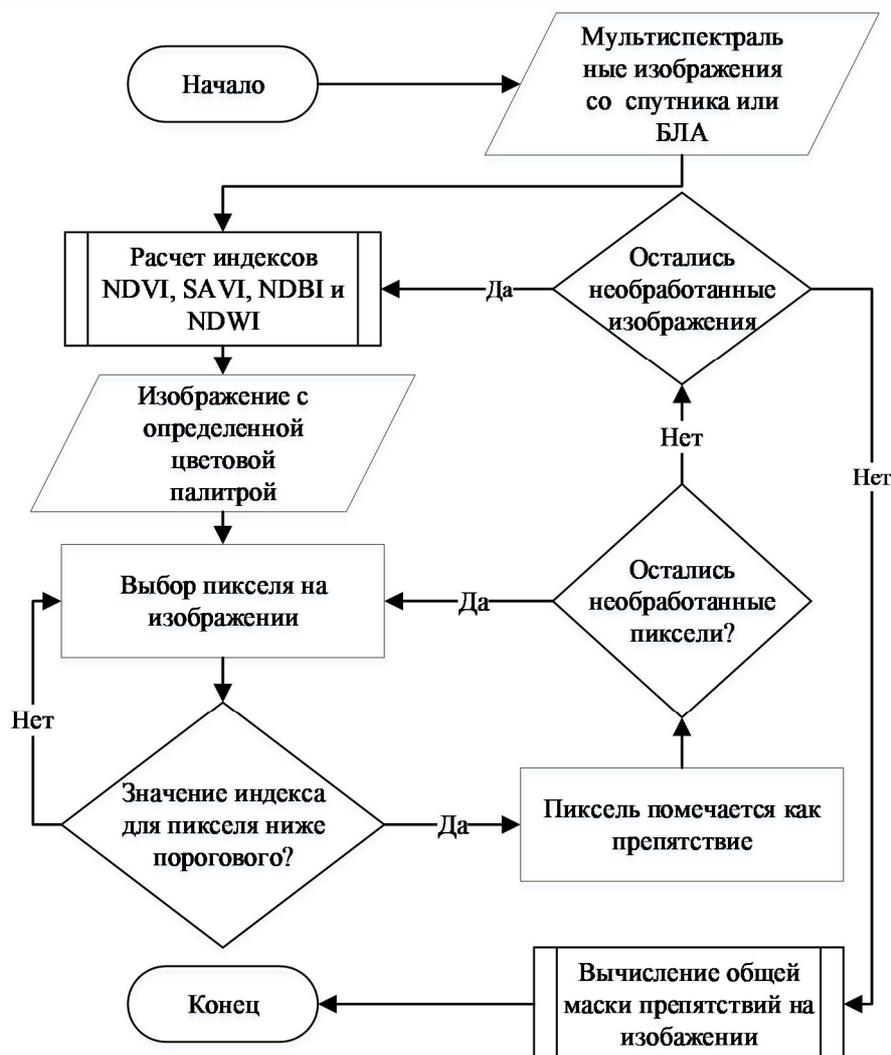


Рис. 1. Алгоритм детектирования препятствий при помощи вегетационных индексов

Fig. 1. Algorithm for detecting obstacles using vegetation indices

На вход алгоритма поступают мультиспектральные изображения со спутника или БПЛА. Для этих изображений рассчитываются выбранные индексы. Формула для расчета NDVI:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

где  $NIR$  – изображение в ближнем инфракрасном диапазоне (~833 нм),  $RED$  – изображение в красном диапазоне (~665 нм).

Значение индекса SAVI для пикселя принимаем  $< 0,1$  [19]. Формула для расчета SAVI:

$$SAVI = (1 + L) \cdot \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED + L)},$$

где  $L$  – поправочный коэффициент яркости почвы, такой, что  $0 \leq L \leq 1$ , (рекомендованный коэффициент от Sentinel Hub  $L = 0,48$ ).

Значения индекса NDWI для пикселя принимаем  $> 0,5$  [20]. Формула для расчета NDWI:

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR},$$

где  $GREEN$  – изображение в видимом (зеленом) диапазоне (~560 нм).

Значения индекса NDBI принимаем от 0,1 до 0,3 (площадь застройки) [21].

Формула для расчета NDBI:

$$NDBI = \frac{SWIR_1 - NIR}{SWIR_1 + NIR},$$

где  $SWIR_1$  – изображение в коротковолновом инфракрасном диапазоне (~1610 нм).

Далее выбирается значения индексов для пикселя. Значение индекса NDVI для пикселя принимаем  $> 0,2$ , так как растительные объекты лежат в диапазоне от 0,2 до 1 [22]. На основе полученных значений индекса выделяются

нерастительные участки, которые помечаются, как непроходимые зоны. NDVI индекс пиксель за пикселем вычитает значение красной полосы из значения NIR-полосы и делит на их сумму.

### Результаты и их обсуждение

Для сегментирования препятствий в работе был использован открытый источник для получения мультиспектральных изображений [23]. На рис. 2 представлен пример изображения, который будет в дальнейшем использоваться для исследования.



**Рис. 2.** Изображение территории в истинном цвете

**Fig. 2.** The true colour image of the territory

Для вычисления индексов SAVI, NDVI, NDWI, NDBI извлекались различные части из изображения (рис. 2), для которых применялась обработка по алгоритму детектирования препятствий,

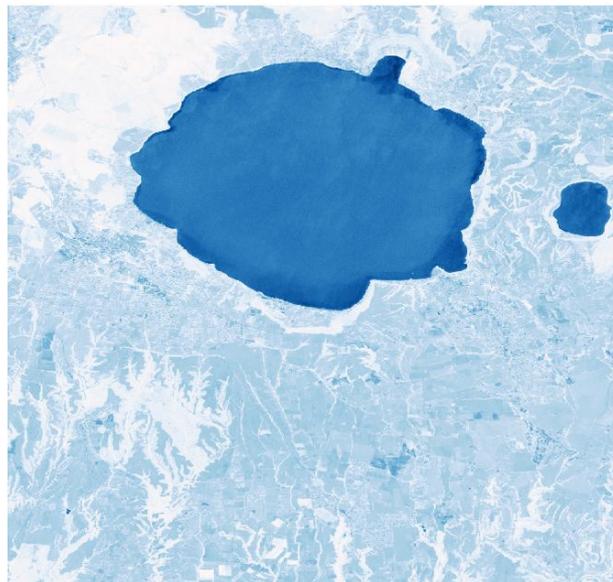
представленного на рис. 1. Рассчитанные индексы NDVI SAVI, NDWI, NDBI представлены в виде различных наборов цветовых карт (рис. 3). Для индекса NDVI использовалась цветовая карта –

«красно-зеленая», где зеленый цвет указывает на растительность, а красный – на нерастительные объекты [24]. Для SAVI была выбрана «бело-коричневая» цветовая карта, где коричневый цвет указывает на почву. Для представления

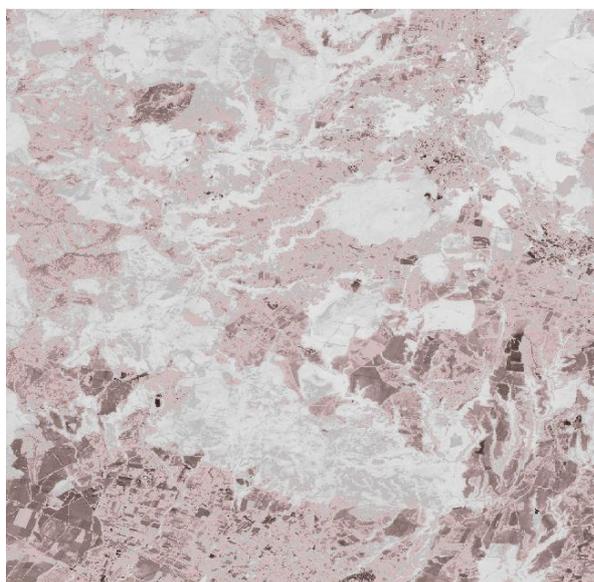
NDWI была выбрана цветовая «бело-синяя» карта, где синий – водоемы, а для NDBI применяли «черно-белую» карту, где черные оттенки указывают на зоны застройки.



а) NDVI-карта



б) NDWI-карта



в) SAVI-карта



г) NDBI-карта

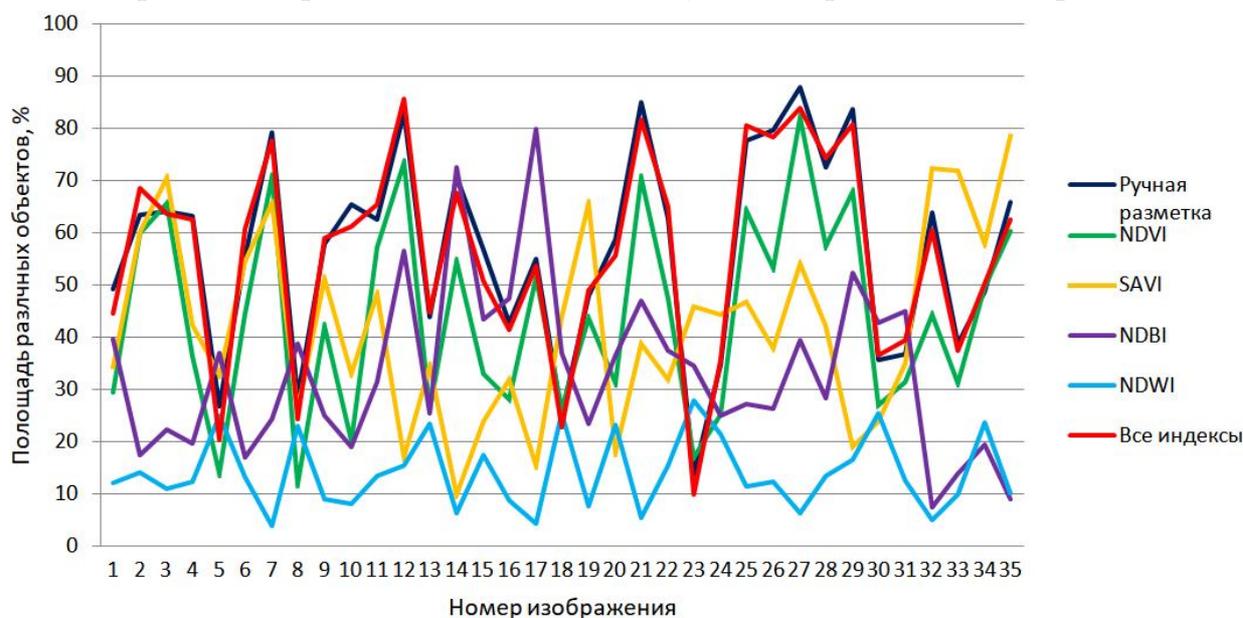
**Рис. 3.** Пример расчета индексов**Fig. 3.** Example of index calculation

На рис. 3а представлена SAVI-карта местности, коричневые оттенки палитры указывают на голый грунт и

почву. На рис. 3б представлена NDVI-карта местности, на которой зеленый цвет указывает на наличие раститель-

ных объектов на ее территории. На рис. 3в представлена NDWI-карта местности, где темно-синий цвет явно различимы различные водоемы. На рис. 3г представлена NDBI-карта местности, где черный цвет указывает наличие городских застроек (домов, дорог и т.п.).

Для количественной оценки работы алгоритма был произведен расчет площади препятствий, найденной при помощи индексов. Для этого вручную были размечены 35 изображений. Размеченные вручную данные были взяты в качестве эталонных значений. Для того чтобы определить процентное соотно-



**Рис. 4.** Сравнение площадей препятствий, найденных при помощи различных индексов, с эталонным значением

**Fig. 4.** Comparison of the areas of obstacles found using different indices with a reference value

На рис. 4 отдельно показаны четыре исследуемых индекса (зеленая, желтая, фиолетовая и синяя линии). Ручная разметка сегментирует все препятствия, в то время как индексы определяют только определенный тип местности (NDVI-растительность, NDWI-водоемы, NDBI-за-

шение территории занятой препятствиями к свободной был произведен расчет отношения суммарной площади, занимаемой препятствиями, ко всей площади изображения. Затем для исходных изображений был произведен поиск препятствий в отдельности каждым индексом.

Для сравнения площадей найденных неопределимых зон, посредством каждого из индексов, были вручную размечены изображения, которые представляют собой эталонные значения площади препятствий. Полученные результаты представлены на рис. 4.

стройки и SAVI-голый грунт/горная местность). Разработанный ранее алгоритм позволяет обобщить результаты расчета всех индексов и построить маску препятствий на изображении (*Mask*). NDVI индекс выделяется на графике среди остальных, так как он был ис-

пользован для того, чтобы движение РТК осуществлялось по траве, то есть растительности. В итоге, получается следующая последовательность действий: три обработанных индекса с определенным диапазоном пикселей SAVI, NDWI, NDBI совмещаются (накладываются друг на друга), а затем отнимается NDVI слой, чтобы выделить проходимые зоны. Полученная формула для получения маски *Mask* выглядит так:

$$Mask = 100 - (SAVI + NDWI + NDBI - NDVI).$$

На рис. 5 представлены примеры полученной карты местности. Использование индекса SAVI позволило определить в среднем 34%, NDBI – 26%, NDWI – 8%, а разработанный подход в среднем обеспечивает детектирование 85,47% от общей площади всех препятствий на изображении.

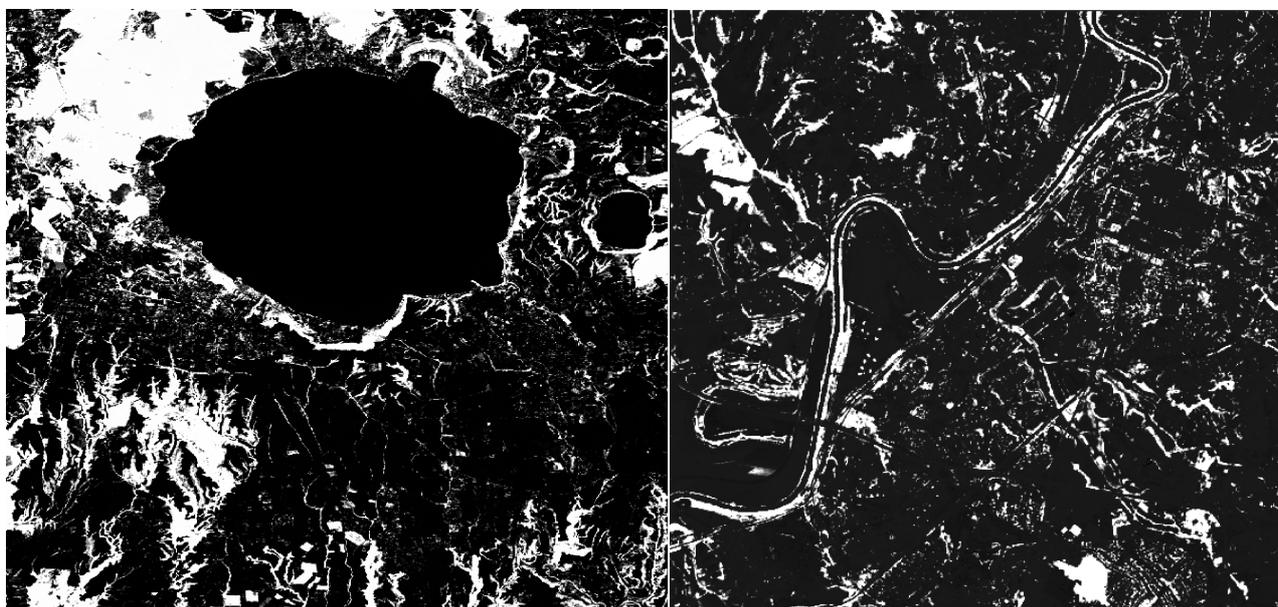


Рис. 5. Пример карты местности и маска препятствий

Fig. 5. Example of a map and an obstacle mask

В результате, объединение полученной информации позволяет представить карту местности в виде бинарного изображения, где черным отмечены возможные препятствия, а белым участки, где движение РТК разрешено. Преимуществом разработанного подхода является возможность сегментировать большую часть потенциальных типов препятствий еще до момента движения РТК. К недостаткам данного подхода

можно отнести случаи, когда NDVI индекс относит к растительности деревья, которые являются преградой для РТК. А также на аграрных территориях дороги не должны считаться препятствиями для движения РТК. Таким образом, возникает необходимость внедрения дополнительных методов для сегментации растительных объектов и дорог, к примеру, использование свёрточных нейронных сетей и высококачественных

снимков. Данный алгоритм можно улучшить, используя индекс SAVI для определения ровных грунтовых участков, так же, как и траву для движения РТК, но на данном этапе работы это невозможно из-за низкого качества мультиспектрального изображения.

## Выводы

В данной статье предложен алгоритм локализации препятствий в задаче навигации робототехнических комплексов. Основная идея заключается в использовании четырех индексов растительности, которые выделяют конкретные типы местности. Для поиска растительных типов препятствий использовался индекс NDVI, для водных препятствий – индекс NDWI, для застроенных участков индекс NDBI и для определения голого грунта или гористой местности индекс SAVI. Одновременное использование рассмотренных индексов позволило увеличить качество нахождения препятствий. Такой подход позволяет обобщить результаты расчета индексов и построить маску препятствий на изображении (*Mask*) и получить формулу. NDVI индекс был использован для того, чтобы движение РТК осуществлялось по траве, то есть растительности. В итоге, получается

следующая последовательность действий: три индекса SAVI, NDWI, NDBI совмещаются (накладываются друг на друга), а затем отнимается NDVI слой, чтобы выделить проходимые зоны. Разработанный алгоритм в среднем обеспечивает детектирование 85,47% от общей площади всех препятствий, в то время как индексы по отдельности определяют препятствия намного ниже, так как использование индекса SAVI позволило определить около 34% от общей площади препятствий, NDBI – 26%, NDWI – 8%. К недостаткам данного подхода можно отнести случаи, когда NDVI индекс относит к растительности деревья, которые являются преградой для РТК. Также на аграрных территориях дороги не должны считаться препятствиями. Таким образом, возникает необходимость внедрения дополнительных методов для сегментации некоторых классов растительных объектов и дорог. Для этих целей могут использоваться, к примеру, свёрточные нейронные сети. Данный алгоритм можно улучшить, используя индекс MSAVI для определения ровных грунтовых участков, однако для этого требуются мультиспектральные изображения более высокого качества.

## Список литературы

1. Approach to robotic mobile platform path planning upon analysis of aerial imaging data / E. Aksamentov, K. Zakharov, D. Tolopilo, E. Usina // Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics" Zavalishin's Readings". Springer, Singapore 2020. P. 93-103. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-5580-0\\_7](https://doi.org/10.1007/978-981-15-5580-0_7).

2. Endo T., Maeda R., Matsuno F. Stability Analysis of Swarm Heterogeneous Robots with Limited Field of View // Информатика и автоматизация. 2020. Vol. 19. №. 5. P. 942-966.

3. Zakharov K., Saveliev A., Sivchenko O. Energy-Efficient Path Planning Algorithm on Three-Dimensional Large-Scale Terrain Maps for Mobile Robots // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. Springer, Cham. 2020. P. 319-330.

4. Levonevskiy D., Karasev E., Aksamentov E. Architecture and Algorithms of Geospatial Service for Navigation of Robotic Complexes // Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics" Zavalishin's Readings". Springer, Singapore, 2020. P. 433-442.

5. Saveliev A., Aksamentov E., Karasev E. Automated terrain mapping based on mask R-CNN neural network // International Journal of Intelligent Unmanned Systems. 2020.

6. Szabó S., Gacsi Z., Balázs B. Specific features of NDVI, NDWI and MNDWI as reflected in land cover categories // Acta Geographica Debrecina Landscape & Environment. 2016. Vol. 10. №3-4. P. 194-202.

7. Paper A 20 / Jr J. W. Rouse, R. H. Haas, J. A. Schell, D. W. Deering // Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium: The Proceedings of a Symposium Held by Goddard Space Flight Center at Washington, DC on December 10-14, 1973: Prepared at Goddard Space Flight Center. Scientific and Technical Information Office, National Aeronautics and Space Administration. 1974. Vol. 351. P. 309.

8. Aksamentov E., Astapova M., Usina E. Approach to Obstacle Localization for Robot Navigation in Agricultural Territories // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. Springer, Cham, 2020. P. 13-20.

9. Ganie M. A., Nusrath A. Determining the vegetation indices (NDVI) from Landsat 8 satellite data // International Journal of Advanced Research. 2016. Vol. 4. №8. C. 1459-1463.

10. Özelkan E. Water body detection analysis using NDWI indices derived from Landsat-8 OLI // Polish Journal of Environmental Studies. 2020. Vol. 29. №2. P. 1759-1769.

11. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // International journal of remote sensing. 2006. Vol. 27. № 14. P. 3025-3033.

12. Zha Y., Gao J., Ni S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery // International journal of remote sensing. 2003. Vol. 24. №3. P. 583-594.

13. Built-up index methods and their applications for urban extraction from Sentinel 2A satellite data: discussion / J. C. Valdiviezo-N, A. Téllez-Quiñones, A. Salazar-Garibay, A. A. López-Caloca // JOSA A. 2018. Vol. 35. №1. P. 35-44.

14. Karanam H. K., Neela V. B. Study of normalized difference built-up (NDBI) index in automatically mapping urban areas from Landsat TN imagery // *Int J Eng Sci Math*. 2017. Vol. 8. P. 239-48.

15. Analysis for Mapping of Built-Up Area Using Remotely Sensed Indices—A Case Study of Rajarhat Block in Barasat Sadar Sub-Division in West Bengal (India) / K. D. Ghosh, A. Ch Mandal, R. Majumder, P. Patra, S. G. Bhunia // *Journal of Landscape Ecology*. 2018. Vol. 11. №2. P. 67-76.

16. Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images / S. Candiago, F. Remondino, M. De Giglio, M. Dubbini, M. Gattelli // *Remote sensing*. 2015. Vol. 7. №4. P. 4026-4047.

17. A modified soil adjusted vegetation index / J. Qi, A. Chehbouni, A. R. Huete, Y. H. Kerr, S. Sorooshian // *Remote sensing of environment*. 1994. Vol. 48. №2. P. 119-126.

18. Study of the desertification index based on the albedo-MSAVI feature space for semi-arid steppe region / Z. Wu, S. Lei, Z. Bian, J. Huang, Y. Zhang // *Environmental Earth Sciences*. 2019. Vol. 78. №6. P. 232.

19. Ahwan Z., Hasyim M., Sunarno H. Pendampingan Pemuda Suku Tengger dalam Pengembangan Wisata Kawasan Hinterland Gunung Bromo Sebagai Wisata Alam Dan Budaya melalui Penguatan Skill Komunikasi Kepariwisata di Kabupaten Pasuruan // *Engagement: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*. 2019. Vol. 3. №2. P. 173-193.

20. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band / Y. Du, Y. Zhang, F. Ling, Q. Wang, W. Li, X. Li // *Remote Sensing*. 2016. Vol. 8. №4. P. 354.

21. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes / X. L. Chen, H. M. Zhao, P. X. Li, Z. Y. Yin // *Remote sensing of environment*. 2006. Vol. 104. №2. P. 133-146.

22. Hashim H., Abd Latif Z., Adnan N. A. Urban vegetation classification with NDVI threshold value method with very high resolution (VHR) PLEIADES Imagery // *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2019. P. 237-240.

23. ESA Earth Observation. 2020 [обновлено 10 декабря 2020; процитировано 14 декабря 2020]. URL: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>.

24. Genik, Warren. Case Study: Wild Oat control efficiency using UAV imagery – Green Aero Tech. 2015 [обновлено 10 ноября 2020; процитировано 14 декабря 2020]. URL: <https://www.greenaerotech.com/case-study-wild-oatcontrol-efficiency-using-uav-imagery/>.

## References

1. Aksamentov E., Zakharov K., Tolopilo D., Usina E. Approach to robotic mobile platform path planning upon analysis of aerial imaging data. *Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics" Zavalishin's Readings"*. Springer, Singapore, 2020, pp. 93-103. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-5580-0\\_7](https://doi.org/10.1007/978-981-15-5580-0_7).
2. Endo T., Maeda R., Matsuno F. Stability Analysis of Swarm Heterogeneous Robots with Limited Field of View. *Informatika i avtomatizacija = Informatics and Automation*, 2020, vol. 19, no. 5, pp. 942-966 (In Russ.).
3. Zakharov K., Saveliev A., Sivchenko O. Energy-Efficient Path Planning Algorithm on Three-Dimensional Large-Scale Terrain Maps for Mobile Robots. *International Conference on Interactive Collaborative Robotics. Springer, Cham*. 2020, pp. 319-330.
4. Levonevskiy D., Karasev E., Aksamentov E. Architecture and Algorithms of Geospatial Service for Navigation of Robotic Complexes. *Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics" Zavalishin's Readings"*. Springer, Singapore, 2020, pp. 433-442
5. Saveliev A., Aksamentov E., Karasev E. Automated terrain mapping based on mask R-CNN neural network. *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*, 2020.
6. Szabó S., Gacsi Z., Balázs B. Specific features of NDVI, NDWI and MNDWI as reflected in land cover categories. *Acta Geographica Debrecina Landscape & Environment*, 2016, vol. 10, no.3-4, pp. 194-202.
7. Rouse Jr J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. Paper A 20. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium: The Proceedings of a Symposium Held by Goddard Space Flight Center at Washington, DC on December 10-14, 1973: Prepared at Goddard Space Flight Center. – Scientific and Technical Information Office, National Aeronautics and Space Administration. 1974, vol. 351, pp. 309.
8. Aksamentov E., Astapova M., Usina E. Approach to Obstacle Localization for Robot Navigation in Agricultural Territories. *International Conference on Interactive Collaborative Robotics. Springer, Cham*, 2020, pp. 13-20.
9. Ganie M. A., Nusrath A. Determining the vegetation indices (NDVI) from Landsat 8 satellite data. *International Journal of Advanced Research*, 2016, vol. 4, no.8, pp. 1459-1463.
10. Özelkan E. Water body detection analysis using NDWI indices derived from Landsat-8 OLI. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2020, vol. 29, no.2, pp. 1759-1769.
11. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International journal of remote sensing*, 2006, vol. 27, no. 14, pp. 3025-3033.

12. Zha Y., Gao J., Ni S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International journal of remote sensing*, 2003, vol. 24, no.3, pp. 583-594.

13. Valdiviezo-N J. C., Téllez-Quiñones A., Salazar-Garibay A., López-Caloca, A. A. Built-up index methods and their applications for urban extraction from Sentinel 2A satellite data: discussion. *JOSA A*, 2018, vol. 35, no. 1, pp. 35-44.

14. Karanam H. K., Neela V. B. Study of normalized difference built-up (NDBI) index in automatically mapping urban areas from Landsat TN imagery. *Int J Eng Sci Math*, 2017, vol. 8, pp. 239-48.

15. Ghosh K. D., Ch Mandal A., Majumder R., Patra P., Bhunia S. G. Analysis for Mapping of Built-Up Area Using Remotely Sensed Indices—A Case Study of Rajarhat Block in Barasat Sadar Sub-Division in West Bengal (India). *Journal of Landscape Ecology*, 2018, vol. 11, no.2, pp. 67-76.

16. Candiago S., Remondino F., De Giglio M., Dubbini M., Gattelli M. Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images. *Remote sensing*, 2015, vol. 7, no.4, pp. 4026-4047.

17. Qi J., Chehbouni A., Huete A. R., Kerr Y. H., Sorooshian, S. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote sensing of environment*, 1994, vol. 48, no.2, pp. 119-126.

18. Wu Z., Lei S., Bian Z., Huang J., Zhang Y. Study of the desertification index based on the albedo-MSAVI feature space for semi-arid steppe region. *Environmental Earth Sciences*, 2019, vol. 78, no.6, pp. 232.

19. Ahwan Z., Hasyim M., Sunarno H. Pendampingan Pemuda Suku Tengger dalam Pengembangan Wisata Kawasan Hinterland Gunung Bromo Sebagai Wisata Alam Dan Budaya melalui Penguatan Skill Komunikasi Kepariwisataaan di Kabupaten Pasuruan. *Engagement: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 2019, vol. 3, no.2, pp. 173-193.

20. Du Y., Zhang Y., Ling F., Wang Q., Li W., Li X. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band. *Remote Sensing*, 2016, vol. 8, no.4, pp. 354.

21. Chen X. L., Zhao H. M., Li P. X., Yin, Z. Y. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote sensing of environment*, 2006, vol. 104, no.2, pp. 133-146.

22. Hashim H., Abd Latif Z., Adnan N. A. Urban vegetation classification with NDVI threshold value method with very high resolution (VHR) PLEIADES Imagery. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2019. pp. 237-240.

23. ESA Earth Observation. 2020. Available at: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>.

24. Genik Warren. Case Study: Wild Oat control efficiency using UAV imagery – Green Aero Tech. 2015. Available at: <https://www.greenaerotech.com/case-study-wild-oat-control-efficiency-using-uav-imagery/>.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Астапова Марина Алексеевна**, программист лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: [marinaastapova55@gmail.com](mailto:marinaastapova55@gmail.com)

**Marina A. Astapova**, Programmer of Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: [marinaastapova55@gmail.com](mailto:marinaastapova55@gmail.com)

**Аксаментов Егор Алексеевич**, младший научный сотрудник лаборатории технологий больших данных социокиберфизических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: [egor.aksamentov.96@mail.ru](mailto:egor.aksamentov.96@mail.ru)

**Egor A. Aksamentov**, Junior researcher of Laboratory of Big Data Technologies in Socio-Cyberphysical Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: [egor.aksamentov.96@mail.ru](mailto:egor.aksamentov.96@mail.ru)

## Применение многозадачного глубокого обучения в задаче распознавания эмоций в речи

А.В. Рябинов<sup>1</sup>, М.Ю. Уздяев<sup>1</sup> ✉, И.В. Ватаманюк<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук 14-я линия В.О. 39, г. Санкт-Петербург 199178, Российская Федерация

✉ e-mail: uzdyayev.m@ias.spb.su

### Резюме

**Цель исследования.** Эмоции играют одну из ключевых ролей в регуляции поведения человека. Решение задачи автоматического распознавания эмоций позволяет повысить эффективность функционирования целого ряда цифровых систем: систем обеспечения безопасности, человеко-машинных интерфейсов, систем электронной коммерции и т.д. При этом отмечается низкая эффективность современных подходов распознавания эмоций в речи. Данная работа посвящена исследованию автоматического распознавания эмоций в речи с помощью методов машинного обучения.

**Методы.** В статье описан и протестирован подход к автоматическому распознаванию эмоций в речи на основе многозадачного обучения глубоких сверточных нейронных сетей архитектур AlexNet и VGG с применением автоматического подбора коэффициентов весов каждой задачи при вычислении итогового значения потери в процессе обучения. Все модели были обучены на выборке набора данных IEMOCAP с четырьмя эмоциональными категориями «гнев», «счастье», «нейтральная эмоция», «грусть». В качестве входных данных используются обработанные специализированным алгоритмом лог-мел спектрограммы высказываний.

**Результаты.** Рассмотренные модели были протестированы на основе численных метрик: доля верно распознанных экземпляров, точность, полнота, f-мера. По всем вышеперечисленным метрикам получено улучшение качества распознавания эмоций предлагаемой моделью по сравнению с двумя базовыми однозадачными моделями, а также с известными решениями. Это достигается благодаря применению автоматического взвешивания значений функций потерь от отдельных задач при формировании итогового значения ошибки в процессе обучения.

**Заключение.** Полученное улучшение качества распознавания эмоций по сравнению с известными решениями подтверждает целесообразность применения концепции многозадачного обучения для увеличения точности моделей распознавания эмоций. Разработанный подход позволяет достичь равномерного и одновременного снижения ошибок отдельных задач и используется в области распознавания эмоций в речи впервые.

**Ключевые слова:** многозадачное обучение; сверточные нейронные сети; речевые технологии; автоматическое распознавание эмоций; анализ аудиосигналов речи.

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

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке РФФИ (18-29-22061\_мк).

**Для цитирования:** Рябинов А.В., Уздяев М.Ю., Ватаманюк И.В. Применение многозадачного глубокого обучения в задаче распознавания эмоций в речи // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(1): 82-109. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-82-109>.

Поступила в редакцию 23.12.2020

Подписана в печать 17.02.2021

Опубликована 31.03.2021

## Applying Multitask Deep Learning to Emotion Recognition in Speech

Artem V. Ryabinov <sup>1</sup>, Mikhail Yu. Uzdiaev <sup>1</sup> ✉, Irina V. Vatamaniuk <sup>1</sup>

<sup>1</sup> St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS),  
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,  
39, 14th Line, St. Petersburg 199178, Russian Federation

✉ e-mail: [uzdiaev.m@iias.spb.su](mailto:uzdiaev.m@iias.spb.su)

### Abstract

**Purpose of research.** Emotions play one of the key roles in the regulation of human behaviour. Solving the problem of automatic recognition of emotions makes it possible to increase the effectiveness of operation of a whole range of digital systems such as security systems, human-machine interfaces, e-commerce systems, etc. At the same time, the low efficiency of modern approaches to recognizing emotions in speech can be noted. This work studies automatic recognition of emotions in speech applying machine learning methods.

**Methods.** The article describes and tests an approach to automatic recognition of emotions in speech based on multitask learning of deep convolution neural networks of AlexNet and VGG architectures using automatic selection of the weight coefficients for each task when calculating the final loss value during learning. All the models were trained on a sample of the IEMOCAP dataset with four emotional categories of 'anger', 'happiness', 'neutral emotion', 'sadness'. The log-mel spectrograms of statements processed by a specialized algorithm are used as input data.

**Results.** The considered models were tested on the basis of numerical metrics: the share of correctly recognized instances, accuracy, completeness, f-measure. For all of the above metrics, an improvement in the quality of emotion recognition by the proposed model was obtained in comparison with the two basic single-task models as well as with known solutions. This result is achieved through the use of automatic weighting of the values of the loss functions from individual tasks when forming the final value of the error in the learning process.

**Conclusion.** The resulting improvement in the quality of emotion recognition in comparison with the known solutions confirms the feasibility of applying multitask learning to increase the accuracy of emotion recognition models. The developed approach makes it possible to achieve a uniform and simultaneous reduction of errors of individual tasks, and is used in the field of emotions recognition in speech for the first time.

**Keywords:** multitask learning; convolution neural networks; speech technologies, automatic emotion recognition; analysis of audio signals of speech.

**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 supported by the Russian Foundation for Basic Research (18-29-22061\_mk).

**For citation:** Ryabinov A. V., Uzdiaev M. Yu., Vatamaniuk I.A. Applying Multitask Deep Learning to Emotion Recognition in Speech. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(1): 82-109 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-82-109>.

Received 23.12.2020

Accepted 17.02.2021

Published 31.03.2021

## Введение

Развитие моделей, методов и систем автоматического распознавания и интерпретации эмоционального состояния, является важной и актуальной задачей искусственного интеллекта. Особо стоит выделить область распознавания эмоций в речи (Speech Emotion Recognition, SER), которая рассматривает модели машинного обучения, обученные на наборах данных, которые содержат невербальные проявления эмоций в речи. Такие модели получили широкое распространение в интерфейсах человек-компьютер, в целом, и голосовых пользовательских интерфейсов (Alexa, Cortana, Siri, Алиса), в частности. Кроме того, модели распознавания эмоций получили широкое распространение в следующих областях: в приложениях речевого анализа в области медицины [1], безопасности [2], робототехники [3], автоматизированных систем [4]. Тем не менее, на текущем этапе своего развития, модели автоматического распознавания эмоций в речи не могут обеспечить должную производительность на реальных данных [5], что определяет необходимость разработки новых подходов к распознаванию эмоций человека в речи.

Эмоции являются «сложными психическими процессами и состояниями, связанными с инстинктами, потребностями, мотивами и отражающих в форме непосредственного переживания (удовлетворения, страха, радости и т.д.)

значимость действующих на индивида явлений и ситуаций для осуществления его жизнедеятельности. Сопровождая практически любые проявления активности субъекта, эмоции служат одним из главных механизмов внутренней регуляции психической деятельности и поведения, направленных на удовлетворение актуальных потребностей» [6]. Среди прочих структурных компонент (импрессивная, когнитивная, физиологическая) [7], для задач автоматического распознавания эмоций наиболее важной является поведенческая или моторная компонента, т.е. внешне наблюдаемая специфическая двигательная активность, которая связана с тем или иным эмоциональным состоянием индивида. Именно возможность внешнего наблюдения и регистрации поведения на расстоянии без непосредственного участия испытуемого делает эту компоненту ведущей в задачах распознавания эмоций. В задачах распознавания эмоций в речи используются невербальные паралингвистические акустические признаки аудиосигнала речи.

Решая задачу автоматического распознавания эмоций, необходимо определить адекватное представление последних с точки зрения возможности обработки этой информации на компьютере и согласованности с теоретическими положениями психологии эмоций. В этой связи, чаще всего на практике используют две эмоциональные модели [8]. Первая – это дискретные

классы, например, «Большая шестерка» эмоциональных категорий, основанная на теории эмоций Пола Экмана (Гнев, Счастье, Нейтральная, Грусть, Отвращение, Страх) [9]. Вторая модель – непрерывный подход, заключающийся в представлении каждой эмоции как базиса в многомерном пространстве, чьи измерения являются эмоциональные атрибуты Знак (Valence), Интенсивность (Arousal), Доминантность (Dominance) [10, 11].

Активное применение нейронных сетей и моделей глубокого обучения в задачах распознавания эмоций началось около десяти лет назад. Однако лишь в последние годы были предложены сквозные (end-to-end) модели [12-17], использующие для обучения непосредственно запись человеческого голоса. Узким местом таких моделей является отсутствие репрезентативных выборок данных, а также отсутствие формализованных методик сбора и разметки данных проявления эмоций в аудиосигнале речи. Поэтому основным общим недостатком современных сквозных систем является переобучение и низкая способность к обобщению. В данной работе мы рассматриваем подход к решению данных проблем с помощью многозадачного обучения (англ. multi-task learning) – одновременного обучения модели глубокого обучения группе различных, но взаимосвязанных задач, для каждой из которых задаются свои пары «ситуация, требуемое решение» [18]. Мы рассматриваем три смежные паралингвистиче-

ские задачи – распознавание эмоций по голосу (классификация одного из дискретных эмоциональных классов), распознавание диктора, распознавание пола диктора. Также мы впервые применяем в данной области методы автоматического подбора коэффициентов при вычислении итогового значения ошибки, что способствует дальнейшему улучшению результата. Мы обучаем и проверяем разработанную модель на наборе данных IEMOCAP [19]. Предложенная модель превосходит результаты распознавания известных решений в области распознавания эмоций в речи.

## Обзор литературы

До 2016 года в литературе превалировали традиционные методы, основанные на покадровом извлечении локальных низкоуровневых дескрипторов с последующим их комбинированием для получения глобальных признаков изучаемого высказывания или отрывка речи, и использование полученного признакового представления для обучения алгоритмов классификации или регрессии. Исследователи изучали многие низкоуровневые сконструированные вручную дескрипторы и их комбинации. Наиболее эффективными и часто используемыми наборами стали наборы eGeMAPS (88 параметров) [20] и ComParE (6373 параметра) [21]. В качестве классификаторов в литературе наиболее часто встречаются метод опорных векторов (Support Vector Machines, SVM), алгоритм k-ближайших соседей (k-

Nearest Neighbors, k-NN), скрытые марковские модели (Hidden Markov Model, НММ), многослойные перцептроны [22]. Так же, как и многие другие задачи машинного обучения, речевое распознавание эмоций сильно зависит от набора данных, используемого для обучения. Отличия между наборами данных, вызванные различными постановками задачи распознавания эмоций в речи, включают в себя: наличие искусственно и/или натурально выраженных эмоций, язык, половозрастной состав дикторов и их количество, разметка.

Очевидны недостатки традиционных подходов. Во-первых, использование сконструированных вручную дескрипторов признаков требует привлечения экспертов по акустике и психологии, чтобы разработать набор наиболее релевантных параметров [23]. Помимо выбираемого пространства признаков, эффективность систем распознавания также сильно зависит от реализованной модели распознавания образов, что может привести к снижению результатов распознавания. В этом отношении перспективной альтернативой являются так называемые сквозные (end-to-end) системы. Они направлены на автоматическое изучение наиболее надежных представлений, связанных с определенной задачей, используя различные топологии нейронных сетей для обучения как процессу извлечения признаков, так и классификации, исключая таким образом процедуру ручного проектирования признаков из процесса распознавания эмо-

ций в речи. Недавние достижения в области глубокого обучения в целом и его применения к таким задачам, как распознавание речи и идентификация по голосу, указали на перспективность использования различных сверточных (Convolutional Neural Network, CNN) и рекуррентных (Recurrent Neural Network, RNN) архитектур глубоких нейронных сетей для таких систем. Так, в работе [12] был впервые описан сквозной подход к распознаванию эмоций по голосу. Авторы применили сверточные и рекуррентные с долгой краткосрочной памятью нейронные сети (Long Short-Time Memory Recurrent Neural Network, LSTM-RNN) для обработки «сырого» дискретизированного сигнала в формате wav. Было показано, что использование этого подхода значительно превосходит традиционные подходы, связанные с техниками цифровой обработки сигналов (в качестве базовых методов применялись признаки eGeMAPS и ComParE, классификаторы SVM и BiLSTM-DRNN) в задаче распознавания эмоций на наборе данных RECOLA [24].

Однако представление аудиосигнала в виде волновой формы достаточно полно передает лишь амплитудную характеристику, в то время, как важнейшая частотная характеристика может остаться без внимания. В этой связи широкое распространение получили подходы, основанные на обработке отображений аудиосигнала через различные частотно-временные представления, та-

кие, как спектрограммы. Спектрограммы – это визуальные представления амплитуды сигнала с течением времени на разных частотах, полученные с помощью оконного преобразования Фурье (Short-Time Fourier Transform, STFT) и представляющие собой двухмерный график, по горизонтальной оси которого отложено время, по вертикальной – частота, а интенсивность или цвет точки отображает амплитуду отдельной частоты в конкретный момент времени. Последние исследования в различных сферах анализа звука, таких, как: классификация событий по звуку [25], распознавание речи [26], распознавание человека по голосу [27], продемонстрировали применимость спектрограмм для извлечения из них скрытых признаков с помощью сверточных архитектур глубоких нейронных сетей и подтолкнули исследователей на использование спектрограмм в области распознавания эмоций в речи.

В работе [13] продемонстрирована модель распознавания эмоций в речи, основанная на обработке спектрограмм сверточными нейронными сетями. Набор данных, используемый для обучения и тестирования модели – динамическая база данных Acted Emotional Speech Dynamic Database (AESDD) [28]. Предлагаемая архитектура сверточной нейронной сети (4 сверточных слоя и 2 полносвязных слоя) превзошла базовую модель машинного обучения (метод опорных векторов в самостоятельно разработанном авторами признаковом

пространстве) на 8,4% с точки зрения доли верно распознанных экземпляров. Авторами [14] представлена нейронная сеть, комбинирующая трехмерные сверточные слои, двунаправленные LSTM ячейки и механизм внимания [29]. В качестве входных данных использовались мел-спектрограммы, дополненные первой и второй производной по времени. Получен результат среднего значения невзвешенной полноты 64,74% на наборе данных IEMOCAP [19] и 82,82% на наборе данных Emo-DB [30]. В статье [15] предложен метод распознавания эмоций по логарифмированным спектрограммам с помощью сверточной нейронной сети и LSTM. Авторы рассмотрели десятки комбинаций топологий нейронных сетей и их параметров. Были протестированы как исключительно сверточные топологии (от двух до восьми сверточных слоев с различными комбинациями размеров окон свертки), так и топологии с одним-двумя сверточными слоями и одним-двумя слоями LSTM. Лучшие результаты показала архитектура, содержащая 3 сверточных и 2 LSTM слоя, точность распознавания на наборе данных IEMOCAP составила 68,8%.

Описанные выше решения имеют один главный общий недостаток: они страдают от переобучения, что ведет к серьезному снижению производительности в условиях несоответствия между тренировочными и тестовыми данными. Данная проблема решается, в общем случае, регуляризацией модели с помо-

щью таких техник, как прореживание (dropout) [31], сокращение веса (weight decay) или добавлением новых тренировочных данных, в том числе, с помощью техник аугментации. Однако переобучение может быть связано не только с ограниченным размером обучающих данных или недостаточной сложностью модели. Общепринятая методология оптимизации описанных выше моделей глубокого обучения только в рамках одной задачи игнорирует потенциально богатую информацию в тренировочном сигнале. В этой связи альтернативным эффективным подходом к улучшению результата является многозадачное обучение. В последнее время оно было включено во множество моделей глубоких нейронных сетей, решающих проблемы в области компьютерного зрения [32], обработки речи [33] и естественного языка [34], а также обучения с подкреплением [35]. К примеру, задачи обнаружения лица, распознавания пола и оценки позы человека могут быть одновременно решены с использованием одной сверточной глубокой нейронной сети [36].

В области распознавания эмоций в речи многозадачное обучение показало высокие результаты для моделей, обучаемых по прецедентам. Большинство из существующих в области распознавания эмоций в речи подходов совместно обучаются определенным эмоциональным атрибутам для улучшения как точности, так и генерализации. Так, Parthasarathy и др. [37] представили систе-

му для одновременной оценки эмоциональных атрибутов Возбуждение, Валентность, Доминантность, использующую многозадачное обучение глубоких полносвязных нейронных сетей в признаковом пространстве ComParE. Лучшие результаты были достигнуты структурой, комбинирующей один общий слой с тремя отдельными слоями для каждой задачи. По сравнению с аналогичной, но однозадачной архитектурой, был продемонстрирован максимальный прирост корреляционного коэффициента согласованности (concordance correlation coefficient, CCC) на 4,7% для однокорпусных и 14,0% для кросс-корпусных экспериментов, а полученные с помощью t-SNE визуализации активаций последних скрытых слоев нейронной сети проиллюстрировали, что многозадачное обучение создает лучшие высокоуровневые представления. Zhang и Schuller [16] также использовали многозадачное обучение для предсказания значений атрибутов Знак, Интенсивность, Доминантность. В качестве исходного представления был использован дискретизированный сигнал в формате wav. Дополнительно авторами был реализован механизм внимания с целью зафиксировать распределение вклада различных отрезков записи для каждой отдельной задачи. Для оценки эффективности системы была проведена серия экспериментов на базе данных IEMOCAP. Каждый эмоциональный атрибут был дискретизирован как имеющий в каждом отдельном слу-

чае Высокое, Среднее, или Низкое значение; таким образом, предсказание значения каждого атрибута рассматривалось как задача трехклассовой классификации. Получены результаты точности предсказания: 48,7% для возбуждения, 63,8% для валентности и 51,6% для доминантности, что незначительно превосходит как рассмотренные в той же статье базовые системы (eGeMAPS + SVM, eGeMAPS + RNN), так и однозадачный подход к классификации каждого атрибута с использованием аналогичной архитектуры нейронной сети.

Обе описанные выше работы, однако, не используют спектрограммы в качестве представления аудиосигнала. Также очевидно, что помимо информации, кодирующей эмоциональное состояние говорящего, речь и ее представление в виде спектрограммы содержит большое количество не относящейся к эмоциям информации, поэтому вместо использования в качестве задач моделирование эмоциональных атрибутов, перспективным выглядит создание системы для одновременного решения смежных паралингвистических задач. Например, Gideon и др. [38] исследовали перенос обучения между тремя паралингвистическими задачами: распознавание диктора, пола и эмоции, применяя для этого прогрессивные нейронные сети. В то время как классическая стратегия переноса обучения предполагает предварительное обучение глубокой нейронной сети на исходном наборе данных и дальнейшую тонкую настройку на це-

левом наборе данных из другой задачи и/или домена, прогрессивные нейронные сети представляют альтернативный способ, позволяющий избежать т.н. «эффекта забывания», выражающегося в невозможности выделения значимой информации из данных нейронной сетью. Это происходит вследствие архитектурных особенностей, обеспечивающих возможность сохранения информации, полученной при обучении решению исходной задачи. В статье предложена архитектура прогрессивной нейронной сети с пятью скрытыми полносвязными слоями. Результаты этого подхода значительно превосходили как стандартное обучение глубокой нейронной сети, так и классическую стратегию переноса обучения между задачами распознавания диктора и эмоции: среднее значение невзвешенной полноты 65,7% на наборе данных IEMOCAP. Однако авторами было использовано признаковое представление eGeMAPS и простая полносвязная топология, а прогрессивные нейронные сети при своем расширении и углублении начинают требовать огромного количества параметров для настройки (для параллельного решения новой задачи требуется увеличение количества параметров модели в 2 раза), что делает их применение нецелесообразным для обработки спектрограмм. В своей недавней работе Latuf и др. [17] представили модель многозадачного обучения для голосового распознавания эмоций, идентификации говорящего и его пола. Для извле-

чения высокоуровневых признаков авторами использован состязательный автоэнкодер, а для каждой задачи используется свой блок-классификатор, состоящий из сверточных и полносвязных слоев. Также используется стратегия предварительного обучения модели: не задействуя задачу распознавания эмоций, авторы используют большой набор данных LibriSpeech, созданный для решения задач в области распознавания речи и дикторов. Таким образом, модель первично обучается извлечению признаков на значительно большем количестве данных, чем доступно для задачи распознавания эмоций. После предобучения проводится тонкая настройка модели одновременно по трем задачам на наборах данных с эмоциональной речью. Полученные результаты (68,8% на наборе данных IEMOCAP и 63,6% на наборе данных MSP-IMPROV [39]) превосходят как таковые у этой же модели без предобучения автоэнкодера, так и результаты аналогичной архитектуры при однозадачном обучении, а также известные авторам на тот момент лучшие решения. На текущий момент данная работа является наиболее полно раскрывающей возможности как обработки спектрограмм, так и многозадачного обучения в области распознавания эмоций в речи. Однако и у нее есть недостаток: при вычислении итогового значения ошибки для обратного распространения, авторами была использована формула со статическими коэффициентами, которые в ходе экспериментов выбирались путем множества проб и ошибок.

В недавних исследованиях в области многозадачного обучения было продемонстрировано, что очень важно найти подходящие стратегии взвешивания значений функции потерь каждой задачи, чтобы минимизировать общие эмпирические потери без приоритета в обучении одной задачи над другими. В то же время, именно динамические методы подбора коэффициентов имеют решающее значение в многозадачном обучении, поскольку проблемы с конфликтующими градиентными сигналами, исходящими от отдельных задач в разные моменты обучения, могут ухудшить производительность модели. Kendall et al. в [40] предложил метод взвешивания на основе гомоскедастичной неопределенности и применил его к сверточным нейронным сетям для одновременного решения трех задач компьютерного зрения, а именно семантической сегментации (semantic segmentation), пообъектной сегментации (instance segmentation) и попиксельной регрессии карты глубины (depth regression), продемонстрировав улучшение результатов каждой из задач по сравнению с однозадачными моделями. Liebel и Körner [41] адаптировали элемент регуляризации в этом методе, предотвратив отрицательные значения регуляризации, что позволило еще сильнее улучшить результаты на тех же задачах. В работе [42] проведено сравнение этих и еще нескольких стратегий динамического многозадачного обучения, таких как Dynamic Weighted Average (DWA)

[43] и GradNorm [44] на наборах данных Multi-MNIST, NYU v2 и IMDB-WIKI. Продемонстрировано небольшое превосходство усовершенствованного метода на основе неопределенности.

Таким образом, мы делаем вывод, что в современной литературе не освещено применение метода автоматического динамического взвешивания функции потерь в многозадачном обучении глубоких сверточных нейронных сетей спектрограммам речи для одновременного решения паралингвистических задач распознавания эмоций, распознавания диктора и распознавания пола диктора. Разработка соответствующей системы для улучшения точности распознавания эмоций в речи является целью данного исследования.

## Материалы и методы

Были проведены предварительные эксперименты, оценивающие множество архитектур сверточных глубоких нейронных сетей на предмет качества изучения и извлечения высокоуровневых признаков из логарифмированных мел-спектрограмм: AlexNet [45]; VGG [46]; ResNet-50 [47]. Мы не вносили никаких изменений в архитектуры данных нейронных сетей, кроме изменения количества нейронов их последних полносвязных слоев для соответствия количеству эмоциональных классов, а также изменения количества каналов исходного изображения с 3 до 1. Две модели, показавшие на этом этапе луч-

шие результаты, были выбраны в качестве базовых, ниже приведено их описание, а также описание предлагаемого подхода.

На вход этой и всех описанных далее моделей подается одноканальное нормализованное изображение логарифмированной мел-спектрограммы речевого сигнала. В этой и во всех описанных далее моделях используется функция активации ReLU. В базовой модели 1 извлечение признаков производится с помощью сверточной нейронной сети, архитектура которой аналогична архитектуре AlexNet, кроме количества входных каналов изображения. Далее извлеченные признаки подаются на блок классификатора, состоящего из 4 полносвязных слоев. В целях регуляризации, после первого слоя производится dropout 50% нейронов этого слоя. Схематическое изображение модели представлено на рис. 1, подробное описание её слоёв – в табл. 1.

Модель имеет 17,073,348 параметров, которые занимают 65,13 МБ дискового пространства.

В базовой модели 2 извлечение признаков производится с помощью сверточной нейронной сети, архитектура которой аналогична архитектуре 11-слойной нейронной сети VGG, кроме количества входных каналов изображения. Далее извлеченные признаки подаются на блок классификатора, архитектура которого аналогична таковой у Базовой модели 1.

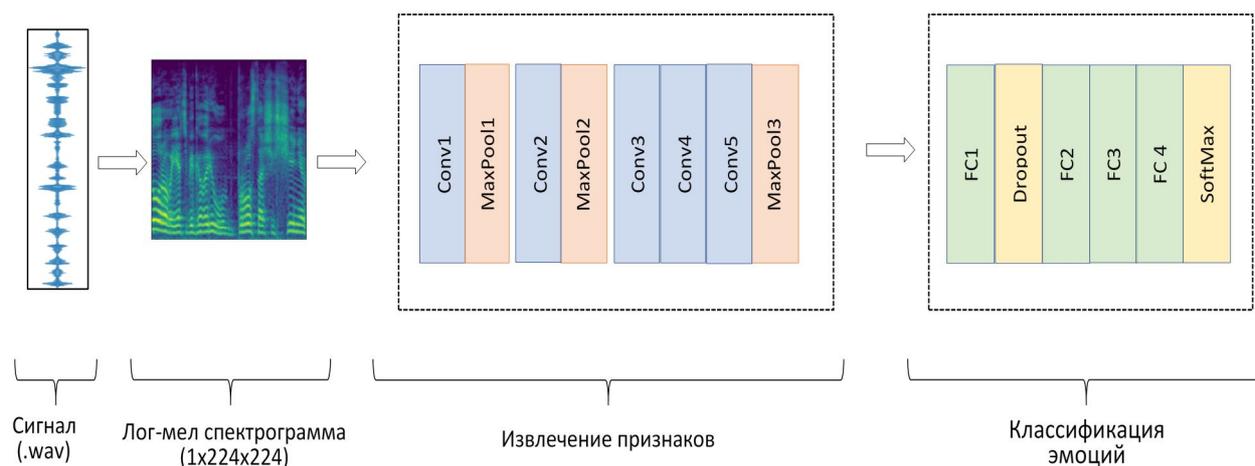


Рис. 1. Схема Базовой модели 1

Fig. 1. Diagram of Reference model 1

Таблица 1. Архитектура Базовой модели 1

Table 1. Architecture of Reference model 1

Слой / Layer	Параметры / Parameters	Размерность на выходе / Output dimension
Conv1	Количество фильтров – 64, размер ядра – 11x11, шаг – 4, дополнение (padding) – 2	64x55x55
MaxPool1	Размер ядра – 3x3, шаг – 2	64x27x27
Conv2	Количество фильтров – 192, размер ядра – 5x5, шаг – 1, дополнение – 2	192x27x27
MaxPool2	Размер ядра – 3x3, шаг – 2	192x13x13
Conv3	Количество фильтров – 384, размер ядра – 3x3, шаг – 1, дополнение – 1	384x13x13
Conv4	Количество фильтров – 256, размер ядра – 3x3, шаг – 1, дополнение – 1	256x13x13
Conv5	Количество фильтров – 256, размер ядра – 3x3, шаг – 1, дополнение – 1	256x12x12
MaxPool3	Размер ядра – 3x3, шаг – 2	256x5x5
FC1		6400
Dropout	$p = 0.5$	
FC2		2048
FC3		512
FC4		<количество классов>

Таким образом, при сравнении результатов Базовой модели 1 и Базовой модели 2, сравниваются между собой блоки извлечения признаков этих моделей. Схематическое изображение модели представлено на рис. 2, описание её слоёв приведено в табл. 2.

Модель имеет 61,652,740 параметров, которые занимают 235,19 МБ дискового пространства.

### Предлагаемая модель

Для повышения точности распознавания был выбран подход, основанный на многозадачном обучении. Преимущества данного подхода можно выразить в следующих положениях: во-первых, количество параметров в многозадачной модели будет меньше, чем при построении нескольких моделей, каждая из которых оптимизирована для своих индивидуальных задач; и, во-вторых, что более важно, модели, обученные выполнять множество задач одновременно, должны иметь возможность путем индуктивного переноса знаний

между задачами извлекать из представлений исходного сигнала более общую информацию, обеспечивая таким образом регуляризацию модели и лучшую производительность каждой задачи с меньшими объемами тренировочных данных. Предлагаемая модель для многозадачного обучения представляет собой блок извлечения признаков, идентичный Базовой модели 2, и блок классификации, состоящий из одного общего полносвязного слоя (25088 нейронов), после которого происходит разделение нейронной сети на независимые друг от друга классификаторы, архитектуры которых идентичны таковым у Базовой модели 2. В качестве задач выбраны паралингвистические задачи классификации эмоций, классификации спикера и классификации пола. Таким образом, сравнивая результаты Базовой модели 2 и Предлагаемой модели, можно делать выводы о работоспособности концепции многозадачного обучения в контексте нашей задачи. Схематическое изображение модели представлено на рис. 3.

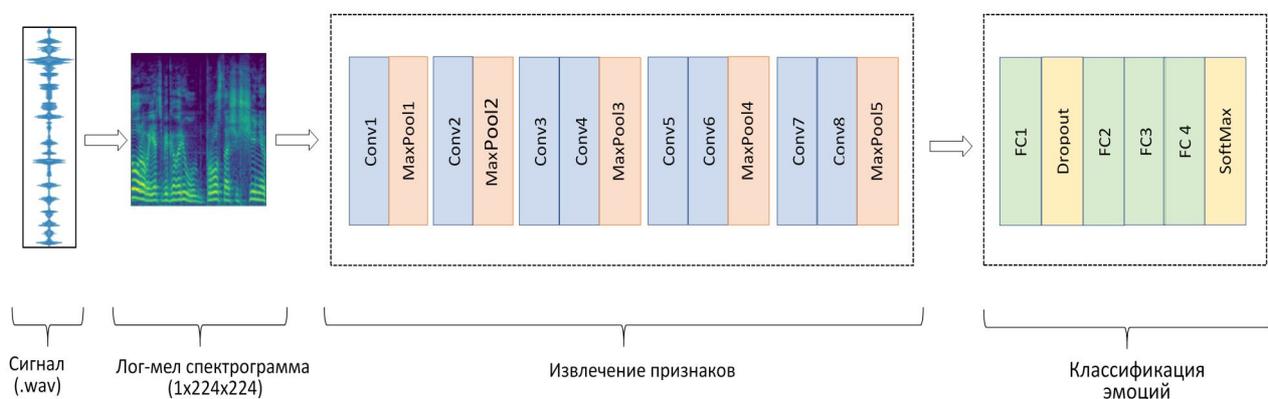


Рис. 2. Схема Базовой модели 2

Fig. 2. Diagram of Reference model 2

Таблица 2. Архитектура Базовой модели 2

Table 2. Architecture of Reference model 2

Слой / Layer	Параметры / Parameters	Размерность на выходе / Output dimension
Conv1	Количество фильтров – 64, размер ядра – 3x3, шаг – 1, дополнение – 1	64x224x224
MaxPool1	Размер ядра – 2, шаг – 2	64x112x112
Conv2	Количество фильтров – 128, размер ядра – 3x3, шаг – 1, дополнение – 1	128x112x112
MaxPool2	Размер ядра – 2, шаг – 2	128x56x56
Conv3	Количество фильтров – 256, размер ядра – 3x3, шаг – 1, дополнение – 1	256x56x56
Conv4	Количество фильтров – 256, размер ядра – 3x3, шаг – 1, дополнение – 1	256x56x56
MaxPool3	Размер ядра – 2, шаг – 2	256x28x28
Conv5	Количество фильтров – 512, размер ядра – 3x3, шаг – 1, дополнение – 1	512x28x28
Conv6	Количество фильтров – 512, размер ядра – 3x3, шаг – 1, дополнение – 1	512x28x28
MaxPool4	Размер ядра – 2, шаг – 2	512x14x14
Conv7	Количество фильтров – 512, размер ядра – 3x3, шаг – 1, дополнение – 1	512x14x14
Conv8	Количество фильтров – 512, размер ядра – 3x3, шаг – 1, дополнение – 1	512x14x14
MaxPool5	Размер ядра – 2, шаг – 2	512x7x7
FC1		25088
Dropout	p=0.5	
FC2		2048
FC3		512
FC4		<количество классов>

Данная модель имеет 63,762,576 параметров, которые занимают 243,23МБ дискового пространства.

### Эксперименты

Для экспериментального исследования вышеописанных моделей был выбран набор данных IEMOCAP [19] – многомодальный набор данных, состоящий из аудиовидеозаписей диалогов полупрофессиональных актеров на ан-

глийском языке, в ситуациях, стимулирующих различные эмоциональные реакции (как сценарных, так и импровизированных). В записи участвовало 10 актеров (5 мужчин и 5 женщин), в ходе записи было получено в общей сложности 12 ч 26 мин данных, которые были размечены несколькими аннотаторами как на дискретные эмоциональные классы, так и на непрерывные значения валентности и активации.

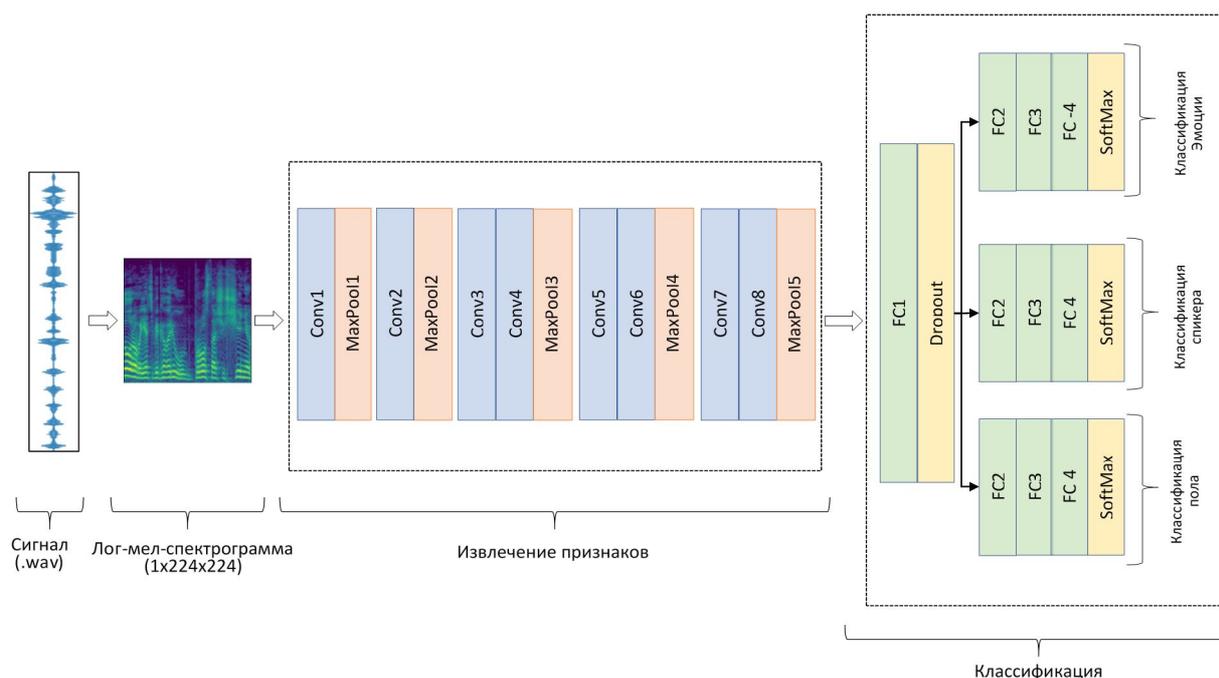


Рис. 3. Схема предлагаемой модели

Fig. 3. Diagram of the proposed model

Все модели были обучены на выборке набора данных IEMOCAP с четырьмя эмоциональными категориями Гнев, Счастье, Нейтральная эмоция, Грусть (далее – IEMOCAP-4). Мы мотивируем свой выбор наибольшей популярностью именно данного варианта среди исследователей, что позволит сравнить наши результаты.

Были сгенерированы логарифмированные мел-спектрограммы высказываний с помощью алгоритма STFT (количество компонент разложения – 2048, длина окна – 2048 фреймов, ширина шага окна – 512 фреймов, количество мел-фильтров – 512) и произведено разделение на тренировочную и валидационную подвыборки в пропорции 4:1. Поскольку модель требует от входных данных единого размера, а также в целях осуществления простейшей аугмен-

тации данных, на каждой эпохе полученные спектрограммы подвергались обработке алгоритмом, блок-схема которого изображена на рис. 5. Все процедуры, подразумевающие использование случайных чисел («Случайно обрезать», «Генерация D», «Случайно заполнить нулями»), выполнялись на случайном зерне генератора для данных из тренировочной выборки, и на фиксированном зерне генератора для данных из валидационной выборки. Таким образом, случайные изменения вносились каждую эпоху только в тренировочные данные, в то время как валидационные данные из эпохи в эпоху не изменялись. На выходе этого алгоритма мы получили массив данных размером 512x512. Данный массив был конвертирован в изображение (значения приведены в диапазон от 0 до 255), которое было

уменьшено до размеров 224x224 с применением кубической интерполяции. Наконец, перед непосредственно подачей

на вход нейронной сети, проводилась нормализация со средним значением 0,5 и стандартным отклонением 0,225.

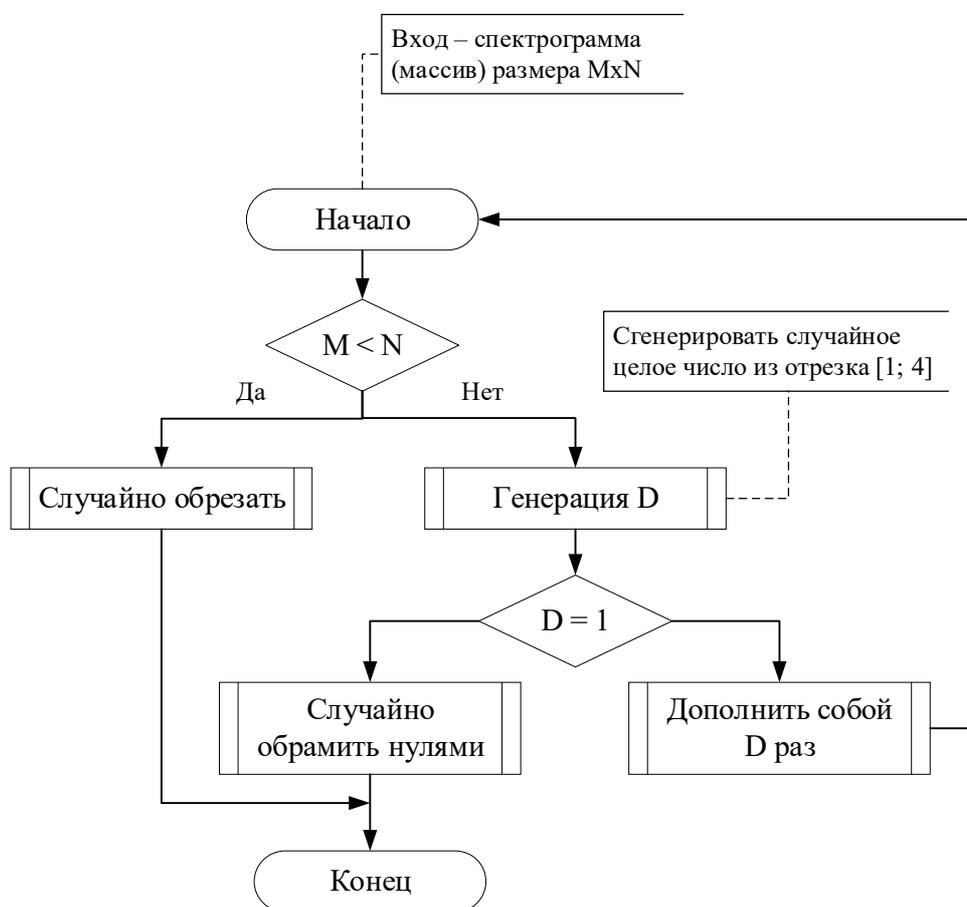


Рис. 4. Блок-схема алгоритма унификации размера и аугментации спектрограмм

Fig. 4. Flowchart of the size unification and spectrogram augmentation algorithm

Модели обучались методом стохастического пакетного градиентного спуска с малым размером пакета (Mini-Batch Stochastic Gradient Descent) на тренировочной подвыборке 300 эпох, параметр скорости обучения равнялся  $1e-5$ , с размером пакета, равным 32; использован алгоритм оптимизации Adam [48], функция потерь – перекрестная энтропия:  $L_{CE} = -\sum_{i=1}^N y_i \log(\hat{y}_i)$ , где  $N$  – количество классов;  $y_i$  – истинное значение

класса  $i$ , принимающее значения 1 (верно) или 0 (неверно);  $\hat{y}_i$  – сгенерированное нейронной сетью значение вероятности класса  $i$ .

Для предотвращения переобучения производилась остановка обучения модели, если значение функции ошибки на валидационной подвыборке не уменьшалось в течение 30 эпох.

В ходе экспериментов были также имплементированы и протестированы следующие стратегии взвешивания зна-

чений функции потерь отдельных задач на каждом пакете обрабатываемых данных (здесь и далее  $L_{total}$ ;  $L_{emotion}$ ,  $L_{speaker}$ ,  $L_{gender}$  – соответственно значение итоговой потери для обратного распространения на текущем мини-батче; значения потери при классификации эмоции, спикера и пола на текущем мини-батче):

а) Невзвешенная сумма:

$$L_{total} = L_{emotion} + L_{speaker} + L_{gender};$$

б) Усовершенствованный метод на основе гомоскедастичной неопределенности, описанный в [40; 41];

в) Метод взвешенного среднего:

$$L_{total} = \alpha L_{emotion} + \beta L_{speaker} + \gamma L_{gender},$$

$$\text{где } \alpha = \frac{L_{emotion}}{L_{emotion} + L_{speaker} + L_{gender}};$$

$$\beta = \frac{L_{speaker}}{L_{emotion} + L_{speaker} + L_{gender}};$$

$$\gamma = \frac{L_{gender}}{L_{emotion} + L_{speaker} + L_{gender}}.$$

Лучшие результаты в ходе экспериментов были достигнуты с использованием метода взвешенного среднего.

## Результаты и их обсуждение

Ниже представлены результаты моделей с наименьшим за все время обучения значением функции ошибки на валидационной подвыборке. В качестве метрик качества выбраны доля верно распознанных экземпляров (Ассурасу)

$$acc = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}; \text{ мера точности}$$

$$(\text{Precision}) pr = \frac{TP}{TP + FP}; \text{ мера полноты}$$

$$(\text{Recall}) rec = \frac{TP}{TP + FN}; \text{ а также } F\text{-мера}$$

$$(F_1) F_1 = \frac{TP}{TP + \frac{1}{2}(FP + FN)} = 2 \cdot \frac{pr \cdot rec}{pr + rec}.$$

Здесь  $TP$  (True Positive),  $TN$  (True Negative),  $FP$  (False Positive),  $FN$  (False Negative) – соответственно количество истинноположительных, истинноотрицательных, ложноположительных и ложноотрицательных экземпляров данных, распознанных тестируемой моделью. Результаты экспериментов представлены в табл. 3 и 4.

Сравнение результатов предлагаемой модели с базовыми и известными state-of-the-art решениями на задаче классификации эмоций набора данных ИЕМОСАР представлено в табл. 5.

**Таблица 3.** Результаты предлагаемой модели для распознавания эмоции, диктора и пола диктора

**Table 3.** Results of the proposed model for recognition of an emotion, a speaker and his/her gender

	<i>acc</i>	<i>pr</i>	<i>rec</i>	$F_1$
Эмоция	0,712	0,685	0,666	0,673
Диктор	0,782	0,774	0,771	0,767
Пол диктора	0,969	0,969	0,969	0,969

**Таблица 4.** Результаты распознавания каждого эмоционального класса предлагаемой моделью на наборе данных IEMOCAP**Table 4.** Results of recognition of every individual emotional class by the proposed model for the IEMOCAP dataset

	<i>pr</i>	<i>rec</i>	$F_1$
Гнев	0,820	0,760	0,790
Радость	0,500	0,390	0,440
Нейтральная эмоция	0,700	0,780	0,740
Грусть	0,72	0,73	0,73

**Таблица 5.** Сравнение результатов моделей**Table 5.** Comparison of the results of the models

	acc	pr	rec	f1
Chen и др. [14]	-	-	0,647	-
Gideon и др. [38]	-	-	0,657	-
Satt и др. [15]	0,688	-	-	-
Latuf и др. [17]	0,688	-	-	-
Базовая модель 1	0,688	0,670	0,624	0,613
Базовая модель 2	0,695	0,674	0,631	0,630
Предлагаемая модель	<b>0,712</b>	<b>0,685</b>	<b>0,666</b>	<b>0,672</b>

На наборе данных IEMOCAP предлагаемая модель достигает лучших результатов в распознавании метки Гнев, худших – в распознавании метки Радость (см. табл. 4). Подобная картина совпадает с результатами экспериментов других исследователей на этом наборе данных, и обусловлена его особенностями, а именно высокой степенью разнообразия данных и наименьшей представленностью экземпляров класса Радость. Предлагаемой моделью по сравнению с базовыми получен минимальный прирост accuracy на 0,017, precision – на 0,011, recall – на 0,035,  $F_1$  – на 0,042 (см. табл. 4). Одновременно дан-

ная модель успешно решает две смежные паралингвистические задачи: распознавание диктора с точностью 0,782 и распознавание пола с точностью 0,969.

### Выводы и дальнейшее развитие

С помощью предложенного в данной работе подхода получено улучшение качества распознавания эмоций по сравнению с известными на наборе данных IEMOCAP. Это обуславливает целесообразность применения концепции многозадачного обучения для увеличения точности моделей распознавания эмоций и одновременного решения смежных паралингвистических задач.

При этом, модель достигает полученных результатов благодаря применению автоматического взвешивания значений функций потерь от отдельных задач при формировании итогового значения ошибки в процессе обучения. Такая стратегия позволяет достичь равномерного и одновременного снижения ошибок отдельных задач, и используется в области распознавания эмоций в речи впервые. Модель превышает результаты распознавания эмоций по сравнению с известными подходами (71,2% верно распознанных экземпляров), а также показывает высокие результаты распознавания диктора и пола (78,2% и 96,9% верно распознанных экземпляров соответственно).

В качестве дальнейших исследований планируется выполнить сравнение

результатов распознавания на других наборах данных (RAVDESS [49], EmoDB [30], MSP-IMPROV [39], MSP-PODCAST [50]); провести кросс-корпусные и кросс-языковые эксперименты (обучение на исходном наборе данных/языке, валидация на целевом наборе данных/языке); проверить производительность модели при использовании другого представления эмоций (параметры Знак, Интенсивность, Доминанция); исследовать внутреннее устройство модели с помощью различных техник визуализации (t-SNE [51], Grad-CAM [52]); использовать имеющиеся в наличии большие речевые наборы данных для включения в процесс распознавания эмоций предварительное обучение модели на задачах распознавания диктора и пола.

### Список литературы

1. Tokuno S., Tsumatori, G., Shono S., Takei E., Yamamoto T., Suzuki G., Mituyoshi S., Shimura M. Usage of emotion recognition in military health care // *Defense Science Research Conference and Expo (DSR)*. IEEE, 2011, P. 1-5. <https://doi.org/10.1109/DSR.2011.6026823>
2. Saste S.T., Jagdale S.M. Emotion recognition from speech using MFCC and DWT for security system // *2017 international conference of electronics, communication and aerospace technology (ICECA)*. IEEE, 2017. 1. P. 701-704. <https://doi.org/10.1109/ICECA.2017.8203631>
3. Rázuri J.G., Sundgren D., Rahmani R., Moran A., Bonet I., Larsson A. Speech emotion recognition in emotional feedback for human-robot interaction // *International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence (IJARAI)*. 2015. No. 4(2). P. 20-27. <https://doi.org/10.14569/IJARAI.2015.040204>
4. Bojanić M., Delić V., Karpov A. Call redistribution for a call center based on speech emotion recognition // *Applied Sciences*. 2020. 10(13). P. 4653. <https://doi.org/10.3390/app10134653>

5. Björn W., Schuller L. Speech emotion recognition: two decades in a nutshell, benchmarks, and ongoing trends // *Communications of the Acm.* 2018. 61(5). P. 90-99. <https://doi.org/10.1145/3129340>
6. Вилюнас В.К. *Эмоции* // Большой психологический словарь/под общ. ред. Б.Г. Мещерякова, В.П. Зинченко. URL: <https://psychological.slovaronline.com/2078-EMOTSII>
7. Ильин Е.П. *Эмоции и чувства*. СПб.: Издательский дом "Питер", 2011.
8. Sailunaz K., Dhaliwal M., Rokne J., Alhajj R. Emotion detection from text and speech: a survey // *Social Network Analysis and Mining.* 2018. 8(1). P. 28. <https://doi.org/10.1007/s13278-018-0505-2>
9. Ekman P. Facial expression and emotion // *American psychologist.* 1993. 48 (4). P. 384. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.48.4.384>
10. Russell J.A. Affective space is bipolar // *Journal of personality and social psychology.* 1979. 37 (3). P. 345. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.37.3.345>
11. Russell J.A. Culture and the categorization of emotions // *Psychological bulletin.* – 1991. 110 (3). P. 426. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.110.3.426>
12. Adieu features? end-to-end speech emotion recognition using a deep convolutional recurrent network / G. Trigeorgis, F. Ringeval, R. Brueckner, E. Marchi, M.A. Nicolaou, B. Schuller, S. Zafeiriou // *2016 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP)*. IEEE, 2016. P. 5200-5204. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2016.7472669>
13. Continuous Speech Emotion Recognition with Convolutional Neural Networks / N. Vryzas, L. Vrysis, M. Masiola, R. Kotsakis, C. Dimoulas, G. Kalliris // *Journal of the Audio Engineering Society.* 2020. 68 (1/2). P. 14-24. <https://doi.org/10.17743/jaes.2019.0043>
14. 3-D convolutional recurrent neural networks with attention model for speech emotion recognition / M. Chen, X. He, J. Yang, H. Zhang // *IEEE Signal Processing Letters.* 2018. 25(10). P. 1440-1444. <https://doi.org/10.1109/LSP.2018.2860246>
15. Satt A., Rozenberg S., Hoory R. Efficient Emotion Recognition from Speech Using Deep Learning on Spectrograms // *Interspeech.* 2017. P. 1089-1093. <https://doi.org/10.21437/Interspeech.2017-200>
16. Zhang Z., Wu B., Schuller B. Attention-augmented end-to-end multi-task learning for emotion prediction from speech // *ICASSP 2019-2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. IEEE, 2019. P. 6705-6709. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2019.8682896>
17. Affective video content analysis: A multidisciplinary insight / Y. Baveye, C. Chamaret, E. Dellandréa, L. Chen // *IEEE Transactions on Affective Computing.* 2017. 9(4). P. 396-409. <https://doi.org/10.1109/TAFFC.2020.2983669>
18. Caruana R. Multitask learning // *Machine learning.* 1997. 28(1). P. 41-75. <https://doi.org/10.1023/A:1007379606734>

19. IEMOCAP: Interactive emotional dyadic motion capture database / C. Busso, M. Bulut, C.C. Lee, A. Kazemzadeh, E. Mower, S. Kim, J. Chang, S. Lee, S.S. Narayanan // *Language resources and evaluation*. 2008. 42(4). P. 335. <https://doi.org/10.1007/s10579-008-9076-6>

20. The Geneva minimalistic acoustic parameter set (GeMAPS) for voice research and affective computing / F. Eyben, K.R. Scherer, B.W. Schuller, J. Sundberg, E. André, C. Busso, L. Devillers, J. Epps, P. Laukka, S. Narayanan, K. Truong // *IEEE transactions on affective computing*. 2015. 7(2). P. 190-202. <https://doi.org/10.1109/TAFFC.2015.2457417>

21. The INTERSPEECH 2013 computational paralinguistics challenge: Social signals, conflict, emotion, autism / B. Schuller, S. Steidl, A. Batliner, A. Vinciarelli, K. Scherer, F. Ringeval, M. Chetouani, F. Weninger, F. Eyben, E. Marchi, M. Mortillaro, H. Salamin, A. Polychroniou, F. Valente, S. Kim // *Proceedings INTERSPEECH 2013, 14th Annual Conference of the International Speech Communication Association*, Lyon, France. 2013. URL: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1189705/file.pdf>

22. Akçay M.B., Oğuz K. Speech emotion recognition: Emotional models, databases, features, preprocessing methods, supporting modalities, and classifiers // *Speech Communication*. 2020. 116. P. 56-76. <https://doi.org/10.1016/j.specom.2019.12.001>

23. The relevance of feature type for the automatic classification of emotional user states: low level descriptors and functionals / B. Schuller, A. Batliner, D. Seppi, S. Steidl, T. Vogt, J. Wagner, L. Devillers, L. Vidrascu, N. Amir, L. V. Kessous Aharonson // *Eighth Annual Conference of the International Speech Communication Association*. 2007. P. 2253-2256. URL: [https://www.isca-speech.org/archive/interspeech\\_2007/i07\\_2253.html](https://www.isca-speech.org/archive/interspeech_2007/i07_2253.html)

24. Introducing the RECOLA multimodal corpus of remote collaborative and affective interactions / F. Ringeval, A. Sonderegger, J. Sauer, D. Lalanne // *2013 10th IEEE international conference and workshops on automatic face and gesture recognition (FG)*. IEEE, 2013. P. 1-8. <https://doi.org/10.1109/FG.2013.6553805>

25. Sound classification using convolutional neural network and tensor deep stacking network / A. Khamparia, D. Gupta, N.G. Nguyen, A. Khanna, B. Pandey, P. Tiwari // *IEEE Access*. 2019. 7. P. 7717-7727. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2888882>

26. Speaker-independent Japanese isolated speech word recognition using TDRC features / N.S.S. Srinivas, N. Sugan, L.S. Kumar, M.K. Nath, A. Kanhe // *2018 International CET Conference on Control, Communication, and Computing (IC4)*. IEEE, 2018. P. 278-283. <https://doi.org/10.1109/CETIC4.2018.8530947>

27. Speaker identification using FrFT-based spectrogram and RBF neural network / P. Li, Y. Li, D. Luo, H. Luo // *2015 34th Chinese Control Conference (CCC)*. IEEE, 2015. P. 3674-3679. <https://doi.org/10.1109/ChiCC.2015.7260207>

28. Speech emotion recognition for performance interaction / N. Vryzas, R. Kotsakis, A. Liatsou, C.A. Dimoulas, G. Kalliris // *Journal of the Audio Engineering Society*. 2018. 66(6). P. 457-467. <https://doi.org/10.17743/jaes.2018.0036>
29. Attention-based models for speech recognition / J.K. Chorowski, D. Bahdanau, D. Serdyuk, K. Cho, Y. Bengio // *Advances in neural information processing systems*. 2015. 28. P. 577-585. URL: <https://papers.nips.cc/paper/2015/hash/1068c6e4c8051cfd4e9ea8072e3189e2-Abstract.html>
30. A database of German emotional speech / F. Burkhardt, A. Paeschke, M. Rolfes, W.F. Sendlmeier, B. Weiss // *Ninth European Conference on Speech Communication and Technology*. 2005. URL: [https://www.isca-speech.org/archive/archive\\_papers/interspeech\\_2005/i05\\_1517.pdf](https://www.isca-speech.org/archive/archive_papers/interspeech_2005/i05_1517.pdf)
31. Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting / N. Srivastava, G. Hinton, A., Krizhevsky I. Sutskever, R. Salakhutdinov // *The journal of machine learning research*. 2014. 15(1). P. 1929-1958. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/2627435.2670313>
32. Bilen H., Vedaldi A. Universal representations: The missing link between faces, text, planktons, and cat breeds // arXiv preprint arXiv:1701.07275. 2017.
33. Das A., Hasegawa-Johnson M., Veselý K. Deep Auto-Encoder Based Multi-Task Learning Using Probabilistic Transcriptions // *INTERSPEECH*. 2017. P. 2073-2077. <https://doi.org/10.21437/Interspeech.2017-582>
34. Sanh V., Wolf T., Ruder S. A hierarchical multi-task approach for learning embeddings from semantic tasks // *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. – 2019. 33. P. 6949-6956. <https://doi.org/10.1609/aaai.v33i01.33016949>
35. Distral: Robust multitask reinforcement learning / Y. Teh, V. Bapst, W.M. Czarnecki, J. Quan, J. Kirkpatrick, R. Hadsell, N. Heess, R. Pascanu // *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2017. 30. P. 4496-4506. URL: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2017/hash/0abdc563a06105aee3c6136871c9f4d1-Abstract.html>
36. Ranjan R., Patel V.M., Chellappa R. Hyperface: A deep multi-task learning framework for face detection, landmark localization, pose estimation, and gender recognition // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2017. 41(1). P. 121-135. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2017.2781233>
37. Parthasarathy S., Busso C. Jointly Predicting Arousal, Valence and Dominance with Multi-Task Learning // *Interspeech*. 2017. P. 1103-1107. URL: [https://www.isca-speech.org/archive/Interspeech\\_2017/pdfs/1494.PDF](https://www.isca-speech.org/archive/Interspeech_2017/pdfs/1494.PDF)
38. Progressive neural networks for transfer learning in emotion recognition / J. Gideon, S. Khorram, Z. Aldeneh, D. Dimitriadis, E.M. Provost // arXiv preprint arXiv:1706.03256. 2017.
39. MSP-IMPROV: An acted corpus of dyadic interactions to study emotion perception / C. Busso, S. Parthasarathy, A. Burmania, M. AbdelWahab, N. Sadoughi, E.M. Provost //

*IEEE Transactions on Affective Computing*. 2016. 8(1). P. 67-80. <https://doi.org/10.1109/TAFFC.2016.2515617>

40. Kendall A., Gal Y., Cipolla R. Multi-task learning using uncertainty to weigh losses for scene geometry and semantics // *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2018. P. 7482-7491. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00781>

41. Iebel L., Körner M. Auxiliary tasks in multi-task learning // arXiv preprint arXiv:1805.06334. 2018.

42. A comparison of loss weighting strategies for multi task learning in deep neural networks / T. Gong, T. Lee, C. Stephenson, V. Renduchintala, S. Padhy, A. Ndirango, G. Keskin, O.H. Elibol // *IEEE Access*. 2019. 7. P. 141627-141632. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2943604>

43. Liu S., Johns E., Davison A. J. End-to-end multi-task learning with attention // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2019. P. 1871-1880. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2019.00197>

44. Gradnorm: Gradient normalization for adaptive loss balancing in deep multitask networks / Z. Chen, V. Badrinarayanan, C.Y. Lee, A. Rabinovich // *International Conference on Machine Learning*. PMLR, 2018. P. 794-803. URL: <http://proceedings.mlr.press/v80/chen18a.html>

45. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks // *Communications of the ACM*. 2017. 60(6). P. 84-90. URL: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3065386>

46. Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition // arXiv preprint arXiv:1409.1556. 2014.

47. He K. et al. Deep residual learning for image recognition // *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2016. P. 770-778. URL: [https://openaccess.thecvf.com/content\\_cvpr\\_2016/html/He\\_Deep\\_Residual\\_Learning\\_CVPR\\_2016\\_paper.html](https://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2016/html/He_Deep_Residual_Learning_CVPR_2016_paper.html)

48. Kingma D.P., Ba J. Adam: A method for stochastic optimization // arXiv preprint arXiv:1412.6980. 2014.

49. Livingstone S.R., Russo F.A. The Ryerson Audio-Visual Database of Emotional Speech and Song (RAVDESS): A dynamic, multimodal set of facial and vocal expressions in North American English // *PloS one*. 2018. 13(5). P. e0196391. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196391>

50. Matorioyad S., Lotfian R., Busso C. Building a naturalistic emotional speech corpus by retrieving expressive behaviors from existing speech corpora // *Fifteenth Annual Conference of the International Speech Communication Association*. 2014. URL: [https://www.isca-speech.org/archive/interspeech\\_2014/i14\\_0238.html](https://www.isca-speech.org/archive/interspeech_2014/i14_0238.html)

51. Maaten L., Hinton G. Visualizing data using t-SNE // *Journal of machine learning research*. 2008. 9(Nov). P. 2579-2605. URL: <https://www.jmlr.org/papers/v9/vandermaaten08a.html>
52. Grad-cam: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization / R.R. Sel-varaju, M. Cogswell, A. Das, R. Vedantam, D. Parikh, D. Batra // *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*. 2017. P. 618-626. URL: [https://openaccess.thecvf.com/content\\_iccv\\_2017/html/Selvaraju\\_Grad-CAM\\_Visual\\_Explanations\\_ICCV\\_2017\\_paper.html](https://openaccess.thecvf.com/content_iccv_2017/html/Selvaraju_Grad-CAM_Visual_Explanations_ICCV_2017_paper.html)

## References

1. Tokuno S., Tsumatori, G., Shono S., Takei E., Yamamoto T., Suzuki G., Mituyoshi S., Shimura M. Usage of emotion recognition in military health care. *Defense Science Research Conference and Expo (DSR)*. IEEE, 2011:1-5. <https://doi.org/10.1109/DSR.2011.6026823>
2. Saste S.T., Jagdale S.M. Emotion recognition from speech using MFCC and DWT for security system. *2017 international conference of electronics, communication and aerospace technology (ICECA)*. IEEE, 2017; 1:701-704. <https://doi.org/10.1109/ICECA.2017.8203631>
3. Rázuri J.G., Sundgren D., Rahmani R., Moran A., Bonet I., Larsson A. Speech emotion recognition in emotional feedback for human-robot interaction. *International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence (IJARAI)*, 2015, 4(2), pp. 20-27. <https://doi.org/10.14569/IJARAI.2015.040204>
4. Bojanić M., Delić V., Karpov A. Call redistribution for a call center based on speech emotion recognition. *Applied Sciences*, 2020, no. 10(13), pp. 46-53. <https://doi.org/10.3390/app10134653>
5. Björn W., Schuller L. Speech emotion recognition: two decades in a nutshell, benchmarks, and ongoing trends. *Communications of the Acm*, 2018, no. 61(5), pp.90-99. <https://doi.org/10.1145/3129340>
6. Vilyunas V.K. [Emotions]. *Bol'shoj psichologicheskij slovar'* [Big psychological dictionary] / pod obshch. red. B.G. Meshcheryakova, V.P. Zinchenko (In Russ.). Available at: <https://psychological.slovaronline.com/2078-EMOTSII>
7. Il'in E.P., *Emocii i chuvstva* [Emotions and feelings]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2011 (In Russ.)
8. Sailunaz K., Dhaliwal M., Rokne J., Alhaji R. Emotion detection from text and speech: a survey. *Social Network Analysis and Mining*, 2018, no. 8(1), p. 28. <https://doi.org/10.1007/s13278-018-0505-2>
9. Ekman P. Facial expression and emotion. *American psychologist*, 1993. 48(4), 384 p. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.48.4.384>
10. Russell J.A. Affective space is bipolar. *Journal of personality and social psychology*, 1979, no. 37 (3), 345 p. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.37.3.345>

11. Russell J.A. Culture and the categorization of emotions. *Psychological bulletin*, 1991, no. 110 (3), 426 p. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.110.3.426>
12. Trigeorgis G., Ringeval F., Brueckner R., Marchi E., Nicolaou M.A., Schuller B., Zafeiriou S. Adieu features? end-to-end speech emotion recognition using a deep convolutional recurrent network. *2016 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP)*. IEEE, 2016:5200-5204. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2016.7472669>
13. Vryzas N., Vrysis L., Matsiola M., Kotsakis R., Dimoulas C., Kalliris G. Continuous Speech Emotion Recognition with Convolutional Neural Networks. *Journal of the Audio Engineering Society*, 2020, no. 68(1/2), pp. 14-24. <https://doi.org/10.17743/jaes.2019.0043>
14. Chen M., He X., Yang J., Zhang H. 3-D convolutional recurrent neural networks with attention model for speech emotion recognition. *IEEE Signal Processing Letters*, 2018, no. 25(10), pp.1440-1444. <https://doi.org/10.1109/LSP.2018.2860246>
15. Satt A., Rozenberg S., Hoory R. Efficient Emotion Recognition from Speech Using Deep Learning on Spectrograms. *Interspeech*, 2017, pp. 1089-1093. <https://doi.org/10.21437/Interspeech.2017-200>
16. Zhang Z., Wu B., Schuller B. Attention-augmented end-to-end multi-task learning for emotion prediction from speech. *ICASSP 2019-2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. IEEE, 2019, pp. 6705-6709. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2019.8682896>
17. Baveye Y., Chamaret C., Dellandréa E., Chen L. Affective video content analysis: A multidisciplinary insight. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 2017, no. 9(4), pp. 396-409. <https://doi.org/10.1109/TAFFC.2020.2983669>
18. Caruana R. Multitask learning. *Machine learning*, 1997, no. 28(1), pp. 41-75. <https://doi.org/10.1023/A:1007379606734>
19. Busso C., Bulut M., Lee C.C., Kazemzadeh A., Mower E., Kim S., Chang J., Lee S., Narayanan S.S. IEMOCAP: Interactive emotional dyadic motion capture database. *Language resources and evaluation*, 2008, no. 42(4), 335 p. <https://doi.org/10.1007/s10579-008-9076-6>
20. Eyben F., Scherer K.R., Schuller B.W., Sundberg J., André E., Busso C., Devillers L., Epps J., Laukka P., Narayanan S., Truong K. The Geneva minimalistic acoustic parameter set (GeMAPS) for voice research and affective computing. *IEEE transactions on affective computing*, 2015, no. 7(2), pp. 190-202. <https://doi.org/10.1109/TAFFC.2015.2457417>
21. Schuller B., Steidl S., Batliner A., Vinciarelli A., Scherer K., Ringeval F., Chetouani M., Weninger F., Eyben F., Marchi E., Mortillaro M., Salamin H., Polychroniou A., Valente F., Kim S. The INTERSPEECH 2013 computational paralinguistics challenge: Social signals, conflict, emotion, autism. *Proceedings INTERSPEECH 2013, 14th Annual Conference of the International Speech Communication Association*, Lyon, France, 2013. Available at: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1189705/file.pdf>

22. Akçay M.B., Oğuz K. Speech emotion recognition: Emotional models, databases, features, preprocessing methods, supporting modalities, and classifiers. *Speech Communication*. 2020, no. 116, pp. 56-76. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.specom.2019.12.001>
23. Schuller B., Batliner A., Seppi D., Steidl S., Vogt T., Wagner J., Devillers L., Vidrascu L., Amir N., Kessous L. Aharonson V. The relevance of feature type for the automatic classification of emotional user states: low level descriptors and functionals. *Eighth Annual Conference of the International Speech Communication Association*, 2007, pp. 2253-2256. Available at: [https://www.isca-speech.org/archive/interspeech\\_2007/i07\\_2253.html](https://www.isca-speech.org/archive/interspeech_2007/i07_2253.html)
24. Ringeval F., Sonderegger A., Sauer J., Lalanne D. Introducing the RECOLA multi-modal corpus of remote collaborative and affective interactions. *2013 10th IEEE international conference and workshops on automatic face and gesture recognition (FG)*. IEEE, 2013, pp. 1-8. <https://doi.org/10.1109/FG.2013.6553805>
25. Khamparia A., Gupta D., Nguyen N.G., Khanna A., Pandey B., Tiwari P. Sound classification using convolutional neural network and tensor deep stacking network. *IEEE Access*, 2019; 7:7717-7727. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2888882>
26. Srinivas N.S.S., Sukan N., Kumar L.S., Nath M.K., Kanhe A. Speaker-independent Japanese isolated speech word recognition using TDRC features. *2018 International CET Conference on Control, Communication, and Computing (IC4)*. IEEE, 2018, pp. 278-283. <https://doi.org/10.1109/CETIC4.2018.8530947>
27. Li P., Li Y., Luo D., Luo H. Speaker identification using FrFT-based spectrogram and RBF neural network. *2015 34th Chinese Control Conference (CCC)*. IEEE, 2015, pp. 3674-3679. <https://doi.org/10.1109/ChiCC.2015.7260207>
28. Vryzas N., Kotsakis R., Liatsou A., Dimoulas C.A., Kalliris G. Speech emotion recognition for performance interaction. *Journal of the Audio Engineering Society*, 2018, 66(6), pp.457-467. <https://doi.org/10.17743/jaes.2018.0036>
29. Chorowski J.K., Bahdanau D., Serdyuk D., Cho K., Bengio Y. Attention-based models for speech recognition. *Advances in neural information processing systems*, 2015, 28, pp. 577-585. Available at: <https://papers.nips.cc/paper/2015/hash/1068c6e4c8051cfd4e9ea8072e3189e2-Abstract.html>
30. Burkhardt F., Paeschke A., Rolfes M., Sendlmeier W.F., Weiss B. A database of German emotional speech. *Ninth European Conference on Speech Communication and Technology*, 2005. Available at: [https://www.isca-speech.org/archive/archive\\_papers/interspeech\\_2005/i05\\_1517.pdf](https://www.isca-speech.org/archive/archive_papers/interspeech_2005/i05_1517.pdf)
31. Srivastava N., Hinton G., Krizhevsky A., Sutskever I., Salakhutdinov R. Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting. *The journal of machine learning research*. 2014, no. 15(1), pp.1929-1958. Available at: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/2627435.2670313>
32. Bilen H., Vedaldi A. Universal representations: The missing link between faces, text, planktons, and cat breeds. arXiv preprint arXiv:1701.07275. 2017.

33. Das A., Hasegawa-Johnson M., Veselý K. Deep Auto-Encoder Based Multi-Task Learning Using Probabilistic Transcriptions. *INTERSPEECH*, 2017, pp. 2073-2077. <https://doi.org/10.21437/Interspeech.2017-582>
34. Sanh V., Wolf T., Ruder S. A hierarchical multi-task approach for learning embeddings from semantic tasks. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2019, no. 33. pp. 6949-6956. <https://doi.org/10.1609/aaai.v33i01.33016949>
35. Teh Y., Bapst V., Czarnecki W.M., Quan J., Kirkpatrick J., Hadsell R., Heess N., Pascanu R. Distal: Robust multitask reinforcement learning. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2017, no. 30, pp.4496-4506. Available at: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2017/hash/0abdc563a06105aee3c6136871c9f4d1-Abstract.html>
36. Ranjan R., Patel V.M., Chellappa R. Hyperface: A deep multi-task learning framework for face detection, landmark localization, pose estimation, and gender recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2017, no. 41(1), pp. 121-135. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2017.2781233>
37. Parthasarathy S., Busso C. Jointly Predicting Arousal, Valence and Dominance with Multi-Task Learning. *Interspeech*. 2017:1103-1107. Available at: [https://www.isca-speech.org/archive/Interspeech\\_2017/pdfs/1494.PDF](https://www.isca-speech.org/archive/Interspeech_2017/pdfs/1494.PDF)
38. Gideon J., Khorram S., Aldeneh Z., Dimitriadis D., Provost E.M. Progressive neural networks for transfer learning in emotion recognition. arXiv preprint arXiv:1706.03256. 2017.
39. Busso C., Parthasarathy S., Burmania A., AbdelWahab M., Sadoughi N., Provost E.M. MSP-IMPROV: An acted corpus of dyadic interactions to study emotion perception. *IEEE Transactions on Affective Computing*,. 2016, no. 8(1), pp.67-80. <https://doi.org/10.1109/TAFFC.2016.2515617>
40. Kendall A., Gal Y., Cipolla R. Multi-task learning using uncertainty to weigh losses for scene geometry and semantics. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2018, pp.7482-7491. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00781>
41. Liebel L., Körner M. Auxiliary tasks in multi-task learning. arXiv preprint arXiv:1805.06334. 2018.
42. Gong T., Lee, T., Stephenson C., Renduchintala V., Padhy S., Ndirango A., Keskin G., Elibol O.H. A comparison of loss weighting strategies for multi task learning in deep neural networks. *IEEE Access*. 2019; 7:141627-141632. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2943604>

43. Liu S., Johns E., Davison A. J. End-to-end multi-task learning with attention. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2019, pp. 1871-1880. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2019.00197>
44. Chen Z., Badrinarayanan V., Lee C.Y., Rabinovich A. Gradnorm: Gradient normalization for adaptive loss balancing in deep multitask networks. *International Conference on Machine Learning*. PMLR, 2018. pp.794-803. <http://proceedings.mlr.press/v80/chen18a.html>
45. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Communications of the ACM*, 2017, no. 60(6), pp.84-90. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3065386>
46. Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. arXiv preprint arXiv:1409.1556. 2014.
47. He K. et al. Deep residual learning for image recognition. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016, pp. 770-778. Available at: [https://openaccess.thecvf.com/content\\_cvpr\\_2016/html/He\\_Deep\\_Residual\\_Learning\\_CVPR\\_2016\\_paper.html](https://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2016/html/He_Deep_Residual_Learning_CVPR_2016_paper.html)
48. Kingma D.P., Ba J. Adam: A method for stochastic optimization. arXiv preprint arXiv:1412.6980. 2014.
49. Livingstone S.R., Russo F.A. The Ryerson Audio-Visual Database of Emotional Speech and Song (RAVDESS): A dynamic, multimodal set of facial and vocal expressions in North American English. *PloS one*, 2018, no. 13(5):e0196391. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196391>
50. Mariooryad S., Lotfian R., Busso C. Building a naturalistic emotional speech corpus by retrieving expressive behaviors from existing speech corpora. *Fifteenth Annual Conference of the International Speech Communication Association*. 2014. Available at: [https://www.isca-speech.org/archive/interspeech\\_2014/i14\\_0238.html](https://www.isca-speech.org/archive/interspeech_2014/i14_0238.html)
51. Maaten L., Hinton G. Visualizing data using t-SNE. *Journal of machine learning research*, 2008, 9(Nov), pp. 2579-2605. Available at: <https://www.jmlr.org/papers/v9/vandermaaten08a.html>
52. Selvaraju R.R., Cogswell M., Das A., Vedantam R., Parikh D., Batra D. Gradcam: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization. *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*. 2017:618-626. Available at: [https://openaccess.thecvf.com/content\\_iccv\\_2017/html/Selvaraju\\_Grad-CAM\\_Visual\\_Explanations\\_ICCV\\_2017\\_paper.html](https://openaccess.thecvf.com/content_iccv_2017/html/Selvaraju_Grad-CAM_Visual_Explanations_ICCV_2017_paper.html)

## Информация об авторах / Information about the Authors

**Рябинов Артем Валерьевич**, программист лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: iamryabinov@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3572-4493>

**Уздяев Михаил Юрьевич**, младший научный сотрудник лаборатории технологий больших данных социкиберфизических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: m.y.uzdiaev@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7032-0291>

**Ватаманюк Ирина Валерьевна**, младший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: vatamaniuk.i.v@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5388-8152>

**Artem V. Ryabinov**, Software Engineer of Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: iamryabinov@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3572-4493>

**Mikhail Yu. Uzdiaev**, Junior Researcher of Laboratory of Big Data In Socio-Cyberphysical Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: m.y.uzdiaev@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7032-0291>

**Irina V. Vatamaniuk**, Junior Researcher of Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: vatamaniuk.i.v@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5388-8152>

## Метод измерения влажности пиломатериала, реализуемый на ПЛК

В. В. Нгуен<sup>1</sup>, А. А. Шилин<sup>1</sup>✉, П. М. Момот<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Томский политехнический университет,  
пр. Ленина 30, г. Томск 634050, Российская Федерация

✉ e-mail: shiiln@tpu.ru

### Резюме

**Цель исследования.** Решение научно-практической проблемы измерения влажности пиломатериала на базе программируемого логического контроллера (ПЛК), позволяющее реализовывать системы управления сушкой пиломатериалов на недорогих контроллерах широкого применения с преимуществами современных SCADA систем.

**Методы.** Для достижения поставленной цели исследованы современные методы оценки влажности пиломатериала по электрическому сопротивлению. Приведён обзор и анализ известных зависимостей электрического сопротивления пиломатериала от влажности. Отмечена необходимость измерения сопротивления в диапазоне 2,5 Ком до 25 Мом. Описано схематическое решение согласования с ПЛК моста измерения высокоомного сопротивления с дополнительным источником напряжения. Предложена методика расчёта схемы согласования. Получены выражения для вычисления влажности по данным аналого-цифрового преобразователя. Приведена процедура настройки канала измерения по показаниям двух эталонных измерений.

**Результаты.** Выполнена оценка погрешности измерения влажности и сопротивления. Показано, что погрешность измерения сопротивления до 20 % приводит к погрешности измерения влажности до 1 %, при условии корректной настройки параметров. Для настройки достаточно выполнить два эталонных измерения, чтобы выполнить процедуру настройки параметров измерения влажности.

**Заключение.** В процессе проектирования современных систем сушки пиломатериалов можно воспользоваться доступными и хорошо представленными в литературе алгоритмами и программами технологического процесса для реализации на ПЛК. В статье предложено необходимое для указанных алгоритмов и программ решение основной проблемы измерения влажности пиломатериала. Материал может быть полезен для исследования технологических этапов процесса сушки и разработки промышленных систем управления на базе недорогих контроллеров.

**Ключевые слова:** программируемые логические контроллеры; ПЛК; влажность древесины; линеаризация; электрическое сопротивление древесины; системы управления камерой осушения.

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

**Для цитирования:** Нгуен В. В., Шилин А. А., Момот П. М. Метод измерения влажности пиломатериала, реализуемый на ПЛК // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(1): 110-121. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-110-121>.

Поступила в редакцию 10.02.2021

Подписана в печать 04.03.2021

Опубликована 31.03.2021

© Нгуен В. В., Шилин А. А., Момот П. М., 2021

## PLC-based lumber humidity measurement method

Van V. Nguyen<sup>1</sup>, Aleksandr A. Shilin<sup>1</sup> ✉, Pavel M. Momot<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tomsk Polytechnic University  
30 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russian Federation

✉ e-mail: shiiln@tpu.ru

### Abstract

**Purpose or research.** The paper considers the solution of the scientific and practical problem of measuring the humidity content of lumber on the basis of a programmable logic controller (PLC), which makes it possible to implement control systems for drying lumber on inexpensive controllers of wide application with the advantages of modern SCADA systems.

**Methods.** To achieve this goal, modern methods for assessing the humidity content of lumber by electrical resistance have been investigated. We have provided a review and analysis of the known dependences of the electrical resistance of lumber on moisture. It is noted the need to measure resistance in the range of 2.5 K $\Omega$  to 25 M $\Omega$ . The schematic solution for matching a high-resistance measurement bridge with an additional voltage source with a PLC is described here. We have proposed a method for calculating the matching scheme. Expressions are obtained for calculating humidity according to the data of an analog-to-digital converter. The procedure for setting up the measurement channel according to the readings of two reference measurements is presented.

**Results.** The estimation of the measurement error of humidity and resistance is carried out. It is shown that a resistance measurement error of up to 20% leads to a humidity measurement error of up to 1%, provided that the parameters are correctly configured. To set it up, it is enough to take two reference measurements to complete the procedure for setting the humidity measurement parameters.

**Conclusion.** In the process of designing modern systems for drying lumber, you can use the algorithms and programs of the technological process available and well presented in the literature for implementation on the PLC. The article offers a solution to the main problem of measuring the humidity content of lumber, which is necessary for these algorithms and programs. The material can be useful for researching technological stages of the drying process and developing industrial control systems based on inexpensive controllers.

**Keywords:** programmable logic controllers; PLC; wood humidity content ; linearization; electrical resistance of wood ; drying chamber control systems.

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

**For citation:** Nguyen V. V., Shilin A. A., Momot P. M. PLC-based lumber humidity measurement method. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(1): 110-121 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-110-121>.

Received 10.02.2021

Accepted 04.03.2021

Published 31.03.2021

\*\*\*

### Введение

Проблема измерения влажности пиломатериалов на программируемых логических контроллерах заключается в

том, что в качестве датчиков влажности материала промышленностью предлагается дорогое (от 20 т. руб) решение с

унифицированным выходом (4-20 мА или 0-10V). Стоимость таких датчиков чрезвычайно завышена, в связи с тем, что метод измерения является интеллектуальной собственностью. В научных работах [1] имеется достаточно много информации, пригодной для разработки устройства измерения сопротивления [2] и статических характеристик [3], из которой возможен синтез алгоритмов вычисления влажности [4]. Существуют и другие методы измерения влажности [5, 6]. Проблема реализации технологии сушки древесины является актуальной и подробно рассматривается в статьях [7, 8, 9, 10].

При разработке системы управления камерой сушки пиломатериалов [11, 12, 13] на базе ПЛК не возникает особых проблем кроме реализации датчика влажности материала. Решение научно-практической задачи согласования измерительного зонда с контроллером и синтеза алгоритма вычисления влажности позволило бы создать систему управления со многими преимуществами унифицированных ПЛК таких как: совместимость со SCADA системами [14, 15], архивирование данных, удалённое наблюдение и управление процессом и т. д. По этой причине создание методики измерения влажности пиломатериала на базе ПЛК является актуальной задачей, позволяющей расширить возможности системы управления осушением. В статье [16] рассматривается методика измерения сопротивления древесины, но не приводятся алгоритмы для практической реализации.

Целью работы является разработка схемы согласования измерительного зонда, пригодной для реализации на ПЛК, метод расчёта элементов схемы, а также синтез алгоритма вычисления влажности и процедуры настройки.

## Материалы и методы

Поскольку унифицированный аналоговый вход ПЛК не предназначен для измерения высокоомных сопротивлений, предлагается схема согласования со стандартным входом измерения напряжения с максимально возможным входным сопротивлением. Схема согласования представлена на рис. 1

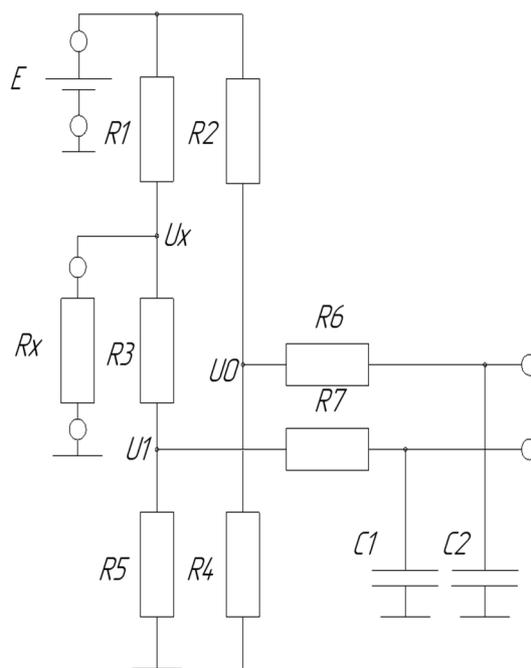


Рис.1. Схема согласования

Fig.1. Matching scheme

На схеме:  $E$  — дополнительный источник напряжения от 12 до 500 вольт;  $R_x$  — измеряемое сопротивление зонда. Для схемы можно записать систему уравнений

$$\begin{cases} u_0 = \frac{ER_4}{(R_2 + R_4)}, \\ u_1 = \frac{u_x R_5}{(R_3 + R_5)}, \\ u_x = \frac{R_x(R_3 + R_5)}{R_x(R_3 + R_5) + R_1(R_3 + R_5 + R_x)}. \end{cases} \quad (1)$$

Систему уравнений (1) следует решить относительно  $R_x$ .

$$\begin{aligned} R_x &= \frac{k_1 R_1 u_1}{k_0 u_0 - u_1(k_1 + R_1 / R_5)}, \\ k_0 &= \frac{R_2 + R_4}{R_4}, k_1 = \frac{R_3 + R_5}{R_5}. \end{aligned} \quad (2)$$

Значение  $R_6$  и  $R_7$  имеют достаточно малое значение сопротивления, которым можно пренебречь. Сопротивления  $R_4$  и  $R_5$  представляют собой параллельные соединения подстраиваемого резистора и входного сопротивления АЦП ПЛК. По этой причине, чем больше входное сопротивление АЦП, тем большую чувствительность к изменению сопротивления  $R_x$  можно достичь. Максимальная точность измерения сопротивления  $R_x$  достигается при его значении

$$R_x = R_1(R_3 + R_5) / (R_1 + R_3 + R_5). \quad (3)$$

Значение  $R_5$  не рекомендуется выбирать больше 100 кОм, так как входной ток канала АЦП станет соизмеримым с токами утечки в транзисторах, что повлияет на качество и линейность измерения.

Определившись с серединой диапазона согласно выражению (3) выбираются значения  $R_1$  и  $R_3$ . Далее можно

определиться с напряжением источника питания моста

$$\begin{aligned} R_x &= R_1(R_3 + R_5) / (R_1 + R_3 + R_5), \\ E &< \frac{R_1 + R_3 + R_5}{R_5} \cdot u_{ref}, \end{aligned}$$

где  $u_{ref}$  – опорное напряжение АЦП.

В конце вычисляется сопротивление

$$R_2 = \frac{ER_4}{u_{ref}} - R_4, R_4 = R_5.$$

Рассмотрим пример реализации, где  $R_1 = R_3 = 510$  кОм,  $R_2 = 1000$  кОм,  $R_4 = R_5 = 100$  кОм,  $E = 24$  В. На примере микроконтроллера STM32F103 оценим чувствительность и точность измерения сопротивления зонда. Чувствительность определяется разрядностью АЦП. Для рассматриваемого контроллера она составляет 12 бит. Согласно документации, точность ограничена 10 битами. В выражении (2) значения  $u_0$  и  $u_1$  могут быть представлены как напряжением, так и целыми числами в качестве результата измерения АЦП, поскольку применена мостовая схема измерения сопротивления. Оценка чувствительности и погрешности вычислялась из выражения

$$\begin{aligned} \sigma(\%) &= \frac{R_x(u_1 + 1) - R_x(u_1)}{R_x(u_1)} \cdot 100\%, \\ (u_1 \text{ и } u_0) &\in (0 \dots (2^N - 1)), \end{aligned}$$

где  $N$  – разрядность АЦП ( $N = 12$  – для вычисления чувствительности,  $N = 10$  – для вычисления погрешности).

В табл. 1 приведены вычисленные значения.

Таблица 1. Результаты вычисления

Table 1. Calculation results

$R_x$	Чувствительность, % / Sensitivity, %	Погрешность, % / Measurement error, %
2,5 КОм	4,4	17
25 КОм	0,5	2
250 КОм	0,2	0,8
2,5 МОм	0,4	1,6
25 МОм	3,6	14

Как видно из табл. 1, схема измерения высокоомного сопротивления в рамках двух декад не превышает 2 %, а четырех декад не превышает 20 %.

Для синтеза элементов вычисления влажности в качестве исходной информации используются результаты работы [17], которая до сих пор активно цитируется [18]. Для формирования алгоритма расчета влажности на ПЛК рассматривается зависимость электрического сопротивления пиломатериала [19] от влажности (рис. 2).

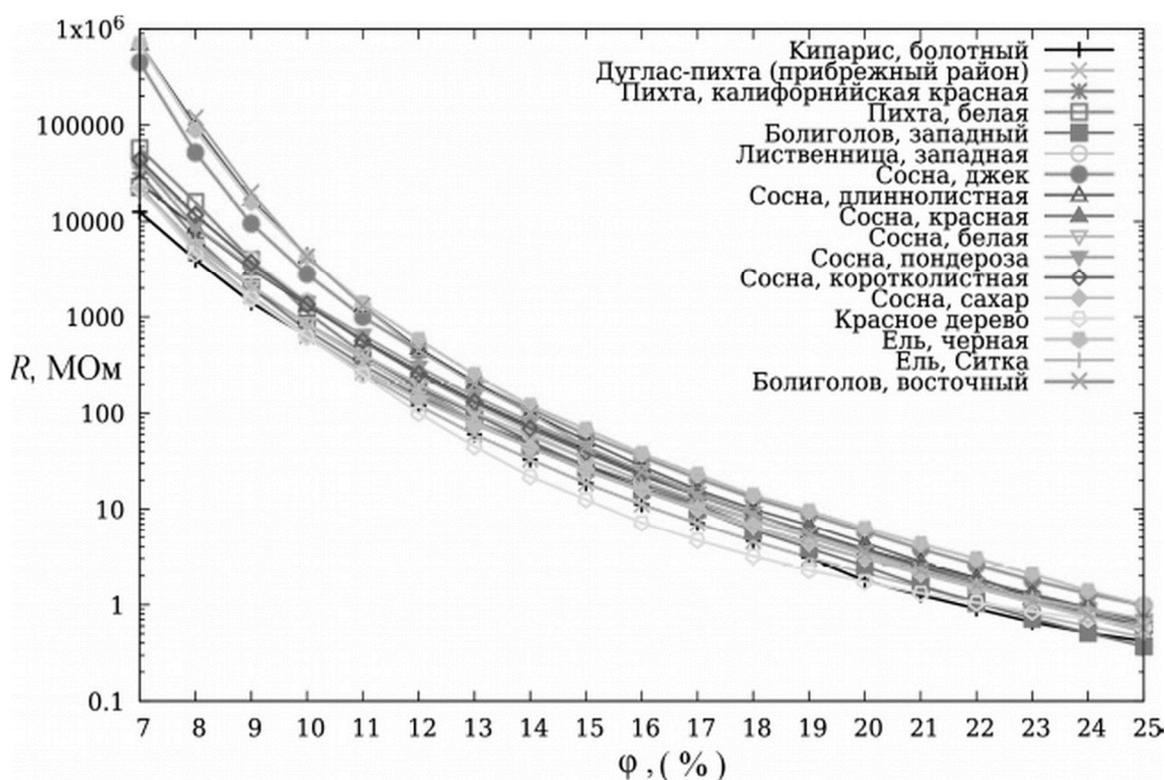


Рис. 2. Зависимость сопротивления от влажности пиломатериала

Fig. 2. Dependence of resistance on lumber humidity content

Результаты эксперимента получены при условии измерения электрического сопротивления между двумя саморезами длиной 0,8 см. Расстояние между саморезами – постоянное: 3,2 см. Эксперимент выполнялся при температуре 27°C.

Как видно из рис. 2, если ось сопротивления представлена логарифмической шкалой сопротивления в мегаомах, то эта зависимость с некоторыми допущениями линейна особенно в диапазоне от 15% до 25%. Для обеспечения работы автомати-

ческой системы достаточно обеспечить диапазон 20% до 40%.

Функция электрического сопротивления пиломатериала от влажности в этом диапазоне примет вид десятичного логарифма электрического сопротивления –  $L_R$ , который зависит от влажности древесины  $\varphi$ .

Если предположить, что функция  $L_R(\varphi)$  – линейная, то зависимость сопротивления от влажности должна быть представлена функцией относительно влажности.

$$R(\varphi) = R(\varphi_0) \cdot k^{(\varphi_{25} - \varphi)},$$

где  $R(\varphi_0)$  – сопротивление зонда, при влажности 25 %;  $k$  – нормирующий параметр, основание степенной функции.

Для вычисления влажности решается уравнение относительно  $\varphi$ , где  $R$  – входная величина;  $k$  – параметр функции, который следует найти для заданных условий применения зонда:

$$\log_{10}(R(\varphi)) = \log_{10}(R(\varphi_0)) + \frac{\varphi_0 - \varphi}{\log_k 10}.$$

Решение будет содержать функцию логарифма с произвольным основанием  $k$ , которое является параметром. Вычислить логарифма с таким основанием в ПЛК сложно. Поэтому результат преобразований удобней представить логарифмом с основанием равным двум. Тогда решение уравнения можно записать в виде

$$\varphi = \varphi_0 + a_k \cdot \log\left(\frac{R(\varphi_0)}{R(\varphi)}\right); a_k = \log_k 2. \quad (4)$$

Следующим важным вопросом для реализации измерения является настройка параметров в выражении (4). Для этого достаточно выполнить два измерения для пиломатериала с влажностью, близкой к нижнему и верхнему диапазону измерения. В качестве эталонного прибора для измерения можно выбрать более прецизионный прибор, или выполнить более трудоемкую процедуру измерения массы двух экземпляров пиломатериала одинакового объема и сравнить с массой абсолютно сухой доски этого же объема. В любом случае в качестве исходной информации будут два измерения влажности.

Если предварительно установить параметры в выражении (4) согласно начальным условиям:

$$R(\varphi_0) = 1 \text{ Мом}, \varphi_0 = 0, \\ k = 2 \text{ или } a_k = \log_2 2 = 1,$$

то для первого и второго материала получим предварительные значения влажности  $\tilde{\varphi}_1, \tilde{\varphi}_2$  (показания прибора) при заданных параметрах. В этих же условиях выполняется измерение влажности эталонным прибором, получают значения  $\varphi_1, \varphi_2$ .

Теперь можно составить систему уравнений:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \varphi_0 + a_k \tilde{\varphi}_1 \\ \varphi_2 = \varphi_0 + a_k \tilde{\varphi}_2. \end{cases}$$

И решить ее относительно параметров настройки канала –  $\varphi_0, a_k$

$$\begin{cases} a_k = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\tilde{\varphi}_2 - \tilde{\varphi}_1}, \\ \varphi_0 = \frac{\varphi_1 \cdot \tilde{\varphi}_2 - \varphi_2 \cdot \tilde{\varphi}_1}{\tilde{\varphi}_2 - \tilde{\varphi}_1}. \end{cases} \quad (5)$$

На примере коротко-лиственной сосны выполнены: измерения влажности на эталонном приборе, сопротивлений – на ПЛК. Из которых вычислены согласно (5) параметры схемы измерения  $\varphi_0, a_k$ . Соответствие влажности и сопротивления зонда приводится ниже

$$\varphi_1 = 17 \%, R(\varphi_1) = 13,8 \text{ МОм}$$

$$\varphi_2 = 25 \%, R(\varphi_2) = 0,66 \text{ МОм.}$$

Результаты вычисления влажности, которой соответствует  $R(\varphi_T)$ , сводятся в табл. 2.

Для оценки погрешности измерения воспользуемся данными из рис. 2. Сформируем таблицу, где  $\varphi_T$  и  $R$  получены из рис. 2.  $\varphi_C$  – по формуле (4) с настроенными согласно выражениям (5). Ошибка в процентах представлена в последней строке.

**Таблица 2.** Результаты вычисления влажности и погрешности

**Table 2.** Results of calculating humidity and error

$\varphi_T, \%$	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$R, \text{МОм}$	13,8	8,7	5,76	3,8	2,63	1,82	1,29	0,93	0,66
$\varphi_C, \%$	17,01	18,22	19,3	20,39	21,36	22,33	23,23	24,09	24,99
$\Delta, \%$	0,01	0,22	0,3	0,39	0,36	0,33	0,23	0,09	0,01

Как видно из табл. 2 ошибка вычисления влажности не превышает 0,4 %. На практике нужно обеспечить более широкий диапазон от 17 % до 40 %. В этом случае погрешность измерения возрастёт, но не превысит 1,0 %.

В процессе эксплуатации и установки зонда обслуживающий персонал может допустить погрешность в расстоянии между саморезами и глубиной вкручивания. Эксперименты показали [20], что расстояние между саморезами имеет простую пропорциональную зависимость сопротивления от расстояния. Так же было отмечено, что ошибка в измерении сопротивления не превышает 20 %, согласно табл.1. Оценим погрешность, вызванную изменением рас-

стояния между саморезами или погрешностью измерения зонда на 20 % с помощью выражения:

$$e(\%) = a_k \cdot \lg_2(1,2).$$

Из результатов измерений при условиях, представленных после рис. 2 –  $a_k = 1,8$ . Таким образом можно рассчитать погрешность измерения влажности, которая равна 0,48 %. Следовательно, ошибка в расстоянии или в измерении сопротивления до 20 %, приводит к ошибке измерения влажности пиломатериала, не превышающей 0,5 %. Такие же результаты можно получить, проанализировав погрешность при допущении ошибки в глубине вворачивания самореза зонда.

## Результаты и их обсуждение

Решена основная проблема измерения высокоомного электрического сопротивления пиломатериала на базе ПЛК добавлением согласующей схемы с дополнительным источником питания. Не смотря на то, что эта схема достаточно простая, расчёт её элементов требует выполнения анализа схемы и получения основных выражений для формирования методики определения значений элементов схемы. В работе приведены результаты анализа схемы и основные формулы для расчета.

Для вычисления влажности собраны и использованы результаты многочисленных экспериментов, опубликованных в научных изданиях. По данным экспериментов отмечена возможность

использования с некоторыми допущениями линейной зависимости логарифма сопротивления пиломатериала от влажности. Из этого тезиса получено выражение для вычисления влажности, пригодное для настройки канала измерения по двум эталонным замерам влажности. Погрешность измерения влажности не превышает 0,5 %.

## Выводы

Результаты работы могут быть полезны для разработчиков систем управления камерами сушки пиломатериалов, поскольку приведена достаточно подробная для использования инструкция реализации измерения влажности на базе любого ПЛК, в котором есть возможность измерения напряжения высоким входным сопротивлением.

## Список литературы

1. Хандожко В. А., Матлахов В. П., Копыткин С. М. Система управления влажностью в сушильной камере на базе приборов фирмы "ОВЕН" // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сб. научн. трудов. Курск, 2014. С. 270-275. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22546753>
2. Чепурин Г. В., Бронза Ю. В. Сухое хранение, как защита от коррозии // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2013. №. 12. С. 80-84. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23340406>
3. Dumitran L. M., Oancea D. C., Dumitran G. E. Experimental study of air dehumidification in an electrostatic wire-cylinder condenser // 2017 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). IEEE, 2017. P. 440-443. DOI: 10.1109/ATEE.2017.7905182
4. A novel dehumidification technique using electric field / M. Arif-uz-Zaman, M. Khan, A. Sadrul M. F. Khan // IEEE Transactions on Industry Applications. 1996. Vol. 32. No. 1. P. 36-40. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Novel-Dehumidification-Technique-Using-Electric-Field-Arifuzzaman-Khan/b2c94eeb1e0f73d5ec22a4deec8bcc54802a02ef#paper-header>

5. Measurement of lumber moisture content based on PCA and GS-SVM / J. Zhang, W. Song, B. Jiang, M. Li. // Journal of Forestry Research. 2017. Vol. 29. No. 2. P. 557–564. DOI:10.1007/s11676-017-0448-x
6. Oh G.-H., Kim H.-S., Park D.-W. In-situ monitoring of moisture diffusion process for wood with terahertz time-domain spectroscopy // Optics and Lasers in Engineering. 2020. Vol. 128. No. 106036. DOI:10.1016/j.optlaseng.2020.106036
7. Characterisation of wood–water relationships and transverse anatomy and their relationship to drying degrade / L. A. Redman, H. Bailleres, I. Turner, P. Perré // Wood Science and Technology. 2016. Vol. 50. No. 4. P. 739–757. DOI:10.1007/s00226-016-0818-0
8. Effects of Drying Temperature and Drying Rate on Occurring Behaviors of Microcracks during Wood Drying / K. Kojiro, M. Ohno, K. Tanaka, Y. Miyoshi, Y. Furuta // Journal of the Society of Materials Science, Japan. 2020. Vol. 69. No. 4, P. 323–328. DOI:10.2472/jsms.69.323
9. Zhan J., Gu J., Cai Y. Analysis of moisture diffusivity of larch timber during convective drying condition by using Crank’s method and Dincer’s method // Journal of Forestry Research. 2017. Vol. 18. No. 3. P. 199–202. DOI:10.1007/s11676-007-0040-x
10. Рудак О. Г., Короб А. Ю. Исследование характера изменения влажности поверхностных и внутренних слоев древесины сосны при прогреве в ненасыщенной среде // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2021. № 1 (240). С. 162–168. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-haraktera-izmeneniya-vlazhnosti-poverhnostnyh-i-vnutrennih-sloev-drevesiny-sosny-pri-progreve-v-nenasyschennoy-srede>
11. Simulation model of an automated system of wood drying process in the VisSim dynamic programming environment/ V. Gryzhov, V. Korolkov, V. Reut, L. Stepanenkova // Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 403. No 012190. DOI: 10.1088/1755-1315/403/1/012190
12. Zheng Z., Keqi W. Rbf based sliding mode control method for lumber drying system// Wood and fiber science. 2019. Vol. 51. No. 3. DOI: 10.22382/wfs-2019-028
13. Energy saving in a convective dryer by using novel real-time exergy-based control schemes adjusting exhaust air recirculation / S. Zohrabi, M. Aghbashlo, S.S. Seiedlou, H. Scaar, J. Mellmann // Journal of Cleaner Production. 2020. No. 120394. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.120394.
14. Дмитриев В. М., Ганджа Т. В. Принцип формирования многоуровневых компьютерных моделей SCADA-систем для управления сложными технологическими объектами // Информатика и системы управления. 2013. №. 2. С. 24-35. URL: [http://ics.khstu.ru/media/2013/N36\\_03.pdf](http://ics.khstu.ru/media/2013/N36_03.pdf)

15. Компьютерное моделирование визуальных интерфейсов виртуальных инструментов и приборов / В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа, В.В. Ганджа, С.А. Панов // Научная визуализация. 2016. Т. 8. №. 3. С. 111-131. URL: <http://sv-journal.org/2016-3/09/?lang=ru>
16. Cracking the code: real-time monitoring of wood drying and the occurrence of cracks / Н. Р. Botter-Kuisch, J. Van den Bulcke, J. M. Baetens, J. Van Acker// Wood Science and Technology. 2020. DOI:10.1007/s00226-020-01200-6
17. James W. L. Electric moisture meters for wood. – US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1963. Vol. 8. URL: <https://www.fpl.fs.fed.us/documents/fplrn/fplrn008.pdf>
18. Fredriksson M., Thybring E. E., Zelinka S. L. Artifacts in electrical measurements on wood caused by non-uniform moisture distributions // Holzforschung. 2020. Vol. 1. No. ahead-of-print. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2020-0138>
19. Lynch C. T. CRC Handbook of Materials Science: Material Composites and Refractory Materials. CRC press, 2020. Vol. 2. URL: [https://books.google.ru/books?id=XDwY0WbE\\_EEC&printsec=frontcover&hl=ru#v=onepage&q&f=false](https://books.google.ru/books?id=XDwY0WbE_EEC&printsec=frontcover&hl=ru#v=onepage&q&f=false)
20. Wood moisture meter [Электронный ресурс]. URL: [https://woodgears.ca/lumber/moisture\\_meter.html](https://woodgears.ca/lumber/moisture_meter.html), (свободный, дата обращения 25.01.2021)

## References

1. Handozhko V. A., Matlahov V. P., Kopytkin S. M. [Humidity control system in the drying chamber based on the devices of the company "OVEN"]. *Sovremennye instrumental'nye sistemy, informatsionnye tekhnologii i innovatsii* [Modern tool systems, information technologies and innovations]. Kursk, 2014, pp. 270-275 (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22546753>.
2. СНепурин G. V., Bronza YU. V. Suhoe hranenie, kak zashchita ot korrozii [Dry storage as the protection against corrosion]. *Santekhnika, otoplenie, konditsionirovanie = Plumbing, Heating, Air conditioning*, 2013, pp. 80-84 (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23340406>.
3. Dumitran L. M., Oancea D. C., Dumitran G. E. Experimental study of air dehumidification in an electrostatic wire-cylinder condenser. *2017 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*. IEEE, 2017, pp. 440-443. DOI: 10.1109/ATEE.2017.7905182
4. Arif-uz-Zaman M., Khan A M., Sadrul M. F. Khan A novel dehumidification technique using electric field. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1996, vol. 32, no. 1, pp. 36-40. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Novel-Dehumidification-Tec-Using-Electric-Field-Arifuzzaman-Khan/b2c94eeb1e0f73d5ec22a4deec8bcc54802a02ef#paper-header>

5. Zhang J., Song W., Jiang B., Li M. Measurement of lumber moisture content based on PCA and GS-SVM. *Journal of Forestry Research*, 2017, vol. 29, no. 2, pp. 557–564. DOI:10.1007/s11676-017-0448-x
6. Oh G.-H., Kim H.-S., Park D.-W. In-situ monitoring of moisture diffusion process for wood with terahertz time-domain spectroscopy. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, vol. 128, no. 106036. DOI:10.1016/j.optlaseng.2020.106036
7. Redman L. A., Bailleres H., Turner I., Perré P... Characterisation of wood–water relationships and transverse anatomy and their relationship to drying degrade. *Wood Science and Technology*, 2016, no. 4, vol. 50, pp. 739–757. DOI:10.1007/s00226-016-0818-0
8. Kojiro K., Ohno M., Tanaka K., Miyoshi Y., Furuta Y. Effects of Drying Temperature and Drying Rate on Occurring Behaviors of Microcracks during Wood Drying. *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, 2020, vol. 69, no. 4, pp. 323–328. DOI: 10.2472/jsms.69.323
9. Zhan J., Gu J., Cai Y. Analysis of moisture diffusivity of larch timber during convective drying condition by using Crank's method and Dincer's method. *Journal of Forestry Research*, 2017, vol. 18, no. 3, pp. 199–202. DOI:10.1007/s11676-007-0040-x
10. Rudak O. G., Korob A. Yu. [Study of the character of moisture change in surface and inner layers of pine wood during heating in a unsaturated environment]. *Trudy BGTU. Ser. 1, Lesnoe khozvo, prirodopol'zovanie i pererab. vozobnovlyaemykh resursov = Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2021, no. 1 (240), pp. 162–168 (In Russ). <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-haraktera-izmeneniya-vlazhnosti-poverhnostnyh-i-vnutrennih-sloev-drevesiny-sosny-pri-progreve-v-nenasyschennoy-srede>
11. Gryzhov V., Korolkov V., Reut V., Stepanenkova L. Simulation model of an automated system of wood drying process in the VisSim dynamic programming environment. *Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 403, no 012190. DOI: 10.1088/1755-1315/403/1/012190
12. Zheng Z., Keqi W. RBF based sliding mode control method for lumber drying system. *Wood and Fiber Science*, 2019, vol. 51, no. 3. DOI: 10.22382/wfs-2019-028
13. Zohrabi S., Aghbashlo M., Seiiedlou S.S., Scaar H., Mellmann J. Energy saving in a convective dryer by using novel real-time exergy-based control schemes adjusting exhaust air recirculation. *Journal of Cleaner Production*, 2020, no. 120394. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.120394.
14. Dmitriev V. M., Gandzha T. V. Princip formirovaniya mnogourovnevnyh komp'yuternykh modelej SCADA-sistem dlya upravleniya slozhnymi tekhnologicheskimi obektami [The principle of forming multi-level computer models of SCADA systems for managing complex technological objects]. *Informatika i sistemy upravleniya = Computer Science and Control Systems*, 2013, no. 2, pp. 24-35. (In Russ.). Available at: [http://ics.khstu.ru/media/2013/N36\\_03.pdf](http://ics.khstu.ru/media/2013/N36_03.pdf)

15. Dmitriev V.M., Gandzha T.V., Gandzha V.V., Panov S.A. Komp'yuternoe modelirovanie vizual'nyh interfejsov virtual'nyh instrumentov i priborov [Computer modeling of visual interfaces of virtual instruments and devices]. *Nauchnaya vizualizatsiya = Scientific Visualization*, 2016, vol. 8, no. 3, pp. 111-131 (In Russ.). Available at: <http://sv-journal.org/2016-3/09/?lang=ru>
16. Botter-Kuisch H. P., Van den Bulcke J., Baetens J. M., Van Acker J. Cracking the code: real-time monitoring of wood drying and the occurrence of cracks. *Wood Science and Technology*, 2020. DOI:10.1007/s00226-020-01200-6
17. James W. L. Electric moisture meters for wood. US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1963, vol. 8. Available at: <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplrn/fplrn008.pdf>
18. Fredriksson M., Thybring E. E., Zelinka S. L. Artifacts in electrical measurements on wood caused by non-uniform moisture distributions. *Holzforschung*, 2020, vol. 1, no. ahead-of-print. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2020-0138>
19. Lynch C. T. CRC Handbook of Materials Science: Material Composites and Refractory Materials. CRC press, 2020, vol. 2. Available at: [https://books.google.ru/books?id=XDwY0WbE\\_EEC&printsec=frontcover&hl=ru#v=onepage&q&f=false](https://books.google.ru/books?id=XDwY0WbE_EEC&printsec=frontcover&hl=ru#v=onepage&q&f=false)
20. Wood moisture meter. ARIS BPM Community. Available at: [https://woodgears.ca/lumber/moisture\\_meter.html](https://woodgears.ca/lumber/moisture_meter.html), (accessed: January 25, 2021).

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Нгуен Ван Вьонг**, аспирант,  
Томский политехнический университет,  
г. Томск, Российская Федерация,  
e-mail: [vuongoicolen@gmail.com](mailto:vuongoicolen@gmail.com),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1953-2747>

**Vinh V. Nguyen**, Post-Graduate Student, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation,  
e-mail: [vuongoicolen@gmail.com](mailto:vuongoicolen@gmail.com),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1953-2747>

**Шилин Александр Анатольевич**, доктор технических наук, Томский политехнический университет,  
г. Томск, Российская Федерация,  
e-mail: [shiiln@tpu.ru](mailto:shiiln@tpu.ru),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4761-7249>

**Aleksandr A. Shilin**, Dr. of Sci. (Engineering), Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation,  
e-mail: [shiiln@tpu.ru](mailto:shiiln@tpu.ru),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4761-7249>

**Момот Павел Михайлович**, студент, Томский политехнический университет,  
г. Томск, Российская Федерация,  
e-mail: [vjvjngfif@yandex.ru](mailto:vjvjngfif@yandex.ru),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2781-718X>

**Pavel M. Momot**, Student, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation,  
e-mail: [vjvjngfif@yandex.ru](mailto:vjvjngfif@yandex.ru),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2781-718X>

## Распознавание символьной информации для автоматизации производственных процессов

В. С. Панищев <sup>1</sup> ✉, М. И. Труфанов <sup>1</sup>, О. Г. Добросердов <sup>2</sup>, О. О. Хомяков <sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГБУН Центр информационных технологий в проектировании Российской академии наук  
ул. Маршала Бирюзова 7а, г. Одинцово 143003, Московская обл., Российская Федерация

<sup>2</sup> Юго-Западный государственный университет  
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: gskunk@yandex.ru

### Резюме

**Цель исследования.** В настоящее время системы оптического распознавания символов имеют высокий уровень зависимости от конкретного вида маркировки, которая подлежит распознаванию, в связи с чем, создание универсального решения является важной и сложной задачей. В работе рассмотрен вопрос создания системы распознавания символьной информации, которая может быть использована на различных этапах производства для автоматизации процессов в системах управления, в частности для анализа маркировки автоматических выключателей.

**Методы.** Методы цифровой обработки изображений, в частности бинаризации, фильтрации и определения границ. Методы распознавания символов, такие как: метод поиска линий, метод поиска базовых линий, алгоритмы разбиения слова, способы улучшения изображения путем сегментации, метод распознавания поврежденных символов, алгоритм увеличения финального качества распознавания.

**Результаты.** Проведен анализ алгоритмов, используемых для предобработки и последующего распознавания изображений, содержащих маркировку автоматических выключателей. Создана математическая модель обработки изображения для последующего распознавания. Описаны методы, используемые для определения символов маркировки. Приведены наглядные примеры работы алгоритмов, на которых построена система. Проведено тестирование полученного решения. Описаны пути развития системы, которые могут повлечь улучшение результатов, для частных случаев использования.

**Заключение.** Предложено решение, выполняющее распознавание символьной информации на маркировке автоматических выключателей, которое может быть основой для разработки и описания систем, служащих для автоматизации производства, путем передачи информации, считываемой с изделия в процессе производства. Данная система на своем примере описывает компоненты систем распознавания символов, и для непосредственного использования необходима доработка в соответствии с техническими требованиями и особенностями условий, в которых она будет применяться.

**Ключевые слова:** распознавание символьной информации; OCR; предобработка изображений; лингвистический анализ; автоматические выключатели, маркировка.

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

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках темы № 0071-2019-0001 «Развитие теории и методов прикладной математики, нейросетевых технологий и систем управления процессами в задачах CAD-систем, анализа визуальных данных, защиты информации и прогнозирования».

**Для цитирования:** Распознавание символьной информации для автоматизации производственных процессов / В. С. Панищев, М. И. Труфанов, О.Г. Добросердов, О. О. Хомяков // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(1): 122-137. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-122-137>.

Поступила в редакцию 17.12.2020

Подписана в печать 29.01.2021

Опубликована 31.03.2021

## Recognition of Character Information for Automation of Production Processes

Vladimir S. Panishchev <sup>1</sup> ✉, Maxim I. Trufanov <sup>1</sup>, Oleg G. Dobroserdov <sup>2</sup>,  
Oleg O. Khomyakov <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Center for Information Technology in Design of the Russian Academy of Sciences,  
7a Marshal Biryuzov str., Odintsovo 143003, Moscow region, Russian Federation

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

✉ e-mail: gskunk@yandex.ru

### Abstract

**Purpose of research.** Nowadays optical character recognition systems have a high level of dependence on the specific type of marking that is to be recognized, and therefore, the creation of a universal solution is an important and difficult task. The paper considers the issue of creating a system for recognizing symbolic information that can be used at various stages of production to automate processes in control systems, in particular, to analyze the labeling of circuit breakers.

**Methods.** Binarization, filtering, and boundary detection are digital image processing techniques. Line search method, baseline search method, word splitting algorithms, image enhancement methods by segmentation, damaged characters recognition method, an algorithm for increasing the final recognition quality are character recognition methods.

**Results.** The analysis of algorithms used for preprocessing and subsequent recognition of images containing marking of circuit breakers is carried out. The mathematical model of image processing for subsequent recognition has been created. We have described methods used to define marking symbols. Illustrative examples of the operation of the algorithms on which the system is built are given. The obtained solution was tested. The ways of system development are described here, they can lead to improved results, for particular use cases.

**Conclusion.** It is proposed a solution that recognizes symbolic information on the labeling of circuit breakers, which can be the basis for the development and description of systems serving for the automation of production, by transferring information read from the product during the production process. This system, by its example, describes the components of character recognition systems, and for direct use, it needs to be refined in accordance with the technical requirements and the specifics of the conditions in which it will be used.

**Keywords:** recognition of symbolic information; OCR; image preprocessing; linguistic analysis; circuit breakers, marking.

**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 topic No. 0071-2019-0001 "Development of the theory and methods of applied mathematics, neural network technologies and process control systems in CAD systems, visual data analysis, information security and forecasting".

**For citation:** Panishchev V. S., Trufanov M. I., Dobroserdov O. G., Khomyakov O. O. Recognition of character information for automation of production processes. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(1): 122-137 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-122-137>.

Received 17.12.2020

Accepted 29.01.2021

Published 31.03.2021

## Введение

На данный момент в области автоматизации производства широко востребованы системы, реализующие считывание маркировки, нанесенной на изделие и понятной человеку. Автоматизация данного процесса позволяет реализовать впоследствии автоматизацию процессов, следующих за определением маркировки. Кроме независимости от человеческого фактора это позволяет избавиться от необходимости наносить промежуточные маркировки или же от необходимости наносить 2 вида маркировок, понятных для человека и понятных для устройств, работающих со специальными видами маркировки, которые необходимы исключительно для машин.

В связи с развитием систем оптического распознавания символов (optical character recognition, OCR), на рынке начали появляться решения подобного рода. Но данные решения имеют высокий уровень зависимости от конкретного вида маркировки, которая подлежит распознаванию. Кроме того, создание универсального решения является крайне нетривиальной задачей, из-за существования большого количества неопределенностей, с исходным изображением и его качеством, возможностями аппаратной части и спецификой её установки на конкретном производстве, различными методами, которые необходимы для предобработки изображения и т.д.

Анализируя рынок распознавания маркировок в данный момент, можно выделить 3 вида систем распознавания.

1. Системы, работающие на основе RFID. В основе метода лежит идентификация на основе радиочастотных меток и устройств считывающих информацию с меток. К преимуществам данных методов относится возможность бесконтактной идентификации и возможность незаметной установки метки. Основным недостатком является высокая зависимость от условий использования, а также необходимость вносить изменения в процесс производства, что зачастую является существенным препятствием при внедрении. К представителям данных систем относятся решения фирм «ЮНИСКАН/ГС1 РУС» и «Систематика».

2. Системы, чья работа основана на использовании штрихового кодирования. Достоинствами систем, использующих данный подход, является высокая точность и низкая стоимость. Недостатками – необходимость обеспечения фиксированного положения объекта, с которого происходит распознавание, а так же необходимость внедрения дополнительного процесса в производства для нанесения подобной маркировки. К представителям данных систем относятся решения фирм «Shark ID», «ПАЛЬМА» и ««ДатаСкан»».

3. Системы, работающие с маркировкой, понятной человеку. Преимуществом данного подхода является отсут-

ствие необходимости внедрения дополнительных процессов нанесения специальной маркировки, что позволяет снизить стоимость внедрения, так же сохраняется точность и низкая стоимость аналогично с решениями, основанными на штриховом кодировании. Недостатками является сложность разработки, при использовании для различных типов маркировок, необходимость дополнительных корректировок системы, для работы со спецификой конкретного производства. Кроме того, присутствующие в данный момент на рынке решения, зачастую требуют использования специализированных технических устройств, гарантирующих правильность распознавания. В данный момент активно ведутся разработки по ликвидации данных недостатков [1-7]. Представителями данных решений являются системы фирм «ВидеоМатрикс» и «Малленом Системс».

В ходе данной работы был проведен анализ существующих решений в сфере обработки изображений, в частности методов предобработки, которые позволят улучшить исходное изображение, для повышения качества последующего распознавания значимой информацией, правильного выделения информации и исправления недостатков аппаратной части. Были рассмотрены существующие способы распознавания изображений. На основе данного исследования было реализовано решение, объединяющее в себе предобработку и

распознавание текста, и реализующее поиск и распознавание значимой информации на маркировке автоматических выключателей. Данная информация впоследствии может быть классифицирована и использована для дальнейшей автоматизации производства, в зависимости от конкретных требований производства и специфики того, какая именно информация наносится на изделие.

Решение, разработанное в ходе данной работы, является универсальным и не учитывает специфику конкретных моделей автоматических выключателей, но является легко расширяемым под конкретные модели, за счет чего может быть достигнуто более высокое качество распознавания, за счет оптимизации некоторых этапов обработки изображения.

### **Материалы и методы**

В ходе данной работы не рассматриваются способы получения изображения, предполагается, что на вход алгоритма подается оцифрованное изображение автоматического выключателя. Исходное изображение  $I$  представляется в виде 3 матриц  $R$ ,  $G$ ,  $B$ , для соответственно цветов RGB изображения: красного, зеленого и синего. Данные матрицы имеют размерности  $x$  и  $y$ , соответствующие ширине и высоте изображения [8, 9]. Значения матриц находятся в диапазоне от 0 до 255, что представляет стандартное 8-битное изображение.

$$I_G(x, y) = \begin{bmatrix} I_{G(0, 0)} & L & I_{G(x, 0)} \\ M & O & M \\ I_{G(0, y-1)} & L & I_{G(x-1, y-1)} \end{bmatrix}$$

Первым этапом обработки является преобразование в оттенки серого.

$$G(x, y) = 0,299 \times I_R(x, y) + 0,587 \times I_G(x, y) + 0,114 \times I_B(x, y).$$

Следующим этапом является размытие по Гауссу. В ходе работы данный фильтр создает свертку, используя  $\sigma$  – стандартное отклонение Гаусса [10,11].

$$\Gamma(x, y) = \sum_{l=-n}^n \sum_{k=-m}^m G(x-l)(y-k) \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{l^2+k^2}{2\sigma^2}},$$

где  $n$  и  $m$  – это разрешение изображения по высоте и по ширине (кол-во пикселей), а  $x$  и  $y$  – это положение обрабатываемого пикселя по высоте и ширине.

После этого происходит бинаризация по методу Отсу [12,13]. В результате бинаризации вычисляются новые значения яркостей точек. Для бинаризации используется порог  $t$ .

$$B[i, j] = \begin{cases} 0, & \text{если } \Gamma[i, j] < t; \\ 1, & \text{если } \Gamma[i, j] \geq t, \end{cases}$$

где

$$t = \arg(\min_{1 \leq k \leq L} \left( \sum_{i=0}^k i - \frac{1}{\sum_{i=0}^k p_i} \cdot \sum_{i=0}^k i \cdot p_i \right) \cdot p_i +$$

$$+ \sum_{i=k+1}^{L-1} \left( i - \frac{1}{1 - \sum_{i=0}^k p_i} \cdot \sum_{i=k+1}^{L-1} i \cdot p_i \right) \cdot p_i),$$

$\{p_i\}_{i=0}^L$  – гистограмма исходного изображения;  $[0, L]$  – диапазон яркостей.

Метод Отсу самостоятельно выбирает порог бинаризации, основываясь на гистограмме изображения (в данном случае используется 8-битное изображение в оттенках серого). Гистограмма строится путем прохода по всем пикселям и сохранения частоты пикселей, имеющих одинаковую интенсивность (в данном случае интенсивность пикселей лежит в диапазоне от 0 до  $L = 255$ ) [14].

$$p_i = \frac{n_i}{N},$$

где  $n_i$  – количество пикселей с интенсивностью  $i$ ;  $N$  – общее количество пикселей на изображении.

После получения гистограммы метод Отсу разделяет изображение на 2 класса и находит идеальной порог  $t$ , который позволяет наиболее четко разделить значимую и незначимую информацию.

Далее необходимо выполнить фильтрацию с целью улучшения качества изображения, решив задачу выбора из множества известных методов обработки [15-17]. Процесс предобработки в данном случае направлен на удаление шумов, отбрасывание излишней незначимой информации, такой как цвет, и подготовку изображения для распознавания путем бинаризации.

Первым этапом после бинаризации изображения является проведение поиска линий. Метод обнаружения линий используется в системе оптического распознавания символов, когда есть вероятность, что текст, расположенный на изображении, находится под углом, или

строки имеют сложную структуру. Данный метод призван устранить поворот изображения или разбить сложную структуру на составляющие для улучшения качества работы дальнейших систем распознавания [18,19]. Основной целью данного этапа является подготовка к дальнейшему применению одного из методов выделения и распознавания текста [20-23].

В предлагаемом решении в первую очередь метод применяет фильтр высот, это позволяет избежать помех при распознавании текста, где есть большие заглавные буквы, располагающиеся на нескольких строках [24].

В основе работы положен метод границы высот, которая рассчитывается исходя из размера текста в регионах. Впоследствии контуры, находящиеся за границами, будут с высокой вероятностью считаться или шумами, или знаками пунктуации, или незначащей информацией.

Границы измеряются в пикселях и определяются по следующим формулам.  $H_{min}$  – минимальная высота контура, рассчитывается из минимальной высоты печатного символа в 6 пикселей и границы распознавания текста человеком, рассчитанной как не более 0,6 мм, исходя из количества пикселей на дюйм DPI.  $H_{max}$  – максимальная высота контура, рассчитывается исходя из условия, что на изображении высотой  $imgH$ , контуры размером более 20%, и контуры, превосходящие среднюю высоту контуров  $AvrH$  более чем в 2,5 раза

не могут содержать значимой информации (зачастую это логотипы и дополнительные изображения, нанесенные на маркировку).

$$MinH = \max\left(6, \frac{0,6DPI}{25.4}\right).$$

$$MaxH = \min\left(\frac{imgH}{5}, 2,5AvrH\right).$$

Контуры, отфильтрованные с помощью этих границ, представляют собой параллельные линии, не имеющие перекрытий. Далее происходит обработка данных контуров по горизонтали.

Каждый контур при обработке по горизонтали присваивается к индивидуальной строке, при этом отслеживается наклон строки по вертикали, что позволяет работать с наклоном страницы и делает возможным корректную работу со строками, имеющими перенос. Впоследствии контуры используются для выбора базовых линий. Работа данного метода заключается в отсеивании контуров, содержащих недостаточное количество значащей информации по порогу  $MinD$ , где  $AvrD$  – среднее количество значащей информации, измеряемой как кол-во пикселей в контуре. Контуры, содержащие менее 10%  $AvrD$ , в данной строке отбрасываются.

$$MinD = 0,1AvrD.$$

Наклон строки  $LineA$  определяется как угол наклона по следующей формуле, где  $x$ ,  $y$  – координаты нижнего среднего пикселя контура, а  $n$  – кол-во контуров в строке.

$$\text{Line}A = \arctan \left( \frac{\sum_{i=0}^n xy - \left( \sum_{i=0}^n x \sum_{i=0}^n y \right)}{\sum_{i=0}^n x^2 - \left( \sum_{i=0}^n x \right)^2} \right).$$

Последним этапом работы данного алгоритма является соединение контуров, перекрывающих друг друга. Это нужно, чтобы символы, разбитые в ходе оцифровки или предварительной обработки, смогли быть корректно распознаны [25].

После обработки, описанной выше, для поиска базовых линий используются контуры, созданные алгоритмом поиска линий, проводится их анализ с помощью квадратичного сплайна. Данные действия необходимы для того, чтобы впоследствии распознающие символы алгоритмы смогли правильно обработать строки, имеющие наклон, что крайне вероятно при получении изображений методом фотографии (рис. 1).



**Рис. 1.** Наглядный результат работы алгоритма поиска базовых линий

**Fig. 1.** Visual result of the baseline search algorithm

Для поиска слов в первую очередь происходит разбиение по пробелам, но поиск пробелов в тексте может быть затруднен за счет нефиксированного шага (что часто встречается на маркировке), кроме того, возникают сложности при работе с некоторыми видами начертаний. Для решения подобных проблем измеряются пробелы в некотором вертикальном расстоянии, которое находится между базовой линией и центральной линией строки. Пробелы, которые не могут быть однозначно распознаны и находятся слишком близко к порогу разделения, становятся нечеткими, итоговое принятие решение откладывается до этапа распознавания слов.

При оптическом распознавании символов, разбиение слова на символы является стандартной операцией, которая позволяет упростить последующее распознавание символа. При обнаружении слова в первую очередь анализируется наличие фиксированного шага между символами, который позволит разделить их однозначным способом. После определения фиксированного шага между символами выполняется повторный проход по слову, разделяя его в соответствии с этим шагом. Пример работы данного алгоритма можно пронаблюдать на рис. 2.



**Рис.2.** Пример работы алгоритма разбиения слова на символы с использованием фиксированного шага

**Fig. 2.** Example of the operation of the algorithm for splitting a word into characters using a fixed step

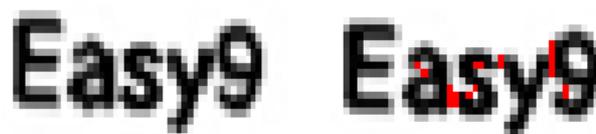
В основе любого метода обработки символьной информации на изображении лежит задача определения границ символа. Определение символа может быть выполнено сразу после нахождения слов с фиксированным шагом. Для слов, фиксированный шаг которых найти не удалось, применяются остальные, представленные ниже алгоритмы, позволяющие определить и классифицировать символы, которые не смогли быть полноценно распознаны на этапе разбиения слова по фиксированному шагу.

Первым этапом улучшения изображения после того, как не удалось справиться с задачей распознавания по фиксированному шагу, является задача разделения соединенных символов. На основе данных, полученных от классификатора символов, происходит удаление контуров и элементов символа, которые не подходят символу.

Для разделения символов необходимо найти координаты точек разбиения. Эти точки могут располагаться как на вогнутых вершинах контуров, так и на контурах линий. При разделении символов по данному методу используются три пары подобных точек [26]. Пример поиска точек, по которым будет происходить сегментация, представлен на рис. 3.

Далее, после поиска точек, происходит разделение. Результат разделения, который классификатор символа не определяет как улучшающий результат распознавания, сохраняется в памяти и используется только после попыток

альтернативного разделения, в случае если классификатор определяет, что это сможет улучшить результат. Таким образом, за счет классификатора возникает несколько альтернативных веток разделения символов, которые помогают определить оптимальный способ улучшения изображения, максимально повышающий качество распознавания.



**Рис. 3.** Пример поиска точек, по которым будет происходить сегментация

**Fig. 3.** Example of searching for points by which segmentation will occur

Следующим этапом обработки, после того, как все символы разделены, но все ещё не могут быть распознаны, является применение метода распознавания поврежденных символов. Этот метод работает через ассоциатор, который выполняет «А\*» поиск символов, имеющих повреждения или разделенные границы.

После прохода данного алгоритма для каждого символа строится маршрут для каждого эталонного символа классификатора, таким образом находится наиболее похожий на переданный данному алгоритму символ. Таким образом классификации подвергаются как нераспознанные символы, так и их фрагменты, и наборы фрагментов.

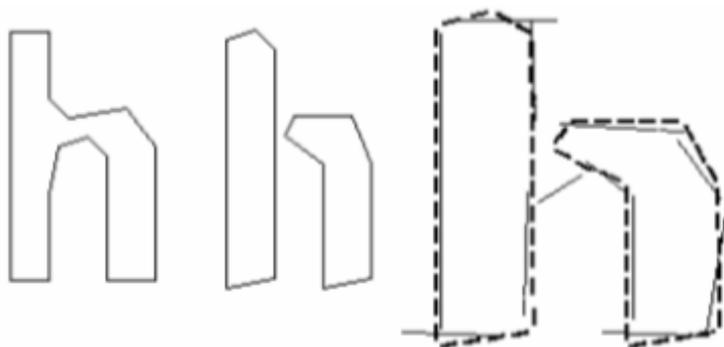
Данный подход имеет недостатки, например, из-за объединения фрагментов

символов в наборы, могут быть потеряны значимые разделения символов, что скажется на последующей обработке.

В основе поиска символов используется модуль, который определяет принадлежность получаемого на обработку символа к одному из эталонных путем поиска эталонных признаков. Данные признаки не зависят от шрифта и размера

текста. Поэтому подходят для распознавания текста со сложной структурой.

На рис. 4 представлено изображение с идеальным символом (с которого извлекаются значимые признаки) и поврежденным символом, а также представлено наглядное изображение общих признаков у эталона и у поврежденного символа [27].



**Рис. 4.** Эталонный символ, поврежденный символ, их общие признаки

**Fig. 4.** Reference symbol, damaged symbol, their common features

Как видно из рис. 4, даже при наличии повреждения символа выбранные меньшие по размеру ключевые признаки позволяют, при их сравнении с большими эталонными признаками, выявить совпадение символа. Для того чтобы выявить эталонные признаки производится процедура обучения системы, направленная на то, чтобы выявить наибольшее возможное значение ключевых признаков для каждого конкретного символа. Создание подобной выборки во многом зависит от особенностей распознаваемых изображений (несмотря на то, что алгоритм не зависит от шрифта, при обучении на конкретном шрифте он показывает более высокие результаты распознавания).

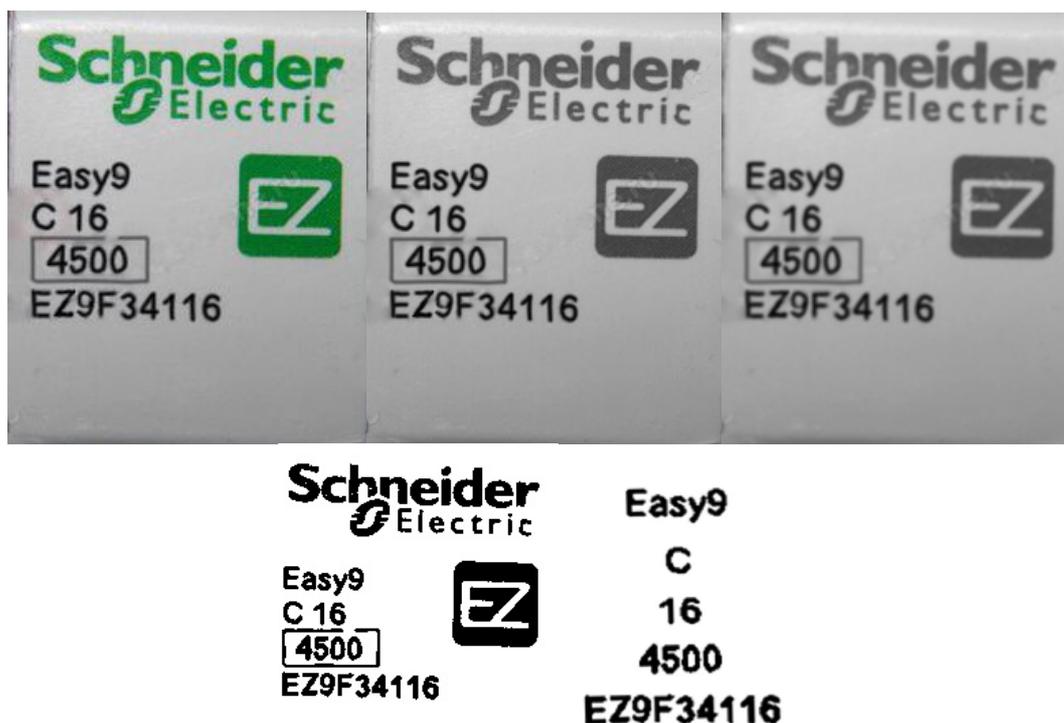
Достаточной формой обучения считается, когда для каждого символа существует 50-100 эталонных признаков и по 10-20 вариаций деформации каждого признака, не влияющих на результат распознавания.

Недостатком метода является требовательность к ресурсам машины, выполняющей вычисления, так как для сравнения и выявления признаков для каждого символа при большом объеме текста требуется много времени. Но данный недостаток не значителен в системах автоматического распознавания символов маркировки, поскольку на каждой маркировке содержится крайне мало текста для таких систем, а преимущества в качестве распознавания имеют решающее значение.

Процесс обработки данных наглядно представлен на рис. 5.

Дальнейшим этапом распознавания является лингвистический анализ. Под лингвистическим анализом в системах оптического распознавания символьной информации понимается процесс, в хо-

де которого происходит анализ текстового содержимого страницы. Для этого подобные системы используют различные методы. Самым простым методом из данной категории является метод сравнения со словарем.



**Рис. 5.** Наглядное представление процесса предобработки и выделения значимой информации

**Fig. 5.** Visual representation of the preprocessing process and the selection of meaningful information

На маркировке автоматических выключателей основной информацией, распознавание которой происходит в реализованной в ходе данной работы, являются:

- линейная серия автоматов;
- время-токовая характеристика;
- номинальный ток;
- предельный ток отключения;
- код продукта (индивидуальный для производителя).

Данный список характеристик может меняться в зависимости от произ-

водителя изделия, за счет чего алгоритмы лингвистического анализа должны видоизменяться и проходить доработку.

В случае с нетривиальной маркировкой, которую невозможно полноценно разбить на этапе лингвистического анализа, могут применяться алгоритмы поиска и сегментации изображений ещё до этапа распознавания.

### Результаты и их обсуждение

В ходе создания программного продукта качество его реализации оценива-

лось на выборке изображений маркировки автоматических выключателей различных производителей. В выборку входили изображения как с отличающейся маркировкой, так и с одинаковой, но подобные изображения имели разный угол поворота, наклон и степень зашумленности. Качество распознавания оценивалось по нескольким критериям.

Количество верно распознанных значимых символов определяется как процент верно распознанных символов, отвечающих за основную информацию, которую несет в себе маркировка.

Количество верно разбитых частей маркировки это процент верно разбитых на слова частей маркировки, этот параметр имеет значения, когда серия, ток или код продукта, являющийся одним целым, был разбит на несколько частей. Чем выше данный показатель, тем меньше ошибок при разбиении было в ходе работы алгоритма.

Количество распознанных символов, не являющихся значимыми для маркировки, определяется процентом символов, не являющихся значимыми относительно значимых символов. Данный параметр при его высоком значении усложняет алгоритм лингвистического анализа, так как в случае наличия большого количества незначимых символов они могут быть восприняты как значимая часть маркировки, но не является критическим.

Количество незначащих слов это параметр, обозначающий процент незначащих для маркировки слов относительно значащих слов. Данный параметр при его высоком значении так же усложняет алгоритм лингвистического анализа, но зачастую не влияет на итоговое качество.

Итоговые данные по выборке представлены в табл.1.

**Таблица 1.** Статистические данные по выборке

**Table 1.** Sample statistics

Параметр оценки / Evaluation parameter	Среднее значение / Average value	Диапазон отклонений / Deviation range
Количество верно распознанных значимых символов	92.03 %	70.5 – 100%
Количество верно разбитых частей маркировки	93.06 %	66.66 – 100%
Количество распознанных символов, не являющихся значимыми для маркировки	22.44 %	0 – 50 %
Количество незначащих слов	24.49 %	0 – 50%

Большой разброс отклонений при высоком среднем значении обусловлен наличием в выборке сильно зашумленных и искаженных изображений. Такие изображения показывают, что данный алгоритм хоть и не является требовательным к аппаратной части, но не решает полностью проблем недостаточно-

го освещения или установки аппаратуры, получающей изображения под углом. Данные проблемы являются частными случаями обработки изображений и не рассматриваются в данном решении.

Так же решение сравнивали с аналогами [1, 2], по показателю точности mAP. Данные представлены в табл.2.

**Таблица 2.** Сравнение с аналогами

**Table 2.** Comparison with analogues

Аналог 1 / Analog 1	Аналог 2 / Analog 2	Разработанное решение / Developed solution
0,86	0,92	0,97

## Выводы

В ходе работы был произведен анализ решений в области распознавания символьной информации, произведен подбор методов и реализована система оптического распознавания символьной информации на маркировке автоматических выключателей. Большая часть внимания уделена именно алгоритмам предобработки и распознавания текста, за счет чего данное решение является универсальным и при необходимости может быть доработано с учетом конкретной специфики изделий, маркировка с которых распознается.

На основании данных выборки можно говорить о том, что решение, разработанное в ходе данной работы, позволяет распознавать большую часть значимой информации. Благодаря высокому уровню распознавания значимой информации данное решение может использоваться в сфере распознавания символьной информации на маркировке автоматических выключателей. Так же это решение может быть улучшено и универсализировано путем развития алгоритмов лингвистического анализа, для увеличения количества моделей автоматических выключателей, для которых данное решение пригодно.

## Список литературы

1. An efficient industrial system for vehicle tyre (tire) detection and text recognition using deep learning / W. Kazmi, I. Nabney, G. Vogiatzis, P. Rose, A. Codd // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2020.

2. Implementation of an intelligent decision support system to accompany the manufacturing process / В.А. Головкин, А.А. Крошечко, М.В. Ковалев, В.В. Таберко, Д.С. Иванов // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. 2020. С. 175-182.
3. Панищев В.С., Хомяков О.О. Распознавание символьной информации на маркировке автоматических выключателей // Труды международной научно-технической конференции «Информационные технологии и математическое моделирование систем». М., 2019. С. 106-109.
4. Марков В.В. Решение задачи распознавания символов на изображениях товарных ценников // Евразийский союз ученых. 2020. С. 63-65.
5. Hayashi N., Koyanaka S., Oki T. Constructing an automatic object-recognition algorithm using labeling information for efficient recycling of WEEE // Waste Management, 2019. С. 337-346.
6. Копылов И.В., Казаков А.В., Малыгин Л.Л. Идентификация маркировок рулонов металлопроката // Вестник Череповецкого государственного университета. 2016. С. 12-15.
7. Metal stamping character recognition algorithm based on multi-directional illumination image fusion enhancement technology / Z. Xiang, Z. You, M. Qian, J. Zhang, X. Hu // EURASIP Journal on Image and Video Processing. 2018. С 1-11.
8. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. М.: БИНОМ, 2013. 752 с.
9. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.
10. Обработка цифровых аэрокосмических изображений для геоинформационных систем / С.Г. Емельянов, С.Ю. Мирошниченко, В.С. Панищев, В.С. Титов, М.И. Труфанов. Старый Оскол: ТНТ, 2011. 175 с.
11. Mark S. Nixon and Alberto S. Aguado. Feature Extraction and Image Processing. Academic Press. 2008. 350 p.
12. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE Trans. Sys., Man., Cyber journal. 1979. Vol. 9. P. 62–66.
13. Ping-Sung Liao, Tse-Sheng Chen, Pau-Choo Chung. A Fast Algorithm for Multi-level Thresholding // J. Inf. Sci. Eng. 2001. Т. 17. С. 713–727.
14. Прэйтт У. Цифровая обработка изображений: 2-х кн./ пер. с англ. под ред. Д.С. Лебедева. М.: Мир, 1982. 2 кн., 790 с.
15. Panishchev V.S., Titov V.S Application of neural networks for the contour extraction in images // Pattern Recognition and Image Analysis (Advances in Mathematical Theory and Applications). 2005. Т. 15. № 2. P. 277-278.
16. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2007. 752 с.
17. Яне Б. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2007. 584 с.
18. Сойфер В.А. Методы компьютерной обработки изображений / под ред. В.А. Сойфера. 2-е изд., испр. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 784 с.

19. Введение в контурный анализ и его приложение к обработке изображений и сигналов / под ред. Я.А. Фурмана. М.: Физматлит, 2002. 592 с.
20. Zhong Y., Karu K., Jain A. K. Locating text in complex color images // *Pattern Recognition*. 1995. Vol. 28, is. 10, P. 1523-1535.
21. Kimmel R., Klette R., Sugimoto A. (Eds.): ACCV 2010, Part III, LNCS 6494. P. 770–783, 2011.
22. Chen X., Yuille A. Detecting and Reading Text in Natural Scenes, *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2004. pp. 366-373
23. Lienhart R., Wernicke A. Localizing and Segmenting Text in Images and Videos", *IEEE transactions on circuits and systems for video technology*. April 2002. Vol. 12. № 4. P. 256-268,.
24. Исследование методов сегментации изображений текстовых блоков документов с помощью алгоритмов структурного анализа и машинного обучения / Т.С. Чернов, Д.А. Ильин, П.В. Безматерных, И.А. Фараджев, С.М. Карпенко // *Вестник российского фонда фундаментальных исследований*. 2013. С. 55-71.
25. Debled-Rennesson I., Tabbone S., Wendling L. Fast polygonal approximation of digital curves // *Proceedings of the 17th International Conference*. 2004.
26. Marosi I., *Industrial OCR approaches: architecture, algorithms and adaptation techniques* // *Document Recognition and Retrieval XIV*. SPIE, 2007.
27. Smith R.W. *An Overview of the Tesseract OCR Engine* IEEE, 2007. 640 с.

## References

1. Kazmi W., Nabney I., Vogiatzis G., Rose P., Codd A. An efficient industrial system for vehicle tyre (tire) detection and text recognition using deep learning. *IEEE (Transactions on Intelligent Transportation Systems)*, 2020.
2. Golovko V. A. Kroshchanka A. A. Kovalev M. V. Taberko V. V. Ivaniuk D. S. Implementation of an intelligent decision support system to accompany the manufacturing process. *Otkrytye semanticheskie tekhnologii proektirovaniya intellektual'nyh sistem*, 2020, pp. 175-182.
3. Panishchev V.S., Khomyakov O.O. [Recognition of symbolic information on the marking of circuit breakers]. *Trudy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Informatsionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie sistem"* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Information Technologies and Mathematical Modeling of Systems"]. Moscow, 2019, pp. 106-109 (In Russ.).
4. Markov V. V. Reshenie zadachi raspoznavaniya simvolov na izobrazheniyakh tovarnykh tsennikov [Solving the problem of character recognition in images of product price tags]. *Evrazijskij soyuz uchenykh = Eurasian Union of Scientists*, 2020, pp. 63-65 (In Russ.).
5. Hayashi N., Koyanaka S., Oki T. Constructing an automatic object-recognition algorithm using labeling information for efficient recycling of WEEE. *Waste Management*, 2019, pp. 337-346.

6. Kopylov I. V., Kazakov A. V., Malygin L. L. Identifikatsiya markirovok rulonov metalloprokata [Identification of rolled metal roll markings]. *Vestnik cherepoveckogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Cherepovets State University*, 2016, pp. 12-15 (In Russ.).
7. Xiang Z., You Z., Qian M., Zhang J., Hu X. Metal stamping character recognition algorithm based on multi-directional illumination image fusion enhancement technology. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2018, pp. 1-11.
8. Shapiro L., Stokman Dzh. *Komp'yuternoe zrenie [Computer vision]*. Moscow, BINOM Publ., 2013. 752 p. (In Russ.).
9. Gonsales R., Vuds R. *Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii [Digital image processing]*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2012. 1104 p. (In Russ.).
10. Yemel'yanov S.G., Miroshnichenko S.YU., Panishchev V.S., Titov V.S., Trufanov M.I. *Obrabotka tsifrovyykh aerokosmicheskikh izobrazhenii dlya geoinformatsionnykh sistem [Processing of digital aerospace images for geographic information systems]*. Staryy Oskol, TNT Publ., 2011. 175 p. (In Russ.).
11. Mark S. Nixon, Alberto S. Aguado. *Feature Extraction and Image Processing*. Academic Press Publ., 2008. 350 p.
12. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Trans. Sys., Man., Cyber journal*, 1979, vol. 9, pp. 62–66.
13. Ping-Sung Liao and Tse-Sheng Chen and Pau-Choo Chung. A Fast Algorithm for Multilevel Thresholding. *J. Inf. Sci. Eng.*, 2001, vol. 17, pp. 713–727.
14. Prett W. *Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii [Digital image processing]*. Moscow, Mir Publ., 1982, vol. 2, 790 p. (In Russ.)
15. Panishchev V.S., Titov V.S. Application of neural networks for the contour extraction in images. *Pattern Recognition and Image Analysis (Advances in Mathematical Theory and Applications)*, 2005, vol. 15, no. 2, pp. 277-278.
16. Sergiyenko A.B. *Tsifrovaya obrabotka signalov [Digital signal processing]*. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2007. 752 p. (In Russ.)
17. Yane B. *Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii [Digital image processing]*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2007. 584 p. (In Russ.)
18. Soyfer V.A. *Metody komp'yuternoy obrabotki izobrazheniy [Methods of Computer Image Processing]*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 784 p. (In Russ.).
19. *Vvedeniye v konturnyy analiz i yego prilozheniye k obrabotke izobrazheniy i signalov [Introduction to contour analysis and its application to image and signal processing]*; ed. by YA.A. Furman. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002. 592 p. (In Russ.)
20. Zhong Y., Karu K., Jain A. K. Locating text in complex color images. *Pattern Recognition*, 1995, vol. 28, is. 10, pp. 1523-1535.
21. Kimmel R., Klette R., Sugimoto A. (Eds.): ACCV 2010, Part III, LNCS 6494, pp. 770–783.
22. Chen X., Yuille A. Detecting and Reading Text in Natural Scenes, *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2004, pp. 366-373.

23. Lienhart R., Wernicke A. Localizing and Segmenting Text in Images and Videos". *IEEE transactions on circuits and systems for video technology*, APRIL 2002, vol. 12, no. 4, pp. 256-268.

24. Chernov T.S., Il'in D.A., Bezmaternykh P.V, Faradzhev I.A, Karpenko S.M. Issledovanie metodov segmentatsii izobrazhenii tekstovykh blokov dokumentov s pomoshch'yu algoritmov strukturnogo analiza i mashinnogo obucheniya. [Research of segmentation methods for images of text blocks of documents using structural analysis and machine learning algorithms]. *Vestnik rossiiskogo fonda fundamental'nykh issledovaniy*. Moscow, 2013, pp. 55-71 (In Russ.).

25. Debled-Renesson I., Tabbone S., Wendling L. Fast polygonal approximation of digital curves. *Proceedings of the 17th International Conference*, 2004.

26. Marosi I., Industrial OCR approaches: architecture, algorithms and adaptation techniques. *Document Recognition and Retrieval XIV*. SPIE, 2007.

27. Smith R.W. An Overview of the Tesseract OCR Engine IEEE, 2007, 640 p.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Панищев Владимир Славиевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН Центр информационных технологий в проектировании РАН, г. Одинцово, Московская область, Российская Федерация, e-mail: gskunk@yandex.ru

**Vladimir S. Panishchev**, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher, Center for Information Technology in Design of the Russian Academy of Sciences, Odintsovo, Moscow region, Russian Federation, e-mail: gskunk@yandex.ru

**Труфанов Максим Игоревич**, кандидат технических наук, зав. лабораторией, ФГБУН Центр информационных технологий в проектировании РАН, г. Одинцово, Московская область, Российская Федерация, e-mail: info@ditc.ras.ru

**Maxim I. Trufanov**, Cand. of Sci. (Engineering), head laboratory of Center for Information Technology in Design of the Russian Academy of Sciences, Odintsovo, Moscow region, Russian Federation, e-mail: info@ditc.ras.ru

**Добросердов Олег Гурьевич**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, советник при ректорате, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: serfing@yandex.ru

**Oleg G. Dobroserdov**, Dr. of Sci. (Engineering), Senior Research Associate, Adviser to the Rector, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: serfing@yandex.ru

**Хомяков Олег Олегович**, магистрант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: homyakov46rus@yandex.ru

**Oleg O. Khomyakov**, Master Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: homyakov46rus@yandex.ru

## Синтез и параметризация моделей газочувствительных датчиков

О.Г. Бондарь<sup>1</sup>, Е.О. Брежнева<sup>1</sup>✉, О.Г. Добросердов<sup>1</sup>,  
К.Г. Андреев<sup>1</sup>, Н.В. Поляков<sup>1</sup>

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

✉ e-mail: bregnevaeo@mail.ru

### Резюме

**Цель работы:** поиск и анализ существующих моделей газочувствительных датчиков. Разработка математических моделей газочувствительных датчиков различных типов (полупроводниковых, термокаталитических, оптических, электрохимических) для последующего их использования в процессе обучения искусственных нейронных сетей (ИНС). Исследование основных физико-химических закономерностей, лежащих в основе принципов работы датчиков, учет влияния факторов окружающей среды и перекрестной чувствительности на выходной сигнал датчиков. Сопоставление результатов моделирования с реальными характеристиками выпускаемых промышленностью датчиков. Рассматривается концепция создания математических моделей, проводится их параметризация, исследование и оценка адекватности.

**Методы.** При создании математических моделей использовались численные методы, методы компьютерного моделирования, теория электрических цепей, теория хемосорбции и гетерогенного катализа, уравнения Фрейндлиха и Ленгмюра, закон Бугера-Ламберта-Бера, основы электрохимии. Для оценки адекватности моделей рассчитывалось среднеквадратическое отклонение (СКО) и относительная погрешность.

**Результаты.** Описана концепция создания математических моделей датчиков на основе физико-химических закономерностей, позволяющих автоматизировать процесс генерации данных для обучения искусственных нейронных сетей, применяемых в многокомпонентных газоанализаторах с целью совместной обработки информации. Получены и модернизированы модели полупроводникового, термокаталитического, оптического и электрохимических датчиков, учитывающие влияние дополнительных факторов на сигнал датчиков. Проведена параметризация и оценка адекватности и экстраполяционных свойств моделей по графическим зависимостям, представленным в технической документации датчиков. Определены погрешности (относительная и среднеквадратическая) расхождения реальных данных и результатов моделирования газочувствительных датчиков по основным параметрам. Среднеквадратическая погрешность воспроизведения основных характеристик датчиков не превысила 0,5%.

**Заключение.** Синтезированы многопараметрические математические модели газочувствительных датчиков, учитывающие влияние основного газа и внешних факторов (давление, температуру, влажность, перекрестную чувствительность) на выходной сигнал и позволяющие генерировать обучающие данные для датчиков различных типов.

**Ключевые слова:** газочувствительные датчики; влажность; давление; температура; факторы; математические модели; газочувствительные датчики; концентрация газа; погрешности измерения.

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

**Для цитирования:** Синтез и параметризация моделей газочувствительных датчиков / О.Г. Бондарь, Е.О. Брежнева, О. Г. Добросердов, К.Г. Андреев, Н.В. Поляков // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(1): 138-161. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-138-161>.

Поступила в редакцию 22.12.2020

Подписана в печать 14.01.2021

Опубликована 31.03.2021

## Synthesis and Parameterization of Gas Sensor Models

Oleg G. Bondar<sup>1</sup>, Ekaterina O. Brezhneva<sup>1</sup> ✉, Oleg G. Dobroserdov<sup>1</sup>,  
Kirill G. Andreev<sup>1</sup>, Nikolay V. Polyakov<sup>1</sup>

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

✉ e-mail: bregnevaeo@mail.ru

### Abstract

**Purpose of research:** search and analysis of existing models of gas-sensitive sensors. Development of mathematical models of gas-sensitive sensors of various types (semiconductor, thermocatalytic, optical, electrochemical) for their subsequent use in the training of artificial neural networks (INS). Investigation of main physicochemical patterns underlying the principles of sensor operation, consideration of the influence of environmental factors and cross-sensitivity on the sensor output signal. Comparison of simulation results with actual characteristics produced by the sensor industry. The concept of creating mathematical models is described. Their parameterization, research and assessment of adequacy are carried out.

**Methods.** Numerical methods, computer modeling methods, electrical circuit theory, the theory of chemisorption and heterogeneous catalysis, the Freundlich and Langmuir equations, the Buger-Lambert-Beer law, the foundations of electrochemistry were used in creating mathematical models. Standard deviation (MSE) and relative error were calculated to assess the adequacy of the models.

**Results.** The concept of creating mathematical models of sensors based on physicochemical patterns is described. This concept allows the process of data generation for training artificial neural networks used in multi-component gas analyzers for the purpose of joint information processing to be automated. Models of semiconductor, thermocatalytic, optical and electrochemical sensors were obtained and upgraded, considering the influence of additional factors on the sensor signal. Parameterization and assessment of adequacy and extrapolation properties of models by graphical dependencies presented in technical documentation of sensors were carried out. Errors (relative and RMS) of discrepancy of real data and results of simulation of gas-sensitive sensors by basic parameters are determined. The standard error of reproduction of the main characteristics of the sensors did not exceed 0.5%.

**Conclusion.** Multivariable mathematical models of gas-sensitive sensors are synthesized, considering the influence of main gas and external factors (pressure, temperature, humidity, cross-sensitivity) on the output signal and allowing to generate training data for sensors of various types.

**Keywords:** gas-sensitive sensors; humidity; pressure; temperature; factors; mathematical models; gas-sensitive sensors; gas concentration; measurement errors.

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

**For citation:** Bondar O. G., Brezhneva E. O., Dobroserdov O. G., Andreev K. G., Polyakov N. V. Synthesis and Parameterization of Gas Sensor Models. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(1): 138-161 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-138-161>.

Received 22.12.2020

Accepted 14.01.2021

Published 31.03.2021

## Введение

Проектирование газоанализаторов, реализация методов обработки информации в них, оптимизация параметров требует проведения большого числа экспериментальных работ по получению и исследованию характеристик датчиков, входящих в их состав. Реализация методов обработки информации на основе ИНС требует решения вопроса генерации обучающих данных, содержащих значения входных параметров и соответствующих им выходных сигналов датчиков [1, 2, 3]. Данной проблематике посвящены работы профессора А.В. Шапошника, профессора А. В. Калача, профессора И. А. Борисова, профессора В. В. Сысоев, профессора Н. В. Замятина, И.А. Брокарева, Д.М. Шпрехера [4, 5, 6, 7]. Нейронные сети используются в основном только для подавления перекрестной чувствительности, а обучение проводится на данных, полученных экспериментальным путем, что значительно повышает стоимость и трудоемкость работ.

Значительно снизить трудоемкость и стоимость экспериментальных работ можно, используя математические модели газочувствительных датчиков. Промышленностью выпускаются следующие типы газочувствительных датчиков: термokatалитические, полупроводниковые, оптические и электрохимические. Автоматизация процесса производства газоанализаторов на основе ИНС требует наличия базы данных, со-

держающей типовые математические модели основных выпускаемых промышленностью газочувствительных датчиков.

Существующие модели газочувствительных датчиков в основном представлены линейными или нелинейными функциями преобразования и не учитывают перекрестной чувствительности датчиков к мешающим газам, а так же влияния колебаний параметров окружающей среды. Для полупроводниковых и термokatалитических датчиков наиболее часто используют классические модели Фрейндлиха, Ленгмюра и Бугера-Ламберта-Бера, позволяющие описать зависимость выходного сигнала датчика от концентрации основного газа [8]. Аналитический обзор существующих моделей газоочистительных датчиков показал, что работы в данном направлении ведутся в основном с целью оптимизации конструктивных особенностей датчиков и их режимов работы. Данной проблематике посвящены труды Бельшева Т.В., Гусельникова М.Э., Анисимова О.В., Малышева В.В., Кашина В.Е., Подтелкина О.А., Волчка В.С. [9, 10, 11, 12, 13]. Учитывая вышесказанное, было принято решение о модернизации классических моделей датчиков, с целью учета влияния дополнительных факторов, таких, как давление, влажность, температура и перекрестная чувствительность.

Разработанные математические модели должны учитывать влияние основных факторов на сигнал датчиков, быть

апробированы на конкретных газочувствительных датчиках, обладать экстраполяционными свойствами.

### Материалы и методы

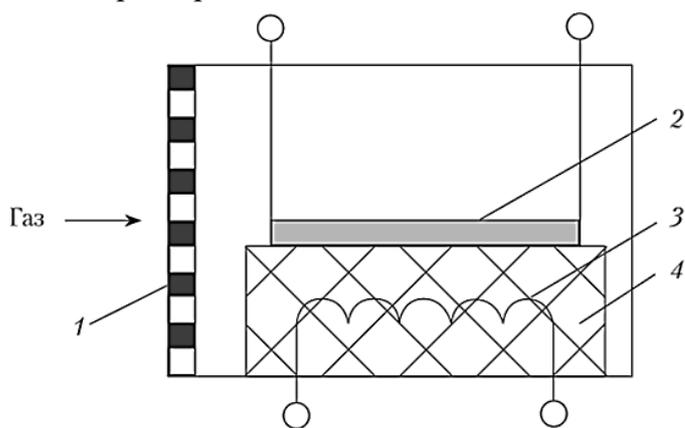
Математические модели, входящие в состав разрабатываемой базы, должны обладать следующими свойствами:

- быть унифицированными, т.е. обеспечивать возможность параметризации с приемлемой точностью по данным датчиков одного типа для различных производителей;
- учитывать влияние основных факторов на сигнал датчика;
- обладать экстраполяционными свойствами.

Для обеспечения соответствия моделей предъявляемым требованиям необходимо при их разработке учитывать физико-химические закономерности, лежащие в основе принципа работы датчиков. Коэффициенты моделей должны находиться параметризацией по соответствующим характеристикам

датчиков, так как применение физических и химических констант не позволит автоматизировать процесс, в связи с зависимостью их значений от конструктивных и технологических особенностей датчиков не только для различных производителей, но и в одной партии. Рассмотрим основные концепции построения моделей по каждому из типов газочувствительных датчиков.

Для детектирования токсичных газов (монооксида углерода, аммиака, сероводорода) и некоторых горючих газов (водорода, метана) широко используются полупроводниковые датчики. На рис. 1 представлена конструкция типовых полупроводниковых датчиков. Выходным сигналом полупроводниковых датчиков является сопротивление, обратно пропорциональное проводимости, величина которой зависит от соотношения долей поверхности, занимаемых газами-акцепторами и газами-донорами электронов [11-17].



**Рис.1.** Полупроводниковый датчик газоанализатора: 1 – полимерная мембрана; 2 – полупроводник; 3 – нагревательная спираль; 4 – керамический корпус

**Fig. 1.** Gas analyzer semiconductor sensor: 1 – polymer membrane; 2 – semiconductor; 3 – heating coil; 4 –ceramic housing

В основе концептуальной модели полупроводникового датчика была взята теория хемосорбции на поверхности полупроводника.

Процесс адсорбции на поверхности полупроводника протекает согласно уравнению Фрейндлиха [8]:

$$\theta = K \cdot C^n,$$

где  $K$  и  $n$  – коэффициенты, зависящие от природы адсорбируемого газа;

$C$  – концентрация газа в воздухе.

При разработке модели опирались на следующие положения и допущения [14-26]:

– адсорбция молекул воды на поверхности полупроводника осуществляется на адсорбционные центры, занятые атомами кислорода, и сопровождается увеличением проводимости за счет высвобождения захваченных кислородом электронов:

$$G = K_1 N_a - K_2 \theta_{O_2} N_a + K_3 \theta_{H_2O} \theta_{O_2} N_a,$$

где  $N_a$  – общее число адсорбционных мест на поверхности полупроводника;

$K_i$  – коэффициент пропорциональности, устанавливающий связь между числом электронов и проводимостью;

$\theta_{O_2}$  – степень заполнения поверхности полупроводника атомами кислорода, которая представляет собой соотношение числа адсорбированных молекул газа к общему числу адсорбционных мест;

$\theta_{H_2O}$  – доля поверхности, занятая гидроксильными группами в результате адсорбции водяных паров;

– в результате совместной адсорбции кислорода и водяных паров поверхность полупроводника покрывается кислородно-гидроксильным слоем, а адсорбция газов восстановителей протекает на адсорбционные центры, занятые как гидроксильными группами  $N_{H_2O}$ , так и атомами кислорода, оставшимися после адсорбции водяных паров ( $N_{O_2} - N_{H_2O}$ ). Обе реакции приводят к увеличению проводимости полупроводника за счет увеличения числа свободных электронов:

$$G = K_1 T_a - K_2 \theta_{O_2} N_a + K_3 \theta_{H_2O} \theta_{O_2} N_a + K_4 \theta_{OG} (\theta_{O_2} - \theta_{H_2O} \theta_{O_2}) N_a + \dots + K_5 (1 - \theta_{OG}) \theta_{H_2O} \theta_{O_2} N_a,$$

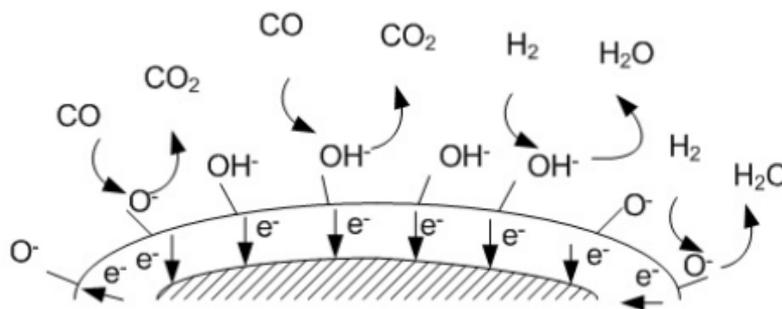
где  $\theta_{OG}$  – доля поверхности, занятая атомами основного газа восстановителя;

– на поверхности полупроводника имеется прилегающая к электродам неактивная часть материала;

– влияние температуры учитывалось с помощью уравнения Моррисона;

– адсорбция газов восстановителей происходит на различные адсорбционные центры (конкуренция отсутствует), ввиду относительно низких концентраций газов в сравнении с концентрацией кислорода.

На рис. 2 схематично представлены реакции, протекающие на поверхности полупроводникового датчика при наличии в воздухе двух газов восстановителей, водорода и монооксида углерода.



**Рис.2.** Реакции на поверхности полупроводникового датчика

**Fig. 2.** Reactions on the surface of a semiconductor sensor

Полупроводниковые датчики, ввиду специфики принципа действия, проявляют высокую чувствительность к перекрестным газам, колебаниям температуры и влажности воздуха. Все эти факторы учтены в полученной математической модели.

Термокаталитические датчики применяются для детектирования горючих газов. Выделяемое в результате каталитического горения тепло пропорционально выходному сигналу датчика [27]. В качестве измерительной схемы наиболее часто применяется мостовая.

В основе математической модели термокаталитического датчика взято уравнение теплового баланса [28]:

$$U_R I = \delta_T (T - T_C),$$

где  $U_R$  – падение напряжения;

$I$  – ток резистора;

$\delta_T$  – коэффициент теплоотдачи резистора;

$T$  – температура резистора;

$T_C$  – температура окружающей среды.

Разработка математической модели термокаталитического датчика осуществлялась на основании адсорбционной теории гетерогенного катализа и теории

электрических цепей. При расчете выходного напряжения датчика использовалась теория мостовых схем. Скорость каталитической реакции определялась по кинетическому выражению Ленгмюра-Хиншелвуда, для описания процессов адсорбции газов применялось адсорбционное уравнение Ленгмюра [8]:

$$\theta_z = \frac{\sqrt{b_z p_z}}{1 + \sqrt{b_z p_z}},$$

где  $\theta_z$  – доля поверхности, занятая газом;

$b_z$  – адсорбционный коэффициент;

$p_z$  – парциальное давление газа в воздухе.

При разработке модели опирались на следующие положения и допущения [26-29]:

– для определения константы скорости реакции использовалось модифицированное уравнение Аррениуса;

– при учете перекрестной чувствительности для мешающих газов, ввиду низких концентраций, пренебрегали зависимостью константы скорости от степени покрытия поверхности катализатором;

– конкуренцией основного и мешающего газов за адсорбционные центры, ввиду низких концентраций мешающих газов, пренебрегали;

– для описания зависимости сопротивления платиновой спирали от температуры использовалось уравнение Каллендара-Ван Дьюзена.

Разработанная модель позволяет учитывать влияние следующих факторов на сигнал датчика: перекрестных газов, колебания температуры, давления.

Оптические датчики используются для детектирования углекислого газа и некоторых горючих газов [33]. В основе принципа работы оптических датчиков лежит способность газов поглощать инфракрасное излучение, избирательность достигается выбором длины волны. В качестве модели была взята и модерни-

зирована уже существующая модель, базирующаяся на известном законе поглощения Бугера-Ламберта-Бера [30]:

$$I(C, \lambda) = I_0(\lambda)e^{-\alpha(\lambda)LC},$$

где  $C$  – концентрация газа;

$\lambda$  – длина волны;

$L$  – длина пути поглощения;

$\alpha(\lambda)$  – спектральный коэффициент поглощения газа.

Модернизация модели заключалась в учете конструктивных особенностей датчиков (принцип работы датчика по схеме «один источник излучения – две длины волны») и влияния параметров окружающей среды, таких как температура и давление, через изменение свойств пробы (закон Менделеева – Клапейрона). На рис. 3 представлена конструкция оптического датчика, поясняющая принцип работы.

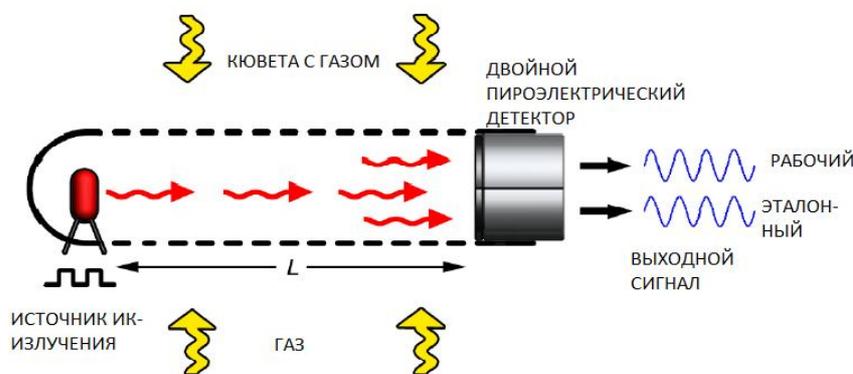


Рис.3. Инфракрасный оптический датчик

Fig. 3. Infrared optical sensor

Выходной сигнал датчика рассчитывается из соотношения двух интенсивностей излучений рабочего и эталонного. Рабочее излучение – излучение, полоса инфракрасных длин волн которого соответствует полосе поглощения детектируемого газа. Эталонное излучение – излучение с длинной вол-

ны, на которой абсорбция ИК-излучения газом не происходит.

Оптические датчики обладают высокой избирательностью, в связи с чем модель оптических датчиков учитывает только влияние колебаний температуры и давления окружающей среды.

Для описания функциональной зависимости выходного сигнала электрохимического (амперометрического) датчика от концентрации детектируемого газа использовалась уже существующая линейная математическая модель. Амперометрические датчики представляют собой гальваническую ячейку, в которой протекает электрохимическая реакция. Такие датчики наиболее часто используют для детектирования кислорода, ток, образующийся в результате реакции, прямо пропорционален его концентрации. Кислород поступает в ячейку через специальную мембрану (наиболее часто, политетрафторэтиле-

новую), поэтому в основу модели положен закон Фика:

$$J = -D \cdot \frac{\partial C}{\partial x},$$

где  $J$  – плотность потока вещества;

$\partial C/\partial x$  – градиент концентрации.

Учитывая принцип работы датчика, основным мешающим фактором, оказывающим влияние на выходной сигнал, является давление. Датчики данного типа высоко избирательны, учитывая специфику электрохимических реакций.

В табл. 1 представлена база математических моделей на основные типы газочувствительных датчиков, в табл. 2 – обозначения символов.

**Таблица 1.** База математических моделей газочувствительных датчиков

**Table 1.** Base of mathematical models of gas-sensitive sensors

Тип датчика / Sensor type	Математическая модель датчика / Mathematical model of the sensor
Полупроводниковый / Semiconductor	$\frac{R_s}{R_0} = \frac{1}{(A_1 + A_2(C_{H_2O} \frac{P}{P_o})^{n_1} + A_3(C_{H_2O} \frac{P}{P_o})^{n_1} (C_{i_o} \frac{P}{P_o})^{n_2} + A_4(C_{i_o} \frac{P}{P_o})^{n_2} + \dots + A_6(C_{H_2O} \frac{P}{P_o})^{n_1} (C_{i_m} \frac{P}{P_o})^{n_3} + A_7(C_{i_m} \frac{P}{P_o})^{n_4}) \times e^{A_8(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} + A_5,$
Термокаталитический / Thermocatalytic	$\frac{\Delta U}{2\Delta U_{0,SLEL}} = \frac{\frac{\gamma}{2} \left( A_1 \left( \frac{\sqrt{A_2 C_{i_o} P}}{1 + \sqrt{A_2 C_{i_o} P}} \right)^{(A_3+1)} \exp \left[ \frac{A_4 \sqrt{A_2 C_{i_o} P}}{1 + \sqrt{A_2 C_{i_o} P}} \right] + A_5 C_{i_m} P \right) + \left( \frac{A_1 \left( \frac{\sqrt{A_2 C_{i_o} P}}{1 + \sqrt{A_2 C_{i_o} P}} \right)^{(A_3+1)} \exp \left[ \frac{A_4 \sqrt{A_2 C_{i_o} P}}{1 + \sqrt{A_2 C_{i_o} P}} \right] + A_5 C_{i_m} P}{A_1 \left( \frac{\sqrt{A_2 2P_0}}{1 + \sqrt{A_2 2P_0}} \right)^{(A_3+1)} \exp \left[ \frac{A_4 \sqrt{A_2 2P_0}}{1 + \sqrt{A_2 2P_0}} \right]} \right) \delta_{T_H} (1 + \gamma T_{CH})}{+ 2\delta_{T_H} \frac{P}{P_0} (1 + \gamma T_c)}$

Тип датчика / Sensor type	Математическая модель датчика / Mathematical model of the sensor
Оптический, инфракрасный / Optical, infrared	$S = A \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot (C_{io} \cdot \frac{P \cdot T_0}{P_0 \cdot T})^\beta})$
Электрохимический, амперометрический / Electrochemical, amperometric	$U_{\text{вых}} = A \cdot C_{io} \cdot \frac{P}{P_0}$

**Таблица 2.** Обозначения символов в математических моделях**Table 2.** Symbol designations in mathematical models

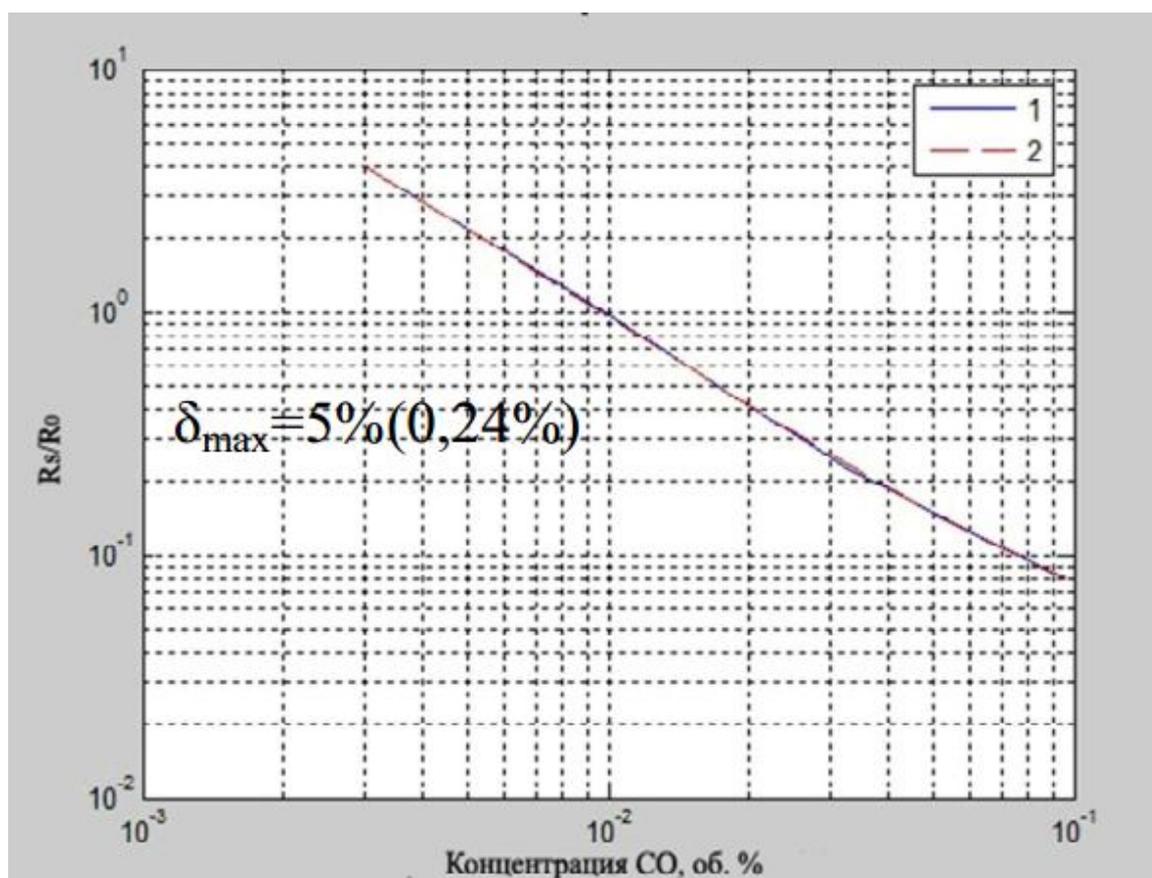
Общие обозначения / General designations	$C_{io}$	концентрация основного газа
	$C_{im}$	концентрация мешающего газа
	$C_{H2O}$	концентрация водяных паров
	$P, P_0$	давление воздуха, давление при н.у.
	$RH, RH_0$	влажность воздуха, влажность при н.у.
	$T, T_0$	температура воздуха, температура при н.у.
	$A_i$	параметризуемые коэффициенты
Полупроводниковый / Semiconductor	$n$	параметризуемые коэффициенты
	$R_s, R_0$	сопротивление датчика, сопротивление датчика при фиксированной концентрации
Термокаталитический / Thermocatalytic	$\delta_{T_n}$	коэффициент теплоотдачи резистора при нормальных условиях
	$\gamma$	температурный коэффициент сопротивления
	$\Delta U, \Delta U_{0,5LEL}$	напряжение моста, выходное напряжение моста при концентрации газа 0,5 LEL
	$T_{CH}$	температура среды номинальная.
Оптический, инфракрасный / Optical, infrared	$\alpha, \beta$	параметризуемые коэффициенты
	$S$	сигнал датчика
Электрохимический, амперометрический / Electrochemical, amperometric	$U_{\text{вых}}$	выходное напряжение

## Результаты и их обсуждение

Апробация моделей проводилась на следующих датчиках: полупроводниковый датчик монооксида углерода *TG2442 (Figaro)*, термокаталитический датчик водорода *NP-AHS (Nemoto)*, оптический датчик *MSH-P-CO<sub>2</sub>/NC/TC (Dynamet)*, электрохимический датчик кислорода *I-01 (International Technology)*. На рис. 4-9 представлены результаты параметризации основной зависимости для всех трех типов датчиков, за исключением электрохимического дат-

чика кислорода, имеющего линейную характеристику преобразования. Для достижения требуемого уровня точности модернизированная модель оптического датчика параметризовалась с разбиением характеристики на поддиапазоны.

Результаты параметризации и оценки экстраполяционных свойств математической модели полупроводникового датчика представлены в табл. 3. В табл. 4 сведены результаты исследований моделей датчиков трех типов: термокаталитического, оптического и электрохимического.



**Рис. 4.** Результат аппроксимации основной характеристики полупроводникового датчика CO: 1 – данные реального датчика; 2 – результат моделирования

**Fig. 4.** The result of the approximation of the main characteristic of the semiconductor sensor CO: 1 – the data of the real sensor; 2 – simulation result

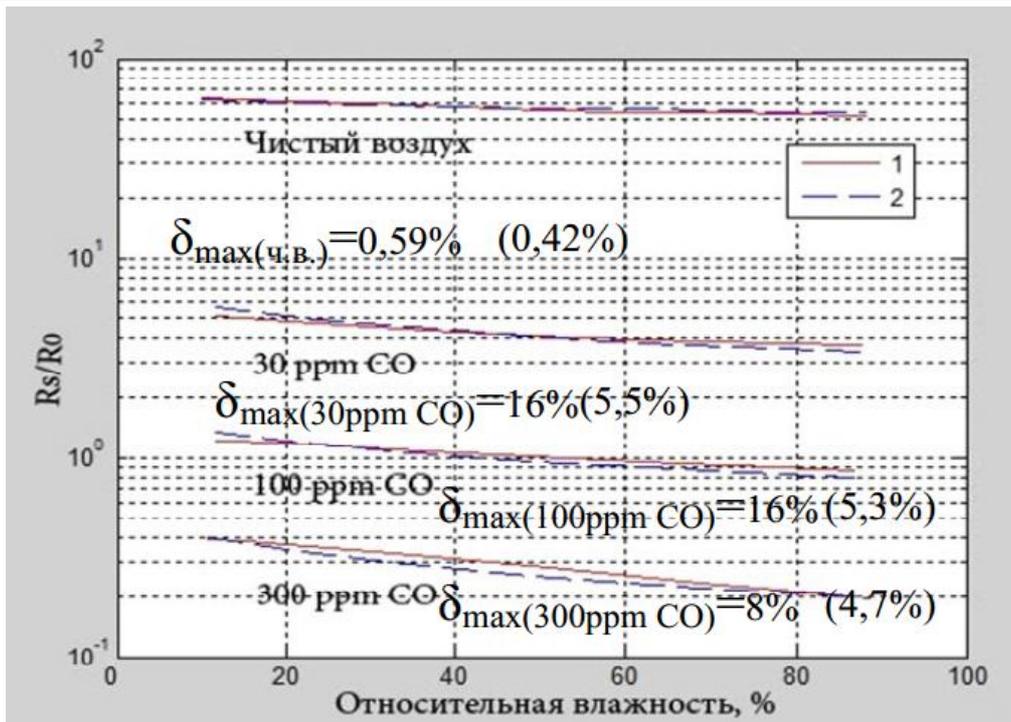


Рис. 5. Результаты аппроксимации влияния влажности на сигнал полупроводникового датчика CO: 1 – данные реального датчика; 2 – результат моделирования

Fig. 5. Results of the approximation of the influence of humidity on the signal of a semiconductor CO sensor: 1 – real sensor data; 2 – simulation result

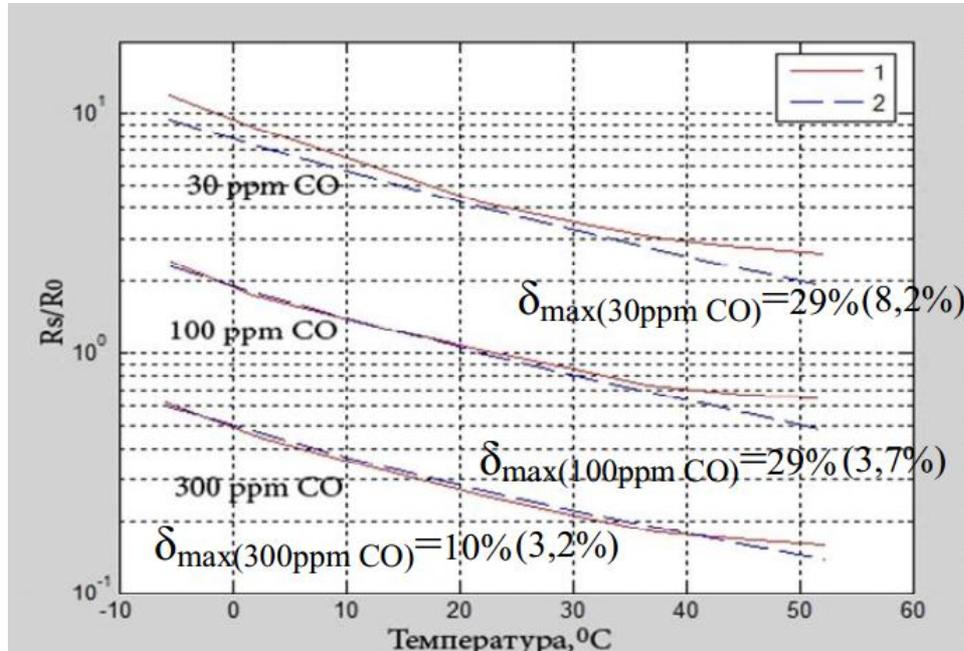
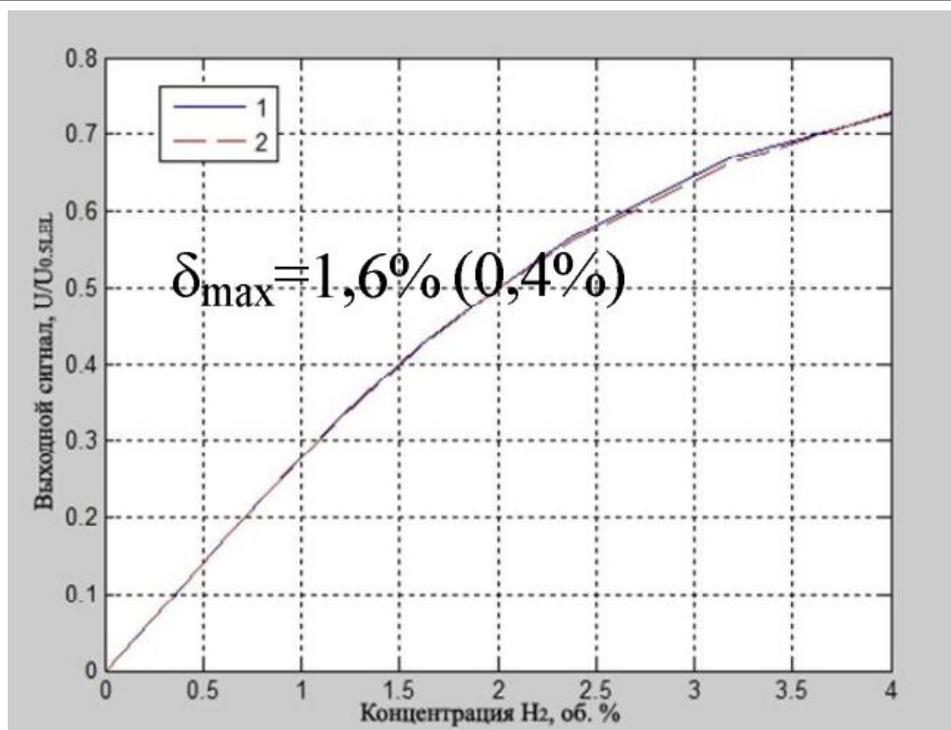


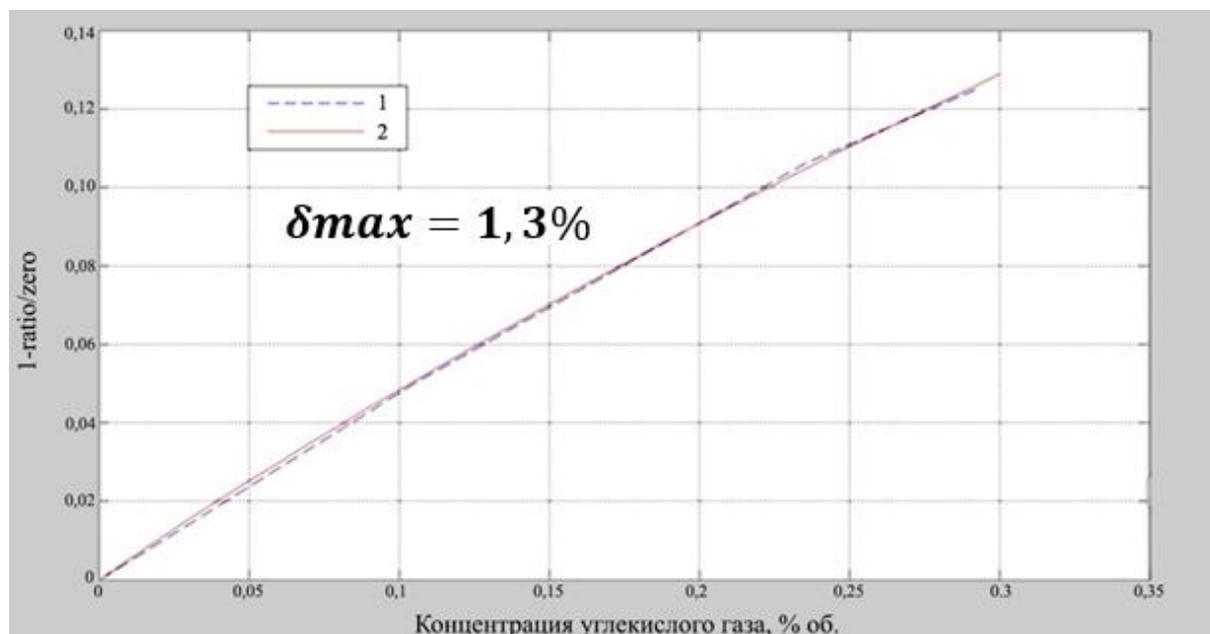
Рис.6. Результаты аппроксимации влияния температуры на сигнал полупроводникового датчика CO: 1 – данные реального датчика; 2 – результат моделирования

Fig. 6. The results of the approximation of the temperature effect on the signal of a semiconductor CO sensor: 1 – the data of a real sensor; 2 – simulation result



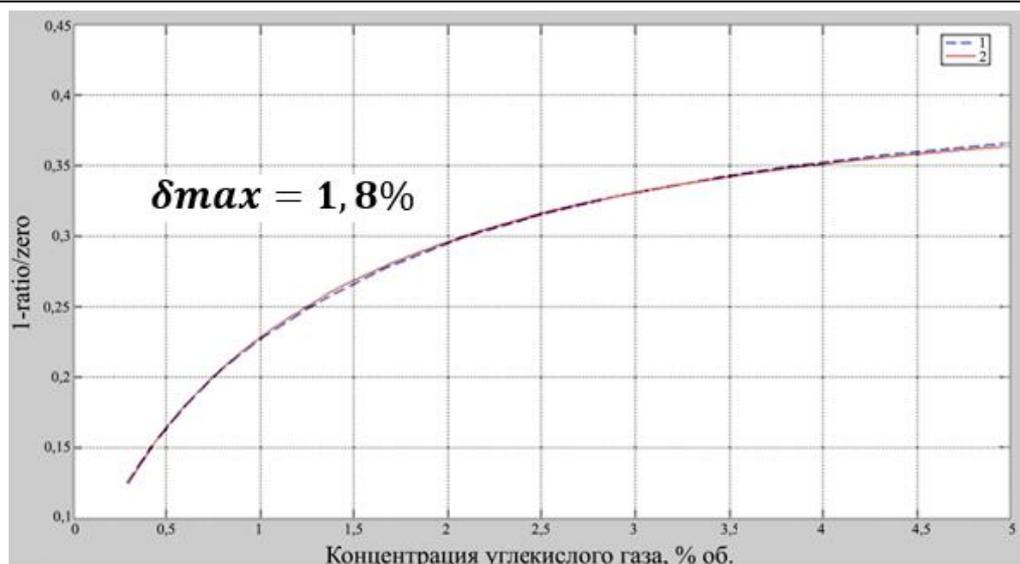
**Рис. 7.** Результаты аппроксимации основной характеристики термокаталитического датчика водорода: **1** – данные реального датчика; **2** – результат моделирования

**Fig. 7.** Results of approximation of the main characteristic of a thermocatalytic hydrogen sensor: **1** – real sensor data; **2** – simulation result



**Рис. 8.** Результаты аппроксимации основной характеристики оптического датчика CO<sub>2</sub> в диапазоне от 0 до 0,3 об.%. **1** – результат моделирования; **2** – данные реального датчика

**Fig. 8.** Results of approximation of the main characteristic of the optical CO<sub>2</sub> sensor in the range from 0 to 0.3 vol.%. **1** – simulation result; **2** – real sensor data



**Рис. 9.** Результаты аппроксимации основной характеристики оптического датчика  $\text{CO}_2$  в диапазоне от 0,3 до 5,0 об.%. **1** – результат моделирования; **2** – данные реального датчика

**Fig. 9.** Results of approximation of the main characteristic of the optical  $\text{CO}_2$  sensor in the range from 0.3 to 5.0 vol.%. **1** – simulation result; **2** – real sensor data

**Таблица 3.** Результаты исследования модели полупроводникового датчика

**Table 3.** Results of the study of the semiconductor sensor model

Тип датчика / Sensor type	Варьируемый фактор / Variable factor	Диапазон значе- ний параметра / Range of parameter values	Условия / Conditions	$\delta_{max}$ , %	СКО, % / MSE, %	
Полупровод- никовый / Semiconductor	Концентрация $\text{CO}$	Параметризация	$RH = 50\%$ $C_{\text{H}_2} = 0$ об.%; $T = 293,15 \text{ K}$	5	0,24	
		30 – 1000 <i>ppm</i>				
	Концентрация $\text{H}_2$	Параметризация	$RH = 50\%$ $C_{\text{CO}} = 0$ об.%; $T = 293,15 \text{ K}$	0,9	0,67	
		300 – 1000 <i>ppm</i>				
	Влажность	Параметризация	10 – 90 %	$C_{\text{CO}} = 0,003$ об.%; $C_{\text{H}_2} = 0$ об.%; $T = 293,15 \text{ K}$	0,59	0,42
			Экстраполяция			
		10 – 70 %	$C_{\text{CO}} = 0,01$ об.%; $C_{\text{H}_2} = 0$ об.%; $T = 293,15 \text{ K}$	5	5,5	
70 – 90 %				16		
Экстраполяция	10 – 90 %	$C_{\text{CO}} = 0,03$ об.%; $C_{\text{H}_2} = 0$ об.%; $T = 293,15 \text{ K}$	8	4,7		
	55 – 75 %					

Тип датчика / Sensor type	Варьируемый фактор / Variable factor	Диапазон значе- ний параметра / Range of parameter values	Условия / Conditions	$\delta_{max}$ , %	СКО, % / MSE,%
	Температура	Экстраполяция	$RH = 50\%$ ; $C_{CO} =$ $0,003\text{об.}\%$ ; $C_{H_2} = 0\text{об.}\%$	20	8,2
		-5 – +15 °С		10	
		+15 – +30 °С			
		+30 – +50 °С			
		Экстраполяция	$RH = 50\%$ ; $C_{CO} = 0,01$ об.%; $C_{H_2} =$ $0\text{об.}\%$	5	3,7
		-5 – +35°С		29	
		+35 – +50°С			
		Параметризация	$RH = 50\%$ ; $C_{CO} = 0,03$ об.%; $C_{H_2} =$ $0\text{об.}\%$	6	3,2
		-5 – +45°С		10	
		+45 – +50 °С			

**Таблица 4.** Результаты исследования математических моделей датчиков

**Table 4.** Results of the study of mathematical models of sensors

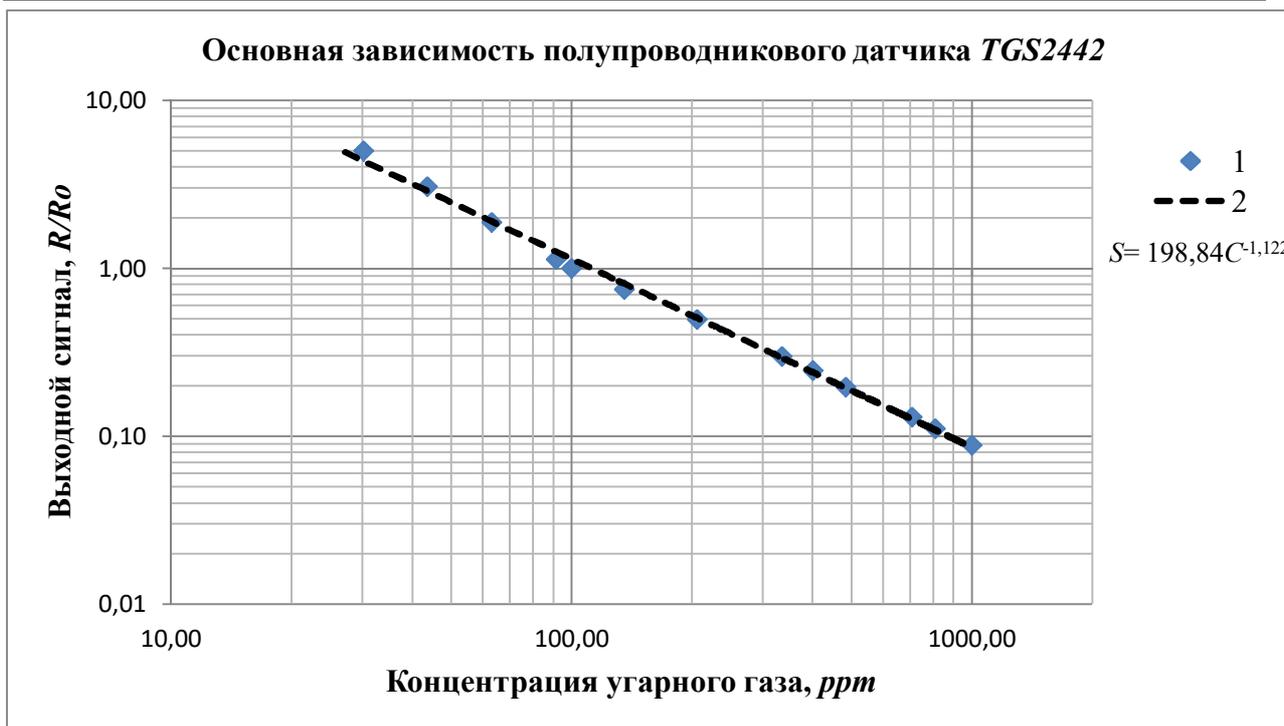
Тип датчика / Sensor type	Варьируемый фактор / Variable factor	Диапазон значе- ний параметра / Range of parameter values	Условия / Conditions	$\delta_{max}$ , %	СКО, % / MSE,%
Термокаталитический / Thermocatalytic	Концентрация $H_2$	Параметризация	$RH =$ $50\%$ $C_{CO} =$ $0\text{об.}\%$ ; $T = 293,15$ $K$	1,6	0,4
		0 – 4 об.%			
	Давление	Экстраполяция	$RH =$ $50\%$ $C_{H_2} =$ $0,24\text{ об.}\%$ ; $T = 293,15$ $K$	9,0	2,9
		90 - 110 кПа			
	Температура	Экстраполяция	$RH =$ $50\%$ $C_{H_2} =$ $0,24\text{ об.}\%$ ; $T = 293,15$ $K$	4,1	1,9
		+10 – +50 °С			

Тип датчика / Sensor type	Варьируе- мый фактор / Variable factor	Диапазон значе- ний параметра / Range of parameter values	Условия / Conditions	$\delta_{max}$ , %	СКО, % / MSE, %
Оптический / Optical, infrared	Концентра- ция $CO_2$	Параметризация	$RH = 50\%$ $T = 293,15 K$	1,3	0,05
		0 – 0,3 об. %			
		0,3 -5 об. %		1,8	0,06
	Температура	Экстраполяция	$RH = 50\%$ $C_{CO_2} = 1,0$ об. %	5,1%	0,1
		+10 – +50 °C			
	Давление	Экстраполяция	$RH = 50\%$ $T = 295,23K$ $C_{CO_2} = 1,0$ об. %	0,1	0,05
101,325 - 81,360 кПа					
Электрохимический / Electrochemical, amperometric	Концентра- ция $O_2$	Параметризация	$RH = 50\%$ $T = 293,15 K$	0,5	0,01
		0 – 21 об. %			

Полученные значения погрешностей позволяют судить об эффективности предложенного подхода к разработке математических моделей, а также о наличии экстраполяционных свойств. Значения среднеквадратической погрешности расхождения основных функций преобразования датчиков, полученных в результате моделирования и представленных производителем, не превышает 0,5%. Максимальное значение СКО, характеризующие расхождение результатов моделирования и реальных данных по влиянию дополнительных факторов (перекрестная чувствительность, влажность, давление, температура), составляет 8,2% по учету влияния

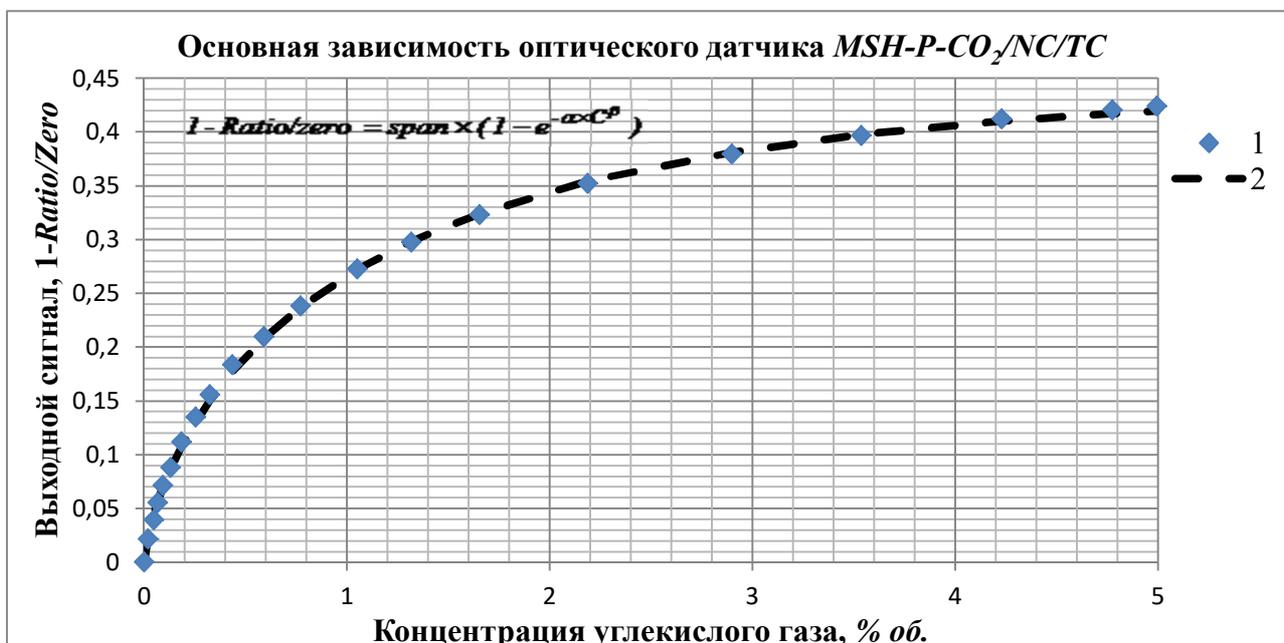
температуры на полупроводниковый датчик угарного газа. Для датчиков в табл. 3 погрешности не превышают 3 %.

На рис. 10-12 представлены исходные графики функций преобразования основных зависимостей, полученные по данным производителей, в табл. 5 сопоставлены погрешности воспроизведения основной характеристики датчиков, полученные в результате моделирования, с погрешностями самих датчиков. В табл. 6 – погрешности датчиков, вызванные колебаниями параметров среды до и после обработки сигнала с использованием разработанных математических моделей.



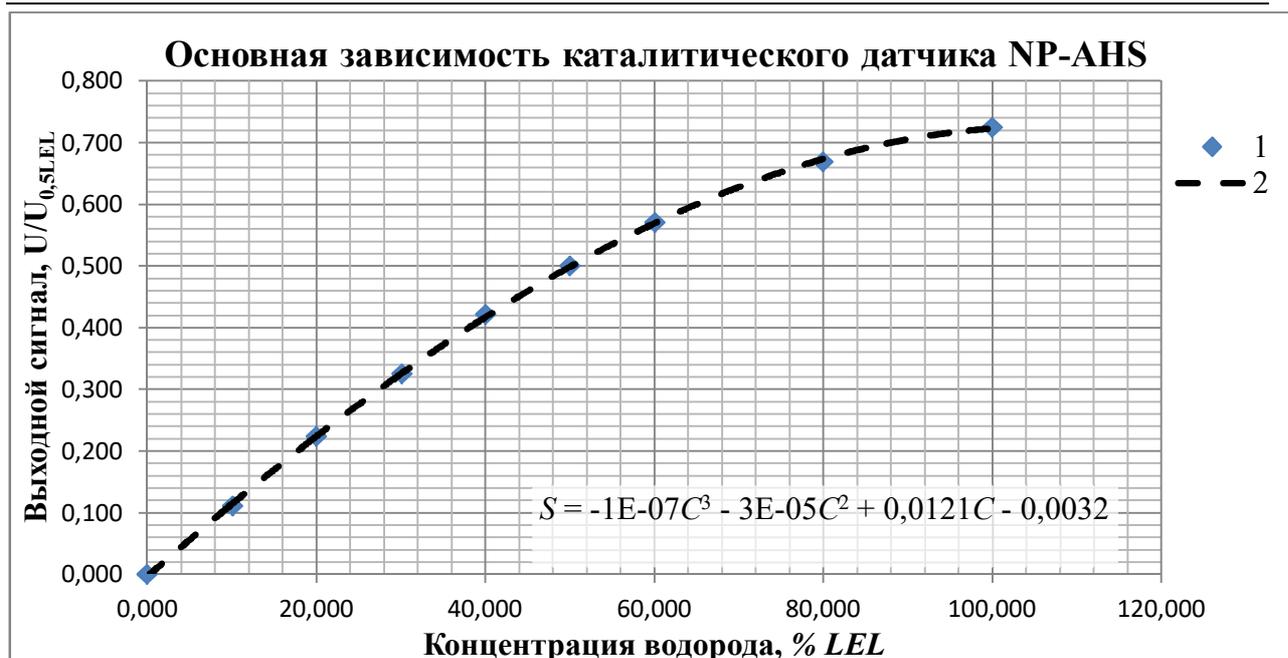
**Рис. 10.** График зависимости выходного сигнала датчика от концентрации угарного газа:  
 1 – данные производителя; 2 – уравнение регрессии по данным производителя;  
 S – сигнал датчика; C – концентрация газа

**Fig. 10.** Graph of the dependence of the sensor output signal on the carbon monoxide concentration:  
 1 – manufacturer's data; 2 – regression equation according to the manufacturer's data;  
 S – sensor signal; C – gas concentration



**Рис.11.** График зависимости выходного сигнала датчика от концентрации углекислого газа:  
 1 – данные производителя; 2 – уравнение регрессии по данным производителя

**Fig. 11.** Graph of the dependence of the sensor output signal on the carbon dioxide concentration:  
 1 – manufacturer's data; 2 – regression equation according to the manufacturer's data



**Рис.12.** График зависимости выходного сигнала датчика от концентрации водорода:  
 1 – данные производителя; 2 – уравнение регрессии по данным производителя;  
 S – сигнал датчика; C – концентрация газа

**Fig. 12.** Graph of the sensor output signal dependence on the hydrogen concentration:  
 1 – manufacturer's data; 2 – regression equation according to the manufacturer's data;  
 S – sensor signal; C – gas concentration

**Таблица 5.** Сопоставление погрешностей датчиков и моделей по воспроизведению основной характеристики

**Table 5.** Comparison of sensor errors and models for reproducing the main characteristic

Тип датчика / Sensor type	Погрешность датчика / Sensor error		Погрешность модели / Model error	
	СКО, %	Макс. отн., %	СКО, %	Макс. отн., %
Полупроводниковый	3,10	15,10	0,24	5
Термокаталитический	0,30	5,09	0,4	1,6
Оптический	0,10	13,40	0,06	1,8

**Таблица 6.** Сопоставление погрешностей до и после обработки данных, с использованием математических моделей по дополнительным факторам

**Table 6.** Comparison of errors before and after data processing, using mathematical models on additional factors

Влияющий фактор / Influencing factor	H <sub>2</sub> (0-4 об. %)		CO (0,003 - 0,1 об.%)		CO <sub>2</sub> (0 - 5 об. %)	
	До обработки / Before processing	После обработки / After processing	До обработки / Before processing	После обработки / After processing	До обработки / Before processing	После обработки / After processing
RH, %/10%	-	-	7,7	1,5	-	-
T, %/10 <sup>0</sup> C	1,2	0,15	20	3,3	3,2	0,85
P, %/5кПа	3	0,35	5,7	1,2	5	0,77

Наибольший интерес представляют полупроводниковые и термокаталитические датчики, обладающие высокой стабильностью характеристик и быстрым действием, длительным сроком службы и низкой стоимостью, в сравнении с электрохимическими и оптическими датчиками. Кроме того, для данных типов датчиков были разработаны новые модели, а не модернизированы существующие, в связи с отсутствием моделей, позволяющих учитывать влияние таких факторов, как температура, влажность, перекрестная чувствительность, давление. Именно поэтому, для полупроводниковых и термокаталитических датчиков проведены наиболее детальные исследования математических моделей.

### **Выводы**

Проведенные работы позволили сгенерировать математические модели основных типов газочувствительных датчиков, выпускаемых промышленностью. Разработанные математические модели лежат в основе функционирования

программного комплекса для автоматизации проектирования газоанализаторов на основе нейронных сетей, реализованного в среде имитационного моделирования.

Сгенерированные модели газочувствительных датчиков обладают следующими преимуществами:

- позволяют с требуемой точностью воспроизводить основные и дополнительные характеристики датчиков;
- обладают экстраполяционными свойствами, в отличие от эмпирических регрессионных уравнений;
- позволяют в автоматическом режиме генерировать выходной сигнал датчиков при подаче на вход различных комбинаций влияющих факторов, что необходимо для генерации обучающих данных;
- обеспечивают сжатие данных (один датчик – одна модель), взамен альтернативным вариантам хранения данных в виде совокупности регрессионных кривых по каждому влияющему фактору или в виде таблиц.

### **Список литературы**

1. Брокарев И.А. Искусственные нейронные сети для решения задачи анализа компонентного состава газовых смесей // Управление большими системами. Вып. 80. М.: ИПУ РАН, 2019. С.98-115.
2. Бондарь О.Г., Брежнева Е.О., Чернышов Р.Е. Применение нейронных сетей в задаче количественного анализа состава воздушной среды // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(1): 159-174. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-159-174>.

3. Томакова Р.А., Филист С.А., Яа З.До. Универсальные сетевые модели для задач классификации биомедицинских данных // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 4-2 (43). С. 44-50.
4. Контроль качества продуктов с помощью искусственного обоняния / А.В. Шапошник, К.К. Полянский, Н.С. Демочко, А.Н. Пономарев // Молочная промышленность. 2005. № 8. С. 5354.
5. Pouter J. Smartphone ownership and internet usage continues to climb in emerging economies. Washington, DC, USA: Pew Research Center, 2016. 44 p.
6. Chansin G., Pugh D. Environmental gas sensors 2017-2027. Cambridge, UK: CISION, 2017. 166 p.
7. Варежников А.С., Сысоев В.В. Обработка векторных сигналов газоаналитического мультисенсорного преобразователя // Проблемы управления, обработки и передачи информации: сборник трудов V Международной юбилейной научной конференции. Саратов, 2017. С. 287-291.
8. Крылов О.В. Гетерогенный катализ. М.: Академкнига, 2004. 679 с.
9. Гаев А.В., Роговский А.Д., Ланцберг А.В. Классификация физических объектов при помощи сверточных нейронных сетей на примере задачи распознавания газов // Технологии инженерных и информационных систем. 2019. № 1. С. 95-104.
10. Borrego C., Costa A. M., Ginja J. [et al.]. Assessment of air quality microsensors versus reference methods: The EuNetAir joint exercise // Atmospheric Environment. 2016. Vol. 147. P. 246-263.
11. Исследование отклика тонкопленочного сенсора на основе оксида олова в импульсном режиме для различных газов / О.В. Анисимов, Н.К. Максимова, Е.Ю. Севастьянов, Е.В. Черников // Известия вузов. Физика. 2006. № 3. С. 186-187.
12. Чувствительность полупроводниковых газовых сенсоров к водороду и кислороду в инертной газовой среде / В. В. Малышев, А. В. Писляков, И. Ф. Крестников, В. А. Крутов, С. Н. Зайцев // ЖАХ. 2001. № 9. С. 976-983.
13. Guseva A.I., Malykhina G.F., Nevelskiy A.S. Neural Network Based Algorithm for the Measurements of Fire Factors Processing // Stud. Comput. Intell. 2019. Vol. 799. P. 160–166.
14. Metal Oxide Semi-Conductor Gas Sensors in Environmental Monitoring / F. George., L. M. Cavanagh, A. Afonja, R. Binions // Sensors. 2010. P. 5469-5502
15. Pour M. M., Lashkov A., Radocea A. [et al.] Laterally extended atomically precise graphene nanoribbons with improved electrical conductivity for efficient gas sensing // Nature Communications. 2017. Vol. 8. P. 820.
16. Toward new gas-analytical multisensor chips based on titanium oxide nanotube array / F. Fedorov, M. Vasilkov, A. Lashkov [et al.] // Scientific Reports. 2017. Vol. 7. P. 9732.

17. Использование нейросетевой модели обработки данных в системах обнаружения пожаров для определения места возгорания / А.И. Гусева, Г.Ф. Малыхина, В.Н. Круглеевский, С.Н. Турусов // Морские интеллектуальные технологии. 2019. Т. 2. № 2. С. 93–102.

18. B̂arsan N., Weimar U. Understanding the fundamental principles of metal oxide based gas sensors; the example of CO sensing with SnO<sub>2</sub> sensors in the presence of humidity // J. Phys.: Condens. Matter 2003. 15. P. 813–839.

19. Malykhina G., Guseva A., Militsyn A. Spatial-temporal digital twin models as a direction for the development of cross-cutting digital technologies // Proceedings of the International Scientific-Practical Conference “Business Cooperation as a Resource of Sustainable Economic Development and Investment Attraction” (ISPCBC 2019). Paris, France: Atlantis Press, 2019. 729 p.

20. Влияние влажности на свойства сенсоров водорода на основе тонких пленок Pt/SnO<sub>2</sub>:Sb в режимах постоянного и импульсного нагрева / О.В. Анисимов, В.И. Гаман, Н.К. Максимова, Е.Ю. Севастьянов, Е.В. Черников, Н. В. Сергейченко // Материалы девятой конференции “Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы IIIV”. Томск, 2006. С. 504-507.

21. Macias M. M. Gas sensor measurements during the initial action period of duty-cycling for power saving // Sensors and Actuators B. 2017. Vol. 239. P. 1003-1009.

22. Environmental Influences on SMO Sensors’ Performance / G. Jian-Wei, Q. Chen, M. Lian, N. Liu // Sensors & Transducers Magazine (S&T e-Digest). 2005. Vol.54. Is. 4. P.310-319.

23. Malykhina G., Guseva A. Application the Evolutional Modeling to the Problem of Searching the Optimal Sensors Location of Fire-Fighting System // Convergent Cognitive Information Technologies; ed. by Sukhomlin V., Zubareva E. Cham: Springer International Publishing, 2020. С. 187–199.

24. Malyshev V. V., Pisyakov A. V. Investigation of gas-sensitivity of sensor structures to carbon monoxide in a wide range of temperature, concentration and humidity of gas medium // Sens. Actuators. 2007. B. 123. P. 71-81.

25. Effect of Environmental Temperature and Humidity on Different Metal Oxide Gas Sensors at Various Gas Concentration Levels / Abdunnasser Nabil Abdullah, Kamarulzaman Kamarudin, Syed Muhammad Mamduh, Abdul Hamid Adom, Zaffry Hadi Mohd Juffry// 2nd Joint Conference on Green Engineering Technology & Applied Computing 2020 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. P. 1-8.

26. Ronald A. J. Furnace combustion sensor test results // The United States Consumer Product Safety Commission, Washington D.C. 20207 September. 2001. P. 1-36

27. Application of a catalytic combustion sensor (Pellistor) for the monitoring of the explosiveness of a hydrogen–air mixture in the upper explosive limit range / M. Krawczyk,

J. Namiesnik // Journal of Automated Methods & Management in Chemistry. 2003. Vol. 25, No. 5. P. 115–122

28. Дрейзин В.Э., Брежнева Е.О., Бондарь О. Г. Моделирование каталитического датчика водорода // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. Ч. 1. № 5(38). С. 69-76.

29. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. В 2 ч. Ч.2. Массообменные процессы. М.: Химия, 1995. 368 с.

30. Подтелкина О.А. Моделирование оптического сенсора // Фундаментальные и прикладные исследования: от теории к практике: материалы II международной научно-практической конференции, приуроченной ко Дню российской науки. Казань, 2018. С. 180-188.

### References

1. Brokarev I.A. [Artificial neural networks for solving the problem of analyzing the component composition of gas mixtures]. *Upravlenie bol'shimi sistemami* [Management of Large Systems]. Moscow, IPU RAN, 2019, is. 80. pp.98-115 (In Russ.).

2. Bondar O. G., Brezhnev E. O., Chernyshov R.E. Application of Neural Networks in the Problem of Quantitative Analysis of Air Composition. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(1): 159-174 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-159-174>.

3. Tomakova R.A., Filist SA, Yaa Z.D. Tomakova R.A. Universal'nye setevye modeli dlya zadach klassifikatsii biomeditsinskikh dannykh [Universal network models for classification problems of biomedical data]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 4-2 (43), pp. 44-50 (In Russ.).

4. Shaposhnik A.V., Polyansky K.K., Demochko N.S., Ponomarev A.N. Kontrol' kachestva produktov s pomoshch'yu iskusstvennogo obonyaniya [Quality control of products using artificial sense of smell]. *Molochnaya promyshlennost' = Dairy Industry*, 2005, no. 8, 5354 p. (In Russ.).

5. Pouter J. Smartphone ownership and internet usage continues to climb in emerging economies. Washington, DC, USA: Pew Research Center, 2016, 44 p.

6. Chansin G., Pugh D. Environmental gas sensors 2017-2027. Cambridge, UK: CISION, 2017, 166 p.

7. Varezchnikov A.S., Sysoev V.V. [Neural network processing of vector signals of a gas analytical multisensor transducer]. *Problemy upravleniya, obrabotki i peredachi informatsii: sbornik trudov V Mezhdunarodnoi yubileinoi nauchnoi konferentsii* [Problems of management, processing and transmission of information. Collection of works of the V International anniversary scientific conference]. Saratov, 2017, pp. 287-291 (In Russ.).

8. Krylov O.V. *Geterogennyi kataliz* [Heterogeneous catalysis]. Moscow, Akademkniga Publ., 2004. 679 p. (In Russ.).

9. Gaev A.V., Rogotovskiy A.D., Lantsberg A.V. Klassifikatsiya fizicheskikh ob"ektov pri pomoshchi svertochnykh neuronnykh setei na primere zadachi raspoznavaniya gazov [Classification of physical objects using convolutional neural networks on the example of the problem of gas recognition]. *Tekhnologii inzhenernykh i informatsionnykh sistem = Technologies of Engineering and Information Systems*, 2019, no. 1, pp. 95-104 (In Russ.).

10. Borrego C., Costa A. M., Ginja J. [et al.]. Assessment of air quality microsensors versus reference methods: The EuNetAir joint exercise. *Atmospheric Environment*, 2016, vol. 147, pp. 246-263.

11. Anisimov O.V., Maksimova N.K., Sevastianov E.Yu., Chernikov E.V. Issledovanie otklika tonkoplenochnogo sensora na osnove oksida olova v impul'snom rezhime dlya razlichnykh gazov [Investigation of the response of a thin-film sensor based on tin oxide in a pulsed mode for various gases]. *Izvestiya vuzov. Fizika = Izvestiya Vuzov. Physics*, 2006, no. 3, pp. 186-187 (In Russ.).

12. Malyshev V. V., Pislyakov A. V., Krestnikov I. F., Krutov V. A., Zaitsev S.N. Chuvstvitel'nost' poluprovodnikovyykh gazovykh sensorov k vodorodu i kislorodu v inertnoi gazovoi srede [Sensitivity of semiconductor gas sensors to hydrogen and oxygen in an inert gas environment]. *ZhAkh*, 2001, no. 9, pp. 976-983 (In Russ.).

13. Guseva A.I., Malykhina G.F., Nevelskiy A.S. Neural Network Based Algorithm for the Measurements of Fire Factors Processing. *Stud. Comput. Intell*, 2019, vol. 799, pp. 160–166.

14. George F., Cavanagh L. M., Afonja A., Binions R. Metal Oxide Semi-Conductor Gas Sensors in Environmental Monitoring. *Sensors*, 2010, pp. 5469-5502.

15. Pour M. M., Lashkov A., Radocea A. [et al.] Laterally extended atomically precise graphene nanoribbons with improved electrical conductivity for efficient gas sensing. *Nature Communications*, 2017, vol. 8, 820 p.

16. Fedorov F., Vasilkov M., Lashkov A. [et al.] Toward new gas-analytical multisensor chips based on titanium oxide nanotube array. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, 9732 p.

17. Guseva A.I., Malykhina G.F., Krugleevskiy V.N., Turusov S.N. Ispol'zovanie neirosetevoi modeli obrabotki dannykh v sistemakh obnaruzheniya pozharov dlya opredeleniya mesta vozgoraniya [The use of a neural network model of data processing in fire detection systems for determining the place of fire]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii = Marine Intellectual Technologies*, 2019, vol. 2, no. 2, pp. 93-102 (In Russ.).

18. B^arsan N., Weimar U. Understanding the fundamental principles of metal oxide based gas sensors; the example of CO sensing with SnO<sub>2</sub> sensors in the presence of humidity. *J. Phys.: Condens. Matter* 15, 2003, pp. 813–839.

19. Malykhina G., Guseva A., Militsyn A. Spatial-temporal digital twin models as a direction for the development of cross-cutting digital technologies. *Proceedings of the Inter-*

160 Информатика, вычислительная техника и управление / Computer science, computer engineering and control  
*national Scientific-Practical Conference "Business Cooperation as a Resource of Sustainable Economic Development and Investment Attraction" (ISPCBC 2019)*. Paris, France: Atlantis Press, 2019. 729 p.

20. Anisimov O.V., Gaman V.I., Maksimova N.K., Sevast'yanov E.Yu., Chernikov E.V., Sergeicheno N.V. [Influence of humidity on the properties of hydrogen sensors based on Pt / SnO<sub>2</sub>: Sb thin films in constant and pulsed heating modes]. *Materialy devyatoi konferentsii "Arsenid galliya i poluprovodnikovye soedineniya gruppy IIIV"* [Proceedings of the Ninth Conference "Gallium Arsenide and Group IIIV Semiconductor Compounds"]. Tomsk, 2006, pp. 504-507 (In Russ.).

21. Macias M. M. Gas sensor measurements during the initial action period of duty-cycling for power saving. *Sensors and Actuators B*, 2017, vol. 239, pp. 1003-1009.

22. Jian-Wei G., Chen Q., Lian M., Liu N. Environmental Influences on SMO Sensors' Performance. *Sensors & Transducers Magazine (S&T e-Digest)*, 2005, vol.54, is. 4, pp.310-319.

23. Malykhina G., Guseva A. Application the Evolutional Modeling to the Problem of Searching the Optimal Sensors Location of Fire-Fighting System. *Convergent Cognitive Information Technologies*. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 187–199.

24. Malyshev V. V., Pislyakov A. V. Investigation of gas-sensitivity of sensor structures to carbon monoxide in a wide range of temperature, concentration and humidity of gas medium. *Sens. Actuators*, 2007, B. 123, pp. 71-81.

25. Abdunnasser Nabil Abdullah, Kamarulzaman Kamarudin, Syed Muhammad Mamduh, Abdul Hamid Adom, Zaffry Hadi Mohd Juffry Effect of Environmental Temperature and Humidity on Different Metal Oxide Gas Sensors at Various Gas Concentration Levels. *2nd Joint Conference on Green Engineering Technology & Applied Computing 2020 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, pp. 1-8.

26. Ronald A. J. Furnace combustion sensor test results. *The United States Consumer Product Safety Commission*. Washington D.C. 20207 September, 2001, pp. 1-36.

27. Krawczyk M., Namiesnik J. Application of a catalytic combustion sensor (Pellistor) for the monitoring of the explosiveness of a hydrogen-air mixture in the upper explosive limit range. *Journal of Automated Methods & Management in Chemistry*, 2003, vol. 25, no. 5, pp. 115–122.

28. Dreizin V. E., Brezhnev E.O., Bondar O. G. Modelirovanie kataliticheskogo datchika vodoroda [Modeling of a catalytic hydrogen sensor]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2011, pt. 1, no. 5 (38), pp. 69-76 (In Russ.).

29. Dytner'sky Yu.I. *Protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii* [Processes and devices of chemical technology]. Part 2. Mass-exchange processes. Moscow, 1995. 368 p. (In Russ.).

30. Podtelkina O.A. [Modeling an optical sensor]. *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya: ot teorii k praktike. Materialy II mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [In the collection: Fundamental and applied research: from theory to practice. Materials of the II International Scientific and Practical Conference]. Kazan, 2018, pp. 180-188 (In Russ.).

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Бондарь Олег Григорьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры Космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: b.og@mail.ru

**Oleg G. Bondar**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Space Instrumentation and Communication Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: b.og@mail.ru

**Брежнева Екатерина Олеговна**, кандидат технических наук, доцент кафедры Космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: bregnevaeo@mail.ru

**Ekaterina O. Brezhneva**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Space Instrumentation and Communication Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: bregnevaeo@mail.ru

**Добросердов Олег Гурьевич**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, советник при ректорате, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: serfingk@yandex.ru

**Oleg G. Dobroserdov**, Dr. of Sci. (Engineering), Senior Research Associate, Adviser to the Rector, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: serfingk@yandex.ru

**Андреев Кирилл Геннадьевич**, студент кафедры Космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: skyline.ozerk@gmail.com

**Kirill G. Andreev**, Student, Space Instrumentation and Communication Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: skyline.ozerk@gmail.com

**Поляков Николай Владимирович**, студент кафедры Космического приборостроения и систем связи, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: nikera2016@mail.ru

**Nikolay V. Polyakov**, Student, Space Instrumentation and Communication Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: nikera2016@mail.ru

## Автоматизированный подбор руководителей образовательных проектов на основе генетических алгоритмов

Е. Е. Ковшов<sup>1</sup> ✉, В. С. Кувшинников<sup>1</sup>, Л. Е. Осипенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО "НИКИМТ – Атомстрой"  
Алтуфьевское шоссе 43, стр. 2, Москва 127410, Российская Федерация

<sup>2</sup> Московский городской педагогический университет,  
2-ой Сельскохозяйственный проезд 4, корп. 1, Москва 129226, Российская Федерация

✉ e-mail: KovshovEE@atomrus.ru

### Резюме

**Цель исследования.** Целью работы является проведение исследования возможности применения автоматизированных методов поиска решения для задачи формирования подбора кандидатов при решении широкого спектра бизнес задач с предусмотренной возможностью учесть влияние таких факторов, как: требования к качествам бизнес процессов, ограничения по компетенции кандидатов, занятость кандидатов в других процессах компании, планируемая срочность выполнения задач, объем наличествующих в пуле и ожидаемых задач, характеристики задач, частная политика компании при подборе кандидатов, политика компании в отношении рисков.

**Методы.** Приведена типологизация инновационных бизнес-задач по характеру предметной области, спектру целевых результатов, длительности выполнения и т.д. Рассмотрены внешние и внутренние факторы, обеспечивающие эффективную работу проектной команды и успешность проекта. Предложены наборы атрибутивных характеристик для оценки качества проектов и потенциальных проектантов. Рассмотрена структура алгоритма решения задачи формирования подбора кандидатов для решения набора задач. Приведены предпосылки для использования принципов генетического программирования при решении рассматриваемой задачи. Определены параметры реализации алгоритма поиска, критерии и ограничения. В среде Jupyter Lab v2 произведена реализация алгоритма, а также проведено моделирование, результаты которого представлены в тексте. Проведен относительный анализ практической эффективности алгоритма в зависимости от параметров моделирования с целью обоснования выбора их значений.

**Результаты.** В ходе исследования рассмотрена задача формирования подбора кандидатов для выполнения пула проектов с учетом ряда факторов. Разработан подход к решению задачи на основе генетического алгоритма эвристического поиска. Проведено численное моделирование в среде Jupyter Lab v2. Проанализированы результаты моделирования и подобраны параметры алгоритма.

**Заключение.** Предложенный подход позволяет не только автоматизировать подбор руководителей на основе накопленной истории данных, но и вносить коррективы в устоявшийся процесс для изменения вектора развития организации. Взаимодействие образования и информатики (информационных технологий) способно обогатить и расширить поле обеих наук в сфере комплектования инновационных проектных команд. Их объектный анализ, дополненный возможностями генетического программирования, в своей совокупности позволяет добиться заданных качеств руководителя инновационных проектных команд, способствующих максимизации пользы для бизнеса при минимизации материальных затрат.

В качестве результата вычислительных экспериментов с применением математического аппарата и технологий генетических алгоритмов, необходимо подчеркнуть возможность экстраполяции подобного рода подходов на любой уровень реализации инновационных проектов.

**Ключевые слова:** эволюционные вычисления; генетический алгоритм; цифровой рекрутине; управление задачами.

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

**Для цитирования:** Ковшов Е. Е., Кувшинников В. С., Осипенко Л. Е. Автоматизированный подбор руководителей образовательных проектов на основе генетических алгоритмов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(1): 162-180. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-162-180>.

Поступила в редакцию 19.01.2021

Подписана в печать 26.02.2021

Опубликована 31.03.2021

## Automated Leadership Selection Educational Projects Based on Genetic Algorithms

Evgeniy E. Kovshov <sup>1</sup> ✉, Vladimir S. Kuvshinnikov <sup>1</sup>, Ludmila E. Osipenko <sup>2</sup>

<sup>1</sup> JSC "NIKIMT – Atomstroy"

43 Altufevskoe highway, build. 2, Moscow 127410, Russian Federation

<sup>2</sup> Moscow City Pedagogical University

2nd Selskohozyastvennyy passage 4, build. 1, Moscow 129226, Russian Federation

✉ e-mail: KovshovEE@atomrus.ru

### Abstract

**Purpose or research.** The purpose of the study is to conduct a research of the possibility to use automated methods of finding a solution for the task of forming a selection of candidates in solving a wide range of business problems with the possibility of the influence of such factors as: requirements for the quality of business processes, restrictions on the competence of candidates, the employment of candidates in other processes of the company, planned urgency of fulfilling tasks, the amount of tasks in the pool and expected tasks, tasks characteristics, private policy of the company when selecting candidates, company's policy on risks.

**Methods.** A typology of innovative business tasks is given by the subject area, the range of target results, the duration of execution, etc. External and internal factors are considered to ensure the effective operation of the project team and the success of the project. There are offered sets of attributive characteristics for assessment of projects quality and potential projects. The structure of the algorithm for solving the problem of creating a selection of candidates for solving a set of problems is considered. Prerequisites for using principles of genetic programming in solving the problem under consideration are given. Search algorithm implementation parameters, criteria and constraints are defined. Algorithm was implemented as well as modeling in the Jupyter Lab v2 environment. The results are described in the text. A relative analysis of practical effectiveness of the algorithm was carried out depending on the modeling parameters to justify the selection of their values.

**Results.** The task of creating a selection of candidates for the implementation of projects pool considering a number of factors was described during the study. An approach to solving the problem based on a genetic heuristic search algorithm has been developed. A numerical simulation was performed in Jupyter Lab v2. Simulation results were analyzed, and algorithm parameters were selected.

**Conclusion.** The proposed approach allows not only automatize the selection of managers based on the accumulated data history, but also to adjust the established process to change the vector of organization development. The interaction of education and informatics (information technology) can enrich and expand the field of both sciences in the field of recruitment of innovative project teams. Their object analysis, supplemented by genetic programming capabilities, together allows you to achieve specified qualities of the head of innovative project teams that help maximize business benefits while minimizing material costs. As a result of computational experiments using

**Keywords:** evolutionary calculations; genetic algorithm; digital recruiting; task management.

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

**For citation:** Kovshov E. E., Kuvshinnikov V. S., Osipenko L. E. Automated Leadership Selection Educational Projects Based on Genetic Algorithms. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(1): 162-180 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-162-180>.

Received 19.01.2021

Accepted 26.02.2021

Published 31.03.2021

\*\*\*

## Введение

В настоящее время экономические показатели бизнес-компаний, способность к удержанию конкурентных отраслевых преимуществ зависят от их инновационного потенциала и инновационной активности [1-3]. Управление инновациями является достаточно сложной и многокритериальной задачей, поскольку включает анализ существенного количества таких разнородных элементов, как человеческие ресурсы, финансовая и технологическая составляющие инновационного проекта [4].

Одной из центральных компонент управления инновациями является рабочая сила. Постулируя тезис «Кадры решают все», владельцы бизнес-корпораций адекватно оценивают не только важность формирования сплоченной работоспособной проектной команды, но и поиск альтернативных вариантов для баланса «эффективность проектантов – качество инновационного продукта». Последний предполагает, что «Другие, такие же специалисты, как ты, подвергают твой материал столь мощным проверкам, что могут довести гонку до

казательств до точки, когда всех твоих ресурсов может стать недостаточно для победы.» [4].

Это своеобразное «сражение» увеличивает стоимость гонки доказательств, умножает количество испытаний, изменяет форму новых объектов, тем самым актуализируя необходимость поиска решений, способных отслеживать и анализировать массивы показателей и параметров, описываемых большими данными и обрабатываемых сложными алгоритмами.

Широкий спектр обозначенных проблем обуславливает постановку трех важных задач: обоснование основных атрибутивных характеристик инновационного проекта и команды проектантов, а также способов управления ими на основе IT-решений.

Последовательно раскроем каждую из этих задач.

Говоря о поиске бизнес-компаниями идей для инновационных проектов, следует отметить, что характерной чертой современного постиндустриального общества является «превращение науки в технонауку». В симбиозе «фундамен-

тальная наука ↔ технология → богатство общества» наука является генератором новых идей и принципов для высокотехнологичных разработок. Технологии, в свою очередь, создают новые продукты и решения, расширяющие возможности человека [5].

Тенденция «прикладнизации науки» обусловила увеличение доли технологических разработок в общем объеме научных изысканий, а в итоге – возможность их типологизации по характеру предметной области на исследовательские, проектные и комплексные.

Коммерциализация науки, постепенное замещение фундаментальности критерием эффективности и практической пользы – определяют спектр целевых результатов инновационного проекта, который варьируется от поддерживающего, предполагающего совершенствование имеющихся знаний и решений, до универсального и прорывного.

Традиционная типологизация по длительности выполнения предполагает наличие краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных проектов.

Эти основные атрибутивные характеристики инновационного проекта обусловили следующее дискурсивное поле для обсуждения команды проектантов. Формируясь по типу театральных трупп, создаваемых на время для постановки какого-либо спектакля, такие проектные команды собирают «исполнителей» разных ролей. Принцип разнообразия предполагает, что научная продуктивность каждого члена проектной коман-

ды будет возрастать с увеличением его функций и специальностей, порождая «...нелинейное взаимодействие между ними и, как следствие, не аддитивное, а более резкое возрастание зависимости коллективного результата от усилий отдельных специалистов» [6].

В этой связи нам представляется важным обобщение основных атрибутов инновационной проектной команды как системного объекта, управляющим механизмом которой является мотивация проектантов на получение бизнесом максимальной пользы при минимизации затрат.

Соколов К.О. выделяет внешние и внутренние факторы, обеспечивающие эффективную работу инновационной проектной команды. Среди прочих он выделяет управленческие и организационные составляющие, например, занятость соискателя в иных проектах в качестве лидера, эксперта, исполнителя, а также оценку профессионального, личностного и психофизиологического потенциала членов инновационной команды [7].

Считаем, что функционирование инновационной проектной команды будет успешным при наличии в ней одного или нескольких специалистов с ученой степенью, ответственных за формулировку проблематики, построение дизайна исследования, а также обладающих достаточным авторитетом и опытом для привлечения наиболее эффективных проектантов [8].

Практика показывает, что в ряде случаев успех инновационного проекта определяется участием фронтмена; проектанта со специальными компетенциями, например, технической или индустриальной экспертизой и пр. [9].

Групповые проекты объединяет необходимость поиска действенных способов повышения эффективности коммуникации проектантов, например, при обсуждении сложных моментов, связанных с дизайном проекта, уточнении и дополнении неполных требований.

Для прорывных инновационных проектов важным является обоснование привлечения сидящих в «башне из слоновой кости» изобретателей-одиночек, какими были Эдисон или Райт.

Поскольку привлечение сторонних IT-специалистов, как правило, является весьма затратным, и, как любой проектант, они обладают как плюсами, так и минусами, а производительность каждого из них в конкретном инновационном проекте зависит от множества составляющих, то важно предложить некоторую объективную абстрактную метрику «крутизны» и для них тоже. В качестве таких атрибутивных характеристик нами приняты основные программистские статусы: Junior, Middle, Senior.

Основное профессиональное требование, предъявляемое к джуниору, состоит в умении самостоятельно и оперативно выполнять поставленные ему технические задачи. Кроме энергии и целеустремленности, для джуниоров важно наличие желания развиваться и учиться, а также умение спокойно относиться к критике.

Основное требование к миддл-разработчику – это понимание требований бизнеса и умение их воплощать в конкретные технические решения.

Самым высокостатусным IT-специалистом является синьор. Он должен обладать не только обширным опытом, глубоко понимать устройство библиотек и фреймворков, но и уметь оценивать технические риски проекта. «Синьор» обладает развитыми коммуникативными навыками, позволяющими ему рекомендовать конструктивные пути рефакторинга кода, а также успешно убеждать заказчика и команду. Пример набора некоторых атрибутов инновационного проекта и его потенциальных исполнителей приведен в табл. 1.

## Материалы и методы

Как отмечает научный сотрудник Оксфордского Института Интернета и Института А.Тьюринга Сандра Уэчер (Sandra Wachter), «Так называемая «аналитика трудовых ресурсов» (people analytics) играет все большую роль при принятии компаниями решений о найме, увольнении, оценке результативности и повышении сотрудников.» [10]. Однако следует отметить, что процесс нахождения уравнения, описывающего оптимальное поведение любой естественной системы, нельзя назвать простой задачей. По словам Хола Липсона, «прежде на создание одной такой оптимизационной модели у ученого могла уйти целая жизнь» [11].

**Таблица 1.** Пример набора атрибутов инновационного проекта и его потенциальных исполнителей со значениями**Table 1.** Example of an innovative project attributes set and its potential performers with the values

Атрибут / Attribute	Возможные значения атрибута / Possible attribute values	Значение коэффициента / Coefficient value	Относительный вес атрибута / Relative weight of the attribute
Инновационный проект / Innovative project			
Классификация	Исследовательский	1	1
	Проектный	2	
	Комплексный	3	
Сроки исполнения	Краткосрочный	1	2
	Среднесрочный	2	
	Долгосрочный	3	
Целевой результат	Поддерживающий	1	3
	Универсальный	2	
	Прорывной	3	
Потенциальный проектант / Potential designer			
Образование	Среднее специальное	1	1
	Высшее	2	
	Наличие ученой степени	3	
Занятость в иных проектах	3 и более	1	2
	2	2	
	1	3	
Специальные инновационные компетенции	Нет	1	2
	Есть (не уникальные для проекта)	2	
	Есть (уникальные для проекта)	3	
Опыт инновационного проектирования	Разрозненный	1	3
	Есть, единичный (1-2 проекта)	2	
	Есть, существенный (3 и более проекта)	3	
«Командность»	Никогда (индивидуальный контрибьютер)	1	3
	Все-равно	2	
	Всегда	3	
Программистский статус	Junior	1	3
	Middle	2	
	Senior	3	

В настоящее время для решения оптимизационных задач используются новые парадигмы, осуществляющие поиск баланса между эффективностью и качеством решений за счет «выживания сильнейших альтернативных решений» в неопределенных и нечетких условиях [12-15] и др. Одна из таких парадигм – это генетическое программирование. Его возможности очень ярко выразил М. Шмидт, отмечая, что физики (Ньютон или Кеплер) могли бы запустить генетический алгоритм на компьютере и всего после нескольких часов вычислений получить законы, объясняющие падение яблока или движение планет» [16].

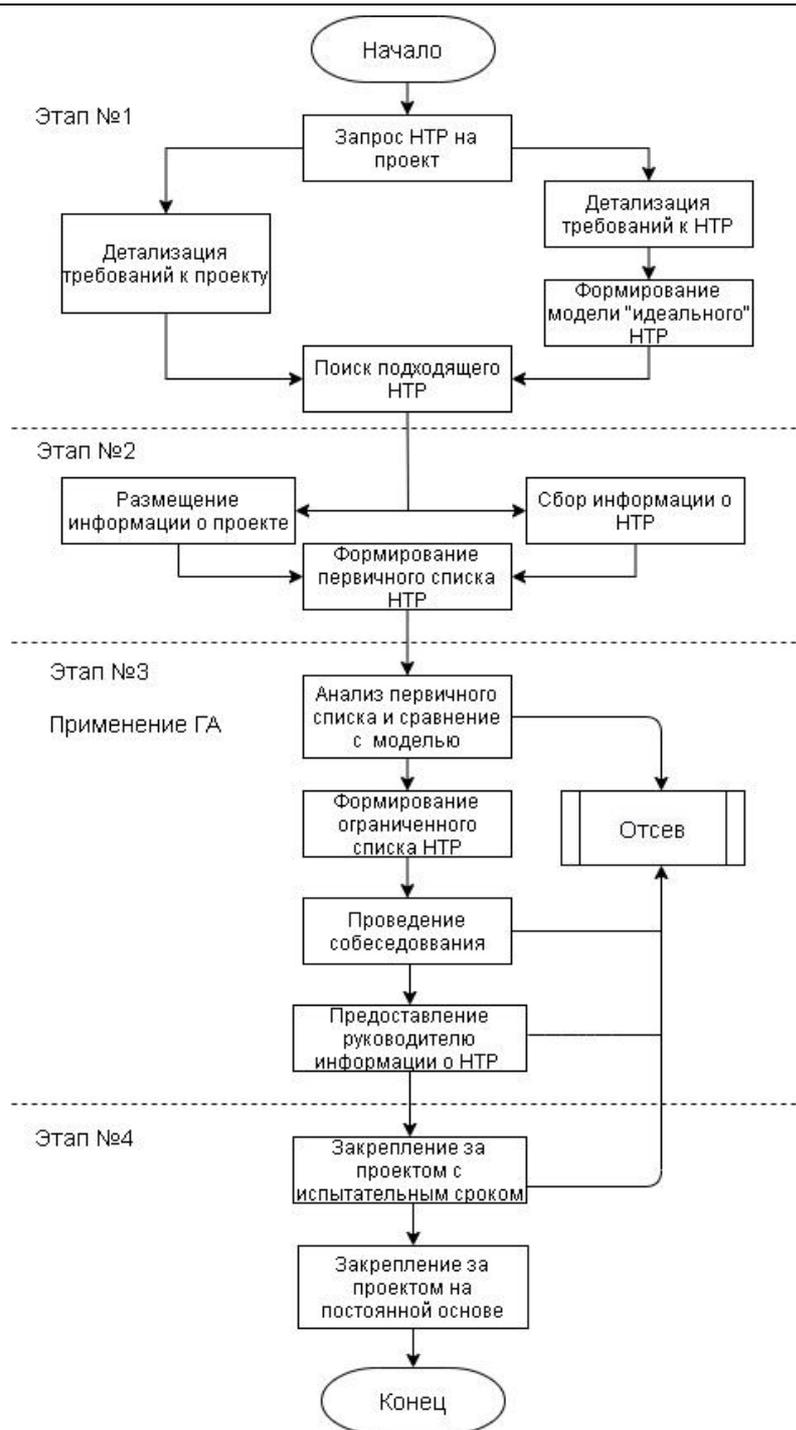
Генетическое программирование повторяет принципы биологической эволюции. Генетический алгоритм (далее – ГА) начинает с составления уравнений путем случайного сопоставления различных строительных блоков, состоящих из математических выражений, а затем проверяет, насколько хорошо получившиеся уравнения описывают данные. Уравнения, которые не проходят проверку, отбраковываются, а те, которые демонстрируют определенный потенциал, перекомпоновываются таким образом, чтобы в конечном итоге из них могла получиться точная математическая модель [17].

ГА намного эффективнее традиционной «регрессии». Так, при регрессион-

ном поиске форма уравнения (зависимости) задается заранее, а параметры уравнения оптимизируются таким образом, чтобы соответствовать данным. Однако в ряде случаев необходим поиск самих уравнений, включая арифметические операторы, тригонометрические и логарифмические функции, константы и т.д.

Эффективность выбора ГА для повышения качества управления цифровым рекрутингом инновационных проектных команд обусловлена такими особенностями, как: работа с закодированным множеством параметров; одновременный поиск среди нескольких альтернатив на заданном множестве решений; использование целевой функции (далее – ЦФ) для оценки качества решений; а также вероятностный подход к анализу оптимизационных задач.

Традиционно алгоритм оценки потенциала членов инновационной проектной команды представляет собой нижеизложенную поэтапную процедуру. Она начинается с отбора характеристик, определяющих потенциал инновационной команды; выбора соответствующей методики оценки; разработки сценария оценивания; проведения оценки; обработки полученной информации; интерпретации результатов; формулировки выводов; разработки рекомендаций по комплектованию и развитию команды (рис. 1).



**Рис. 1.** Последовательность подбора потенциальных проектантов для выполнения инновационного проекта

**Fig. 1.** The sequence of selection of potential designers for the implementation of an innovative project

Для работы ГА выбирают множество натуральных параметров оптимизационной проблемы и кодируют их в последовательность конечной длины в некотором алфавите. Цикл алгоритма

повторяется до тех пор, пока не будет выполнено заданное число итераций алгоритма или на некоторой генерации не будет получено решение требуемого качества, или в случае нахождения ло-

кального оптимума и возникновения преждевременной сходимости, когда алгоритм не может найти выход из области влияния локального экстремума.

В рассматриваемом процессе оптимизации управления подбором команды исследуемое пространство параметров достаточно велико, и задача не требует строгого нахождения глобального оп-

тимума. Достаточно за короткое время найти приемлемое решение, попадающее в множество наиболее подходящих. В связи с этим наиболее целесообразно использовать ГА на этапе №3 (рис. 1). Первым делом следует определить исходные данные процесса подбора проектанта для выполнения конкретного инновационного проекта (табл. 2).

**Таблица 2.** Исходные данные для работы генетического алгоритма

**Table 2.** Initial data for the genetic algorithm operation

1.	Потенциальный фронтмен / Potential frontman	$F=\{1...N_F\}$ , $N_F$ – число потенциальных фронтменов
2.	Инновационный проект / Innovative project	$I=\{1...N_I\}$ , $N_I$ – число инновационных проектов

Каждый объект (элемент любого вектора из табл. 1) можно представить в виде совокупности атрибутов, численно характеризующих данный объект. Атрибуты определены на ограниченном множестве положительных значений. Вектор подбора:  $SV = \{F_1, F_2, \dots, F_I\}$ , где  $F_I$  – номер фронтмена, подобранного на  $i$ -ый инновационный проект,  $I=\{1, \dots, N_I\}$ ,  $F=\{1, \dots, N_F\}$ .

Таким образом, задача подбора потенциального претендента на выполнение определенного инновационного проекта сводится к задаче выбора такого варианта вектора  $SV$  из числа возможных, при котором с учетом ограничений и критериев претендент будет в максимальной степени способствовать достижению поставленной цели.

**Ограничения:** Число инновационных проектов не должно превышать число потенциальных проектантов.

**Критерии:** На конкретный инновационный проект должен быть назначен один фронтмен. Степень соответствия атрибутов фронтмена-претендента (FA) атрибутам проекта (PA) оценивается путём приведения к универсальным атрибутам (UA) с помощью таблицы соответствия. Таблица формируется в зависимости от конкретного случая и допускает many-to-many связи. Значение атрибутов приводится к шкале универсальных атрибутов, содержащей целые значения от 0 до 9. В зависимости от разности значений соответствующих атрибутов кандидата и проекта из отдельной таблицы констант относительной эффективности (REC) выбирается значение эффективности назначения кандидата для выполнения проекта.

Для более точной оценки результативности назначения, отдельно учитывается объём работ (трудоемкость) по

каждому из атрибутов проекта (PL). Ориентировочный целевой удовлетворительный объём затрат на завершение  $i$ -го проекта определяется по формуле:

$$SC_i = \sum_{k=1}^{N_A} \left( \frac{PL_{i,k}}{REC(RUAF_{j,k} - UAP_{i,k})} \right) + CA_i, \quad (1)$$

где  $i$  – номер проекта из  $\{1 \dots N_I\}$ ;  $j$  – номер фронтмена-кандидата;  $N_A$  – число универсальных атрибутов;  $k$  – номер универсального атрибута;  $PL_{i,k}$  – трудоёмкость  $k$ -го атрибута у  $i$ -го объекта;  $RUAF_{j,k}$  – требуемый при выполнении  $i$ -го проекта уровень  $k$ -го универсального атрибута у  $j$ -го кандидата;  $UAP_{i,k}$  – уровень  $k$ -го универсального атрибута у  $i$ -го проекта;  $REC()$  – функция относительной эффективности, значения которой заранее заносятся в таблицу для каждого атрибута;  $CA_i$  – индивидуальный настраиваемый коэффициент для  $i$ -го проекта, позволяющий учесть специфику требований к выполнению. Коэффициент  $CA$  позволяет настроить требовательность проекта к способностям фронтмена, связанную с повышенной срочностью, требовательностью к качеству выполнения или другими требованиями, повышающими объём требуемых ресурсов.

Ожидаемый объём затрат на завершение  $i$ -го проекта определяется по формуле

$$PC_i = \sum_{k=1}^{N_A} \left( \frac{PL_{i,k}}{REC(UAF_{j,k} - UAP_{i,k})} \right) + CW_j, \quad (2)$$

где  $i$  – номер проекта из  $\{1 \dots N_I\}$ ;  $j$  – номер фронтмена-кандидата;  $N_A$  – число универсальных атрибутов;  $k$  – номер универсального атрибута;  $PL_{i,k}$  – трудоёмкость  $k$ -го атрибута у  $i$ -го объекта;

$UAF_{j,k}$  – уровень  $k$ -го универсального атрибута у  $j$ -го кандидата;  $UAP_{i,k}$  – уровень  $k$ -го универсального атрибута у  $i$ -го проекта;  $REC()$  – функция относительной эффективности;  $CW_j$  – оценка уровня текущей загруженности  $j$ -го кандидата. Коэффициент  $CW$  учитывает дополнительные затраты ресурсов, связанные с назначением на проект уже занятого кандидата.

При составлении начальной популяции для генетического алгоритма, каждая особь будет представлена хромосомой. Хромосома представляет из себя вектор подбора  $SV$ , содержащий, согласно числу проектов,  $N_I$  номеров претендентов, распределённых в случайном порядке. Поскольку проектант может быть назначен на выполнение только одного инновационного проекта одновременно, в рассматриваемых хромосомах каждый ген (номер проектанта) должен встречаться только один раз. Такая разновидность «перечислимых хромосом с уникальными генами» часто используется в комбинаторных задачах. Стандартная операция скрещивания для этого типа хромосом некорректна, поэтому здесь используется более сложная схема двухточечного скрещивания.

Оценка эффекта от назначения на проекты претендентов из каждого вектора подбора производится по формуле:

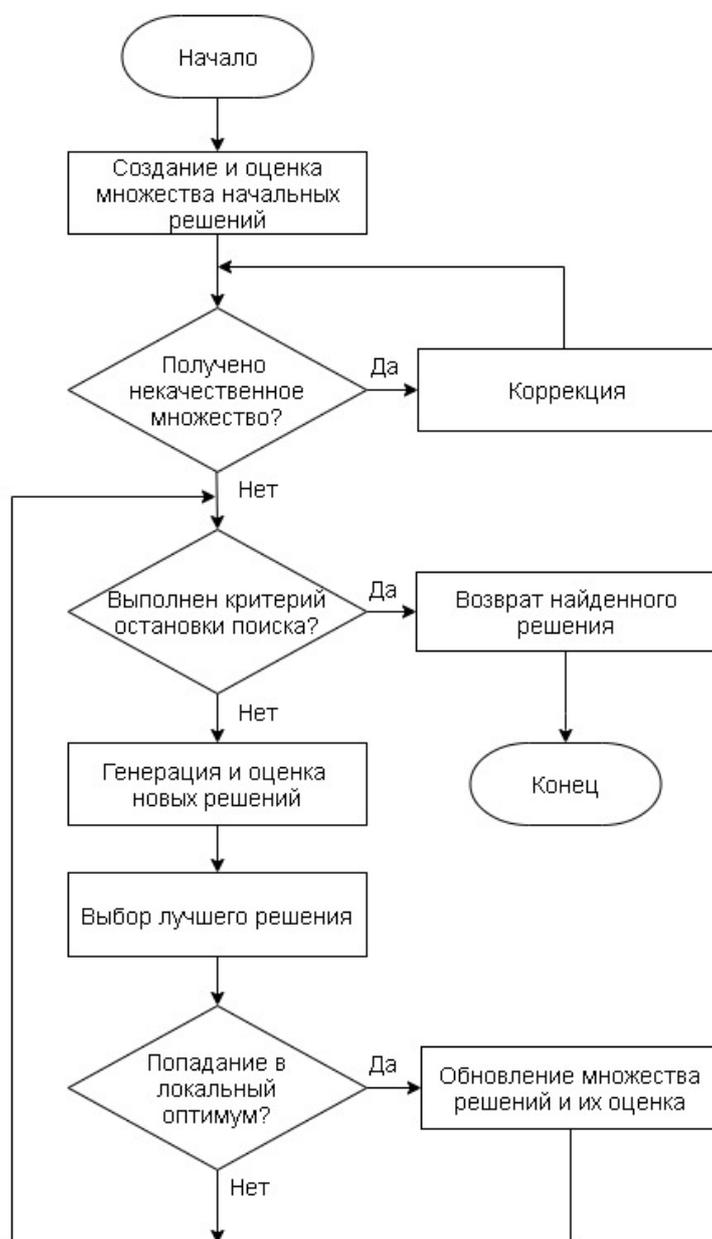
$$AE_g = \sum_{i=1}^{N_I} LOSS(SC_i - PC_i), \quad (3)$$

где  $g$  – номер подбора в популяции;  $N_I$  – число проектов;  $k$  – номер универсального атрибута;  $LOSS()$  – функция

потерь, определяющая зависимость размера ресурсных потерь, вызванную как при недостатке привлеченных на проект ресурсов, так и при избытке. Обычно недостаток привлеченных ресурсов опаснее избытка, ведь он выражается в недостатке опыта у специалиста, приводит к снижению качества и затягиванию сроков выполнения. Однако назначение избыточно ценного специалиста на про-

стой проект приводит к косвенным потерям, связанным с переплатами за профессионализм или необоснованного риска возникновения временной нехватки опытных кадров при появлении более сложных проектов.

Для организации работы ГА (рис. 2) и его последующей реализации определим следующие понятия.



**Рис. 2.** Блок-схема работы генетического алгоритма для получения оптимального решения

**Fig. 2.** Flowchart of the genetic algorithm for obtaining the optimal solution

**Целевая функция** - численно характеризует результат подбора проектантов и соответствует эффекту от назначения АЕ.

**Популяция** – совокупность из нескольких векторов  $SV$ .

**Размер популяции** – общее число элементов в векторах  $SV$ . Размер популяции задают до начала работы ГА. В течение всего периода работы он остается постоянным.

**Особь** – один вектор  $SV$ .

**Ген** – элемент вектора  $SV$ .

**Критерий прекращения работы ГА:** получение решения требуемого качества; попадание решения в глубокий локальный оптимум целевой функции; истечение допустимого времени поиска.

Следующий шаг предполагает определение характеристик и значений атрибутов (табл. 2), от которых зависят весовые коэффициенты кандидата и вакансии.

Последовательность работы генетического алгоритма для получения оптимального решения задачи рекрутинга проектантов изображена на рис. 2.

Программная реализация приведенной модели ГА осуществляется в среде программирования Jupyter Lab v2 [18] с использованием как свободно-распространяемых библиотек, модулей и программных компонентов, преимущественно с открытым исходным кодом.

## Результаты и их обсуждение

Для оценки поведения алгоритма необходимо сформировать набор на-

чальных условий. В качестве начальных условий выступают такие скалярные величины, как:

– со стороны общей модели: число универсальных атрибутов, число претендентов, число проектов, набор поправочных коэффициентов ( $CA, CW$ );

– со стороны модели алгоритма: размер популяции, размер элитной группы, размер вымирающей группы, число эпох;

– и такие векторные величины, как:

– со стороны общей модели: набор векторов атрибутов претендентов, набор векторов атрибутов проектов, набор векторов трудоёмкости атрибутов проектов;

– со стороны модели алгоритма: размер популяции, размер элитной группы, размер вымирающей группы, число эпох.

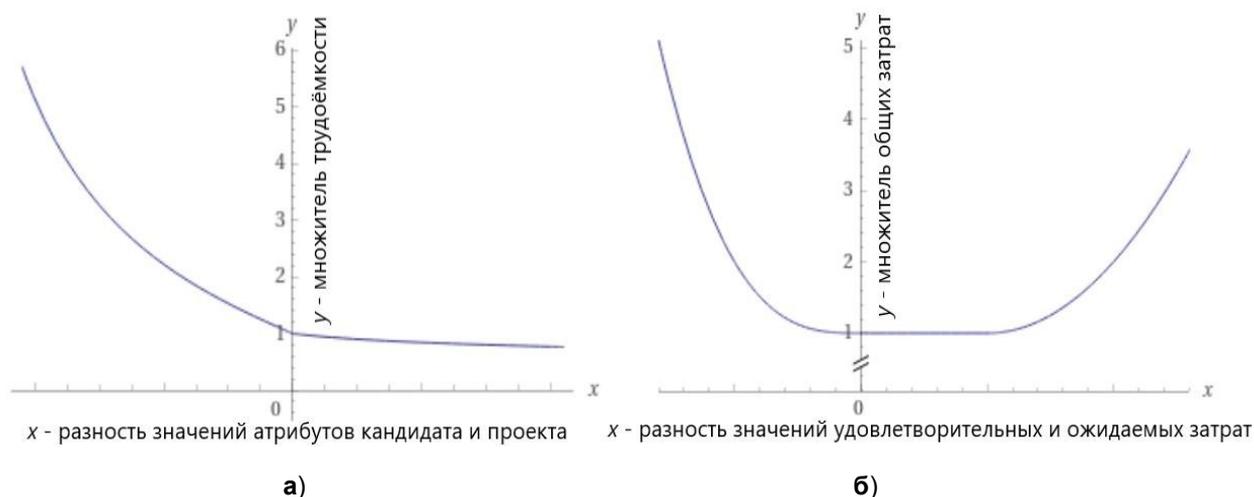
Кроме набора скалярных и векторных величин необходимо определить вид функций  $REC()$  и  $LOSS()$ , подобрать коэффициенты для корректного отражения зависимостей относительной эффективности и функции потерь соответственно. Зависимость  $REC()$  характеризует "политику организации" в отношении поручения проектов и назначения сотрудников на должности. В зависимости от характера функции, сотрудникам будут с большей, либо меньшей вероятностью поручаться проекты "на вырост". Зависимость  $LOSS()$  отражает особенности баланса между предоставлением ресурсов с избытком, либо с недостатком.

Пример возможных зависимостей для функции относительной эффективности  $REC()$  и стоимости  $LOSS()$  приведен на рис. 3а и 3б соответственно.

Представленные на рис. 4 зависимости предполагают значительное увеличение трудоёмкости проекта при недостатке квалификации претендента, а также ориентацию алгоритма на подбор преимущественно компетентных претендентов или претендентов с избыточной компетентностью. Модель может предполагать отдельную форму упомя-

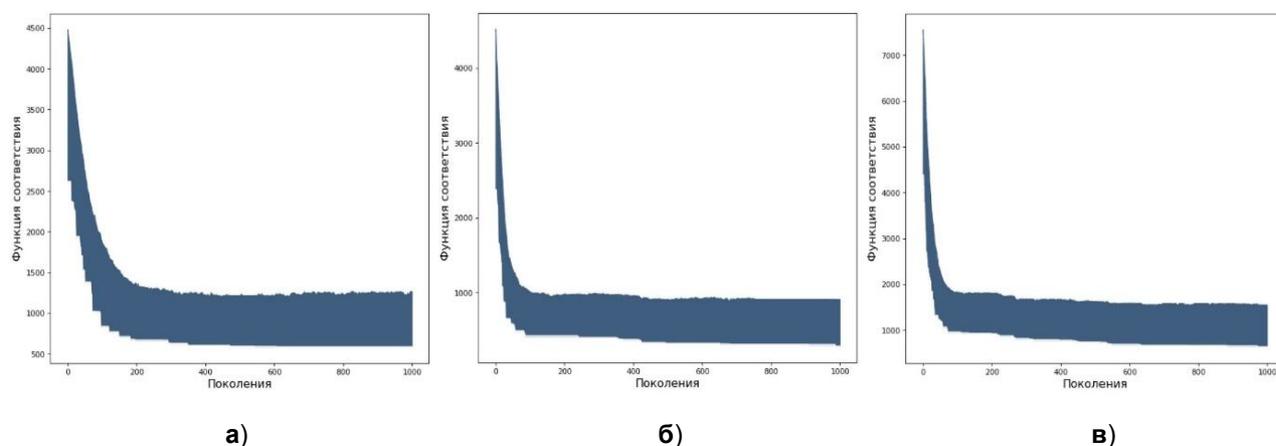
нутых зависимостей для каждого конкретного атрибута или вида проекта. Точный вид зависимостей и значения коэффициентов могут быть получены путём оптимизации параметра с применением одного из методов машинного обучения с учителем при наличии обучающих примеров.

Пример результатов моделирования с различными параметрами модели при заранее сформированных рандомизированных значениях атрибутов и трудоёмкостей приведен на рис. 4а – 4в.



**Рис. 3.** Пример возможных форм зависимости для функций  $REC()$  и  $LOSS()$

**Fig. 3.** Example of possible dependencies for the  $REC()$  and  $LOSS()$  functions()



**Рис. 4.** Пример результатов моделирования с различными параметрами модели

**Fig. 4.** Example of simulation results with different model parameters

На рисунках приведены значения диапазона разброса функции потерь среди членов популяции для следующих значений параметров модели: 8 атрибутов, 25 проектов, 30 претендентов на рис. 4а; 8 атрибутов, 25 проектов, 50 претендентов на рис. 4б; 16 атрибутов, 25 проектов, 50 претендентов на рис. 4в.

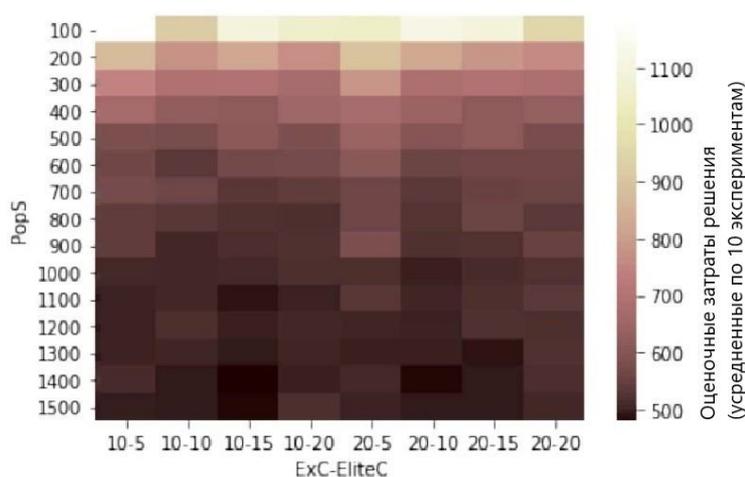
Вопросу выбора параметров моделирования посвящены многие исследовательские работы [19, 20]. От параметров алгоритма зависит ресурсоёмкость алгоритма, время его выполнения и качество получаемого результата. Для набора параметров *v* проведен ряд экспериментальных расчетов при различных сочетаниях параметров алгоритма: размер популяции от 100 до 1500 особей с шагом 100, размер элитной группы от 5 до 20 процентов с шагом 5, раз-

мер вымирающей группы от 10 до 20 процентов с шагом 10. Значения усредненных размеров оценочных затрат полученных решений приведены в таблице на рис. 5а и в псевдо-цветной таблице на рис. 5б. EliteC обозначает размер элитной группы в процентах, ExC – размер вымирающей группы, члены которой не имеют потомства, в процентах, а PopS определяет число особей в популяции. При расчетах применялся одинаковый набор ключей (seed) случайных величин для каждого нового набора параметров.

Для наглядности рассмотрим график зависимости лучшей усредненной стоимости выполнения набора проектов от размера популяции (рис. 6а). По графику видно, что примерно в районе значения 1000 особей прирост эффективности решения существенно снижается.

EliteC	10				20			
	5	10	15	20	5	10	15	20
PopS								
100	1189.1	923.2	1099.1	1061.8	1051.0	1113.1	1091.4	951.6
200	876.6	776.4	826.2	773.6	895.2	828.0	783.0	760.7
300	749.3	691.2	694.5	669.1	785.3	683.5	696.2	685.6
400	667.7	623.9	618.4	653.7	674.2	642.6	618.1	628.7
500	584.9	575.8	613.1	584.0	642.1	601.0	617.9	580.2
600	566.1	534.4	571.9	572.8	609.5	556.8	562.2	561.7
700	572.8	563.2	531.6	540.2	563.2	535.6	555.2	557.4
800	540.0	531.5	521.2	518.1	561.5	526.5	556.9	534.4
900	540.4	507.9	516.4	520.4	584.5	520.1	524.0	553.3
1000	509.3	506.3	508.9	518.2	517.6	498.7	513.9	523.9
1100	501.7	506.3	489.9	501.6	533.2	505.1	518.9	534.1
1200	502.8	519.5	499.3	508.3	505.2	501.4	520.9	517.0
1300	501.2	503.9	494.0	504.9	498.7	500.2	490.2	519.8
1400	511.6	493.6	481.0	500.0	509.0	485.7	492.4	516.4
1500	497.3	493.9	485.7	518.0	502.1	493.4	492.8	507.1

а)



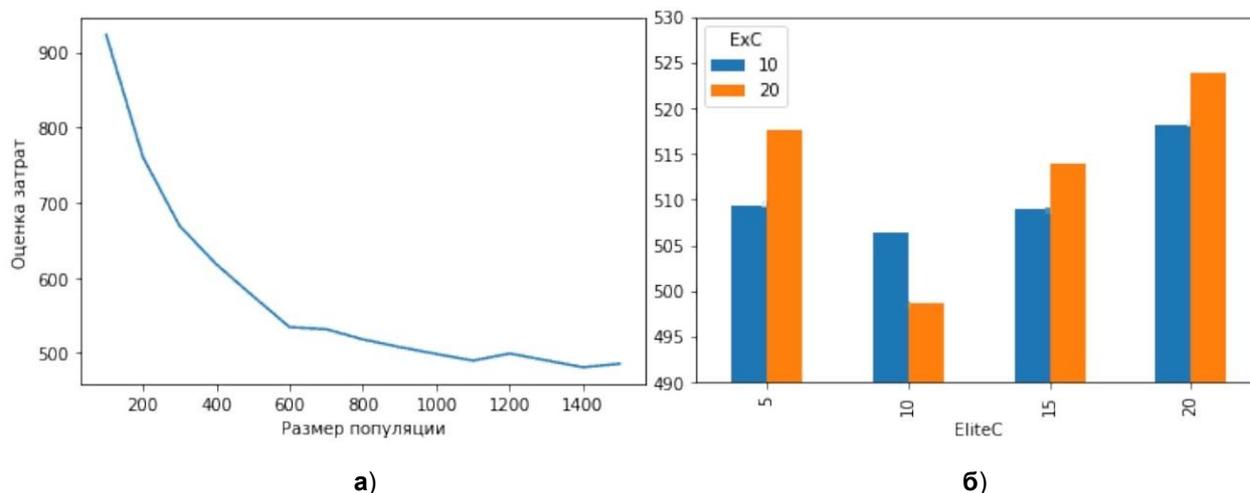
б)

Рис. 5. Результаты моделирования при различных параметрах алгоритма

Fig. 5. Simulation results for different algorithm parameters

Увеличение размера популяции сопровождается ростом объема вычислений, из чего следует, что желательно выбрать по возможности меньший размер популяции. Исходя из характера поведения вышеупомянутой зависимости, выбираем размер в 1000 особей для

следующих параметров модели: 16 атрибутов, 25 проектов, 50 претендентов. Изучим зависимость размера затрат при выбранном размере популяции от размера элитной группы и объема вымирающих особей, не имеющих потомства в новом поколении (рис. 6б).



**Рис. 6.** Зависимость затрат от размера популяции (а) и других параметров при размере популяции в 1000 особей (б)

**Fig. 6.** The dependence of costs on the population size (a) and other parameters for a population size of 1000 individuals (b)

Согласно полученным результатам, при общем объеме популяции в 1000 особей рекомендуемый объем элитной группы – 100 особей, вымирающей группы без потомства – 200 особей.

## Выводы

Предложенный подход позволяет не только автоматизировать подбор руководителей на основе накопленной истории данных, но и вносить коррективы в устоявшийся процесс для изменения вектора развития организации.

Взаимодействие образования и информатики (информационных технологий) способно обогатить и расширить поле обеих наук в сфере комплектова-

ния инновационных проектных команд. Их объектный анализ, дополненный возможностями генетического программирования, в своей совокупности позволяет добиться заданных качеств руководителя инновационных проектных команд, способствующих максимизации пользы для бизнеса при минимизации материальных затрат.

В качестве результата вычислительных экспериментов с применением математического аппарата и технологий генетических алгоритмов, необходимо подчеркнуть возможность экстраполяции подобного рода подходов на любой уровень реализации инновационных проектов.

### Список литературы

1. Давидсон Н., Мариев О., Пушкарёв А. Региональные факторы инновационной активности российских предприятий // Форсайт. 2018. № 3. С. 62–72.
2. Кашпаров Д. В., Кочин М. С. От тренинга стартапа как инструмента обучения разработке инноваций к инновационной экономике региона и страны // Вестник БФУ им. И. Канта. 2017. №4. С. 52–59.
3. Кэлоф Д. Л. Повышение эффективности инновационной деятельности компаний // Форсайт. 2018. Т. 12. № 3. С. 30–33.
4. Латур Бруно. Наука в действии: следуя за учеными и инженерами внутри общества / Бруно Латур; пер. с англ. К. Федоровой; СПб.: Изд-во Европейского университета в СПб. 2013. 414 с.
5. Мамчур Е.А. Фундаментальная наука и технологии: поиски механизмов взаимодействия // Современные технологии: философско- методологические проблемы. М., 2010. URL: <http://iph.ras.ru/uplfile/natsc/articals/mamchur/modem-tehnology.pdf> (дата обращения: 03.05.2020).
6. Яблонский А.И. Модели и методы исследования науки. М.: Эдиториал УРСС, 2001. 400 с.
7. Соколов К. О. Оценка потенциала инновационной команды // Дайджест-финансы. 2011. №8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-potentsiala-innovatsionnoy-komandy> (дата обращения: 08.05.2020).
8. Пельц Д., Эндрюс Ф. Ученые в организациях. Об оптимальных условиях для исследований и разработок. М., 1973.
9. Рассказова В.В. Командообразование в инновационных стартап-проектах // Научное обозрение. Педагогические науки. 2019. № 2-3. С.66-68; URL: <https://science-pedagogy.ru/ru/article/view?id=1898> (дата обращения: 08.05.2020).
10. Форд М. Роботы наступают: Развитие технологий и будущее без работы. [пер. с англ.]. М.: Альпина нон-фикшн, 2019. 430 с.
11. Stevenson M. An Optimist's Tour of the Future: One Curious Man Sets Out to Answer What's Next? // Avery; No Edition Stated edition (February 3, 2011). 384 p.
12. Кречетов И. А., Романенко В.В. Реализация методов адаптивного обучения // Вопросы образования. 2020. № 2. С. 252–277.
13. Сайранов А.С., Нефедов Д.Г., Русяк И.Г. Применение генетических алгоритмов для управления организационными системами при возникновении нештатных ситуаций // Компьютерные исследования и моделирование. 2019. Т. 11, № 3. С. 533-556.
14. Чеканин В.А., Ковшов Е.Е., Хуэ Н.Н. Повышение эффективности эволюционных алгоритмов при решении оптимизационных задач упаковки объектов // Системы управления и информационные технологии. 2009. № 3. С. 63-67.

15. Koz John R. Human-Competitive Results Produced by Genetic Programming, Genetic Programming and Evolvable Machines 11, nos. 3-4 (September 2010), <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1831232>.

16. Пресс-релиз Национального научного фонда (National Science Foundation) "Maybe Robots Dream of Electric Sheep, But Can They Do Science?", April 2, 2009, [http://www.nsf.gov/mobile/news/news\\_summ.jsp?cntn\\_id=114495](http://www.nsf.gov/mobile/news/news_summ.jsp?cntn_id=114495)

17. Schmidt Michael and Lipson Hod Distilling Free-Form Natural Laws from Experimental Data, *Science* 324 (April 3, 2009) [http://creativemachines.cornell.edu/sites/default/files/Science09\\_Schmidt.pdf](http://creativemachines.cornell.edu/sites/default/files/Science09_Schmidt.pdf).

18. Perkel J. M. Why Jupyter is data scientists' computational notebook of choice // *Nature*. 2018. Vol. 563. №. 7732. P. 145-147.

19. Чеканин В. А., Куликова М. Ю. Адаптивная настройка параметров генетического алгоритма // *Вестник МГТУ Станкин*. 2017. №. 3. С. 85-89.

20. Bernal E. et al. Imperialist competitive algorithm with dynamic parameter adaptation using fuzzy logic applied to the optimization of mathematical functions // *Algorithms*. 2017. Vol. 10. №. 1. P. 18.

## References

1. Davidson N., Mariev O., Pushkarev A. Regional'nye faktory innovatsionnoi aktivnosti rossiiskikh predpriyatii [Regional factors of innovation activity of Russian enterprises]. *Forsait = Foresight and STI Governance*, 2018, vol 12, no. 3, pp. 62 –72 (In Russ.).

2. Kashparov D., Kochin M. Ot treninga startapa kak instrumenta obucheniya razrabotke innovatsii k innovatsionnoi ekonomike regiona i strany [From startup training as a training tool for developing innovations to the innovative economy of the region and country]. *Vestnik BFU im. I. Kanta = Bulletin of Immanuel Kant Baltic Federal University*, 2017, no. 4, pp. 52-59 (In Russ.).

3. Kilov D. Povyshenie effektivnosti innovatsionnoi deyatel'nosti kompanii [Improving the efficiency of innovative activity of companies]. *Forsait = Foresight and STI Governance*, 2018, vol. 12, no. 3, pp. 30-33 (In Russ.).

4. Latour Bruno. *Nauka v deistvii: sleduya za uchenymi i inzhenerami vnutri obshchestva* [Science in action: How to Follow Scientists and Engineers through Society]. St. Petersburg, 2013. 414 p. (In Russ.).

5. Mamchur E. [Fundamental science and technology: search for mechanisms of interaction]. *Sovremennye tekhnologii: filosofsko-metodologicheskie problemy* [Modern Technologies: Philosophical and Methodological Problems]. Moscow, 2010 (In Russ.). Available at: <https://iphras.ru/uplfile/natsc/articals/mamchur/modern-tehnology.pdf>

6. Yablonsky A. *Modeli i metody issledovaniya nauki* [Models and methods of research of science]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2001. 400 p. (In Russ.).

7. Sokolov K. Otsenka potentsiala innovatsionnoi komandy [Evaluating the potential of an innovative team]. *Daidzhest-finansy = Digest-Finance*, 2011, no. 8 (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-potentsiala-innovatsionnoy-komandy>

8. Peltz D., Andrews M. *Uchenye v organizatsiyakh. Ob optimal'nykh usloviyakh dlya issledovaniy i razrabotok* [Scientists in organizations. About optimal conditions for research and development]. Moscow, 1973 (In Russ.).

9. Rasskazova V. Komandoobrazovanie v innovatsionnykh startup-proektakh [Team-building in innovative startup projects]. *Nauchnoe obozrenie. Pedagogicheskie nauki = Scientific Review Pedagogical Science*, 2019, vol 2-3, pp. 66-68 (In Russ.). Available at: <https://science-pedagogy.ru/ru/article/view?id=1898>

10. Ford M. *Roboty nastupayut: Razvitie tekhnologii i budushchee bez raboty* [Rise of the Robots: Technology and the Threat of a Jobless]. Moscow, 2019. 430 p. (In Russ.).

11. Stevenson M. *An Optimist's Tour of the Future: One Curious Man Sets Out to Answer What's Next?* (Avery No Edition Stated edition), 2011, 384 p.

12. Krechetov I., Romanenko V. Realizatsiya metodov adaptivnogo obucheniya [Implementation of adaptive learning methods]. *Voprosy obrazovaniya = The Issue of Education*, 2020, no. 2, pp. 252-277 (In Russ.).

13. Sairanov A., Nefedov D., Russyak I. Primenenie geneticheskikh algoritmov dlya upravleniya organizatsionnymi sistemami pri vozniknovenii neshtatnykh situatsii [In the Application of genetic algorithms for managing organizational systems in the event of emergency situations]. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie = Computer Research and Modeling*, 2019, vol. 11, no. 3, pp 533-556 (In Russ.).

14. Chekanin V, Kovshov E., Hue N. Povyshenie effektivnosti evolyutsionnykh algoritmov pri reshenii optimizatsionnykh zadach upakovki ob"ektov [Increase of efficiency of evolutionary algorithms at the decision optimization tasks of objects packing]. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii = Control Systems and Information Technologies*, 2009, vol 37, no. 3, pp. 63-67 (In Russ.).

15. Koza J. Human-competitive results produced by genetic programming *Genetic Programming and Evolvable Machines*, 2010, vol. 11, no. 3-4, pp. 251-284.

16. Press-reliz Natsional'nogo nauchnogo fonda [National science Foundation Press release] (National Science Foundation), *Maybe Robots Dream of Electric Sheep, But Can They Do Science?* 2009. April 2. Available at: [http://www.nsf.gov/mobile/news/news\\_summ.jsp?cntn\\_id=114495](http://www.nsf.gov/mobile/news/news_summ.jsp?cntn_id=114495)

17. Schmidt M., Lipson H, Distilling Free-Form Natural Laws from Experimental Data *Science*, 2009, 324 p. Available at: [http://creativemachines.cornell.edu/sites/default/files/Science09\\_Schmidt.pdf](http://creativemachines.cornell.edu/sites/default/files/Science09_Schmidt.pdf).

18. Perkel J. M. Why Jupyter is data scientists' computational notebook of choice. *Nature*, 2018, vol. 563, no. 7732, pp. 145-147.

19. Chekanin V. A., Kulikova M. Yu. Adaptivnaya nastroyka parametrov geneticheskogo algoritma [Adaptive adjustment of genetic algorithm parameters]. *Vestnik MGTU Stankin = Bulletin of MSTU Stankin*, 2017, no. 3, pp. 85-89 (In Russ.).

20. Bernal E. et al. Imperialist competitive algorithm with dynamic parameter adaptation using fuzzy logic applied to the optimization of mathematical functions. *Algorithms*, 2017, vol. 10, no. 1, p. 18

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Ковшов Евгений Евгеньевич**, доктор технических наук, профессор, АО "НИКИМТ – Атомстрой", г. Москва, Российская Федерация, e-mail: KovshovEE@atomrus.ru

**Evgeniy E. Kovshov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, JSC "NIKIMT – Atomstroy", Moscow, Russian Federation, e-mail: KovshovEE@atomrus.ru

**Кувшинников Владимир Сергеевич**, АО "НИКИМТ – Атомстрой", г. Москва, Российская Федерация, e-mail: KuvshinnikovVS@atomrus.ru

**Vladimir S. Kuvshinnikov**, JSC "NIKIMT – Atomstroy", Moscow, Russian Federation, e-mail: KuvshinnikovVS@atomrus.ru

**Осипенко Людмила Евгеньевна**, доктор педагогических наук, доцент, Московский городской педагогический университет, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: OsipenkoLE@mgpu.ru

**Ludmila E. Osipenko**, Dr. of Sci. (Pedagogical), Associate Professor, Moscow City Pedagogical University, Moscow, Russian Federation, e-mail: OsipenkoLE@mgpu.ru